

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO
DE LIMPIEZA DE SUPERFICIES DE ALUMINIO 1100 PARA
EVALUAR EL EFECTO EN LA ADHERENCIA DEL ESMALTE
PORCELÁNICO CON LA SUPERFICIE METÁLICA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

**MARÍA JOSÉ ZAMBRANO PÉREZ
(majos_zambrano@hotmail.com)**

**DIRECTOR: Ing. MARCELO FERNANDO SALVADOR QUIÑONES
(marcelo.salvadorq@epn.edu.ec)**

Quito, Agosto 2017

© Escuela Politécnica Nacional (2017)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, María José Zambrano Pérez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

María José Zambrano Pérez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. María José Zambrano Pérez, bajo mi supervisión.

Ing. Marcelo Fernando Salvador Quiñones
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por bendecirme con una familia maravillosa ya que gracias a la unión y paciencia alcancé todo lo que tengo.

A mi papa por apoyarme en todo lo que me propongo. A mi mami por sus palabras de aliento, perseverancia y por enseñarme que nunca hay que darse por vencido. A mis hermanos Miguel, Daniel y Fernanda, por ser mi verdadero ejemplo a seguir.

Agradezco al Ingeniero Marcelo Salvador, por estar dispuesto a brindarme sus acertados consejos para la realización de este proyecto de investigación.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a: Jorge y Rosario, mis queridos padres y a mis hermanos: Miguel, Daniel y Fernanda

Les amo con todo mi corazón

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN	x
1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Propiedades físicas y uso industrial del aluminio	1
1.2 Obtención industrial del aluminio y sus aleaciones	3
1.2.1 Minerales de aluminio	3
1.2.2 Aluminio primario o de primera fusión	5
1.2.3 Aluminio secundario o de segunda fusión	8
1.2.4 Aleaciones de aluminio	9
1.3 Mecanismo de corrosión del aluminio y sus aleaciones	15
1.3.1 Métodos de protección contra la corrosión	17
1.3.2 Protección por recubrimientos	18
1.3.3 Polarización electroquímica	20
1.3.4 Otros métodos de protección	20
1.4 Proceso de anodizado del aluminio	21
1.4.1 Tratamiento superficial	21
1.4.2 Anodizado	23
1.4.3 Factores que afectan las propiedades y naturaleza de la capa de óxido de aluminio	26
2 PARTE EXPERIMENTAL	27
2.1 Evaluación del efecto de la temperatura, del tiempo y de la concentración del hidróxido de sodio en el proceso de decapado del aluminio 1100	30
2.1.1 Evaluación del efecto de la concentración del hidróxido de sodio en el proceso de decapado del aluminio 1100	30
2.1.2 Evaluación del efecto de la temperatura en el proceso de decapado del aluminio 1100	36
2.1.3 Evaluación del efecto del tiempo en el proceso de decapado del aluminio 1100	37
2.2 Evaluación del efecto del tiempo y la concentración de ácido crómico en el proceso de anodizado del aluminio 1100	38
2.2.1 Evaluación del efecto de la concentración de ácido crómico en el proceso de anodizado	38
2.2.2 Evaluación del efecto del tiempo en el proceso de anodizado	40
2.2.3 Sellado	41

2.3	Evaluación del efecto del decapado y del anodizado sobre la adherencia entre el aluminio 1100 y el esmalte porcelánico	41
2.3.1	Formulación del esmalte	41
2.3.2	Determinación de la adherencia del esmalte	42
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
3.1	Evaluación del efecto de la concentración del hidróxido de sodio, de la temperatura y del tiempo en el proceso de decapado del aluminio 1100	44
3.1.1	Evaluación del efecto de la concentración del hidróxido de sodio en el proceso de decapado	44
3.1.2	Evaluación del efecto de la temperatura en el proceso de decapado	54
3.1.3	Evaluación del efecto del tiempo en el proceso de decapado	60
3.2	Evaluación del efecto de la concentración de ácido crómico y del tiempo y en el proceso de anodizado del aluminio 1100	66
3.2.1	Evaluación del efecto de la concentración de ácido crómico en el proceso de anodizado del aluminio 1100	66
3.2.2	Evaluación del efecto del tiempo en el proceso de anodizado	75
3.3	Evaluación del efecto del decapado y del anodizado sobre la adherencia entre el aluminio 1100 y el esmalte porcelánico	83
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
4.1	Conclusiones	90
4.2	Recomendaciones	91
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	ANEXOS	99

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Propiedades físicas del aluminio puro	1
Tabla 1.2.	Minerales que contienen aluminio	4
Tabla 1.3.	Composición típica de las bauxitas	4
Tabla 1.4.	Identificación de las aleaciones de aluminio	11
Tabla 2.1.	Condiciones de operación del decapado condistintas concentraciones de hidróxido de sodio	31
Tabla 2.2.	Materias primas fuentes de los óxidos formadores de esmalte y dosificación de las materias primas para la preparación del esmalte porcelánico	32
Tabla 2.3.	Condiciones de operación del decapado con distintas temperaturas	37
Tabla 2.4.	Condiciones de operación del baño de decapado a diferentes tiempos	38
Tabla 2.5.	Condiciones de operación del anodizado a diferentes concentraciones de ácido crómico	39
Tabla 2.6.	Condiciones de operación del baño de anodizado a diferentes tiempos	41
Tabla 3.1.	Características de las placas de aluminio 1100 decapadas con diferentes concentraciones de hidróxido de sodio	46
Tabla 3.2.	Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio decapado con diferentes concentraciones de hidróxido de sodio	47
Tabla 3.3.	Captación de esmalte sobre placas decapadas con distintas concentraciones de hidróxido de sodio	48
Tabla 3.4.	Espesor de la capa de esmalte sobre aluminio decapado a diferentes concentraciones de hidróxido de sodio	49
Tabla 3.5.	Características del esmalte aplicado sobre las placas decapadas con distintas concentraciones de hidróxido de sodio	52
Tabla 3.6.	Análisis de varianza para la adherencia del esmalte en función de la concentración de hidróxido de sodio	53

Tabla 3.7.	Características de las placas de aluminio 1100 decapadas a distintas condiciones de temperatura	54
Tabla 3.8.	Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio decapado con diferentes temperaturas	56
Tabla 3.9.	Captación de esmalte sobre la superficie de aluminio decapada a distintas temperaturas y después del ensayo de fricción	57
Tabla 3.10.	Espesor de la capa de esmalte sobre el aluminio decapado a distintas temperaturas	57
Tabla 3.11.	Evaluación del esmalte porcelánico aplicado sobre las placas decapadas con distintas temperaturas	59
Tabla 3.12.	Análisis de varianza para la adherencia del esmalte en función de la temperatura	60
Tabla 3.13.	Características de las placas de aluminio 1100 antes y después del decapado	61
Tabla 3.14.	Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio decapado con diferentes tiempos	62
Tabla 3.15.	Captación de esmalte sobre superficies de aluminio decapadas a diferentes tiempos y después del ensayo de fricción	62
Tabla 3.16.	Espesor del esmalte sobre superficies de aluminio decapadas a diferentes tiempos y después del ensayo de fricción	63
Tabla 3.17.	Evaluación de la capa de esmalte aplicada sobre las placas de aluminio decapadas a diferentes tiempos	65
Tabla 3.18.	Análisis de varianza para la adherencia del esmalte en función del tiempo de decapado	66
Tabla 3.19.	Características de las placas de aluminio 1100 anodizadas con soluciones de ácido crómico de distintas concentraciones	67
Tabla 3.20.	Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio anodizado con distintas concentraciones de ácido crómico	70
Tabla 3.21.	Captación de esmalte sobre la superficie de aluminio anodizado con distintas concentraciones de ácido crómico y luego del ensayo de fricción	71
Tabla 3.22.	Espesor de la capa de esmalte sobre la superficie de aluminio anodizado con distintas concentraciones de ácido crómico	71

Tabla 3.23.	Evaluación del esmalte aplicado sobre las placas de aluminio anodizadas a diferentes concentraciones de ácido crómico	74
Tabla 3.24.	Análisis de varianza para la adherencia de esmalte en función de la concentración de ácido crómico	75
Tabla 3.25.	Características de las placas de aluminio 1100 con distintos tiempos de anodizado	76
Tabla 3.26.	Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio anodizado con diferentes tiempos	77
Tabla 3.27.	Captación de esmalte sobre la superficie de aluminio anodizado a diferentes tiempos y luego del ensayo de fricción	77
Tabla 3.28.	Espesor de la capa de esmalte sobre la superficie de aluminio anodizado a diferentes tiempos	78
Tabla 3.29.	Evaluación del esmalte aplicado sobre las placas de aluminio anodizadas a diferentes tiempos	79
Tabla 3.30.	Análisis de varianza de la adherencia del esmalte en función del tiempo de anodizado	80
Tabla 3.31.	Condiciones de operación para los procesos de decapado y anodizado	81
Tabla 3.32.	Frecuencia y frecuencia acumulada para la serie de datos del porcentaje de adherencia	81
Tabla 3.33.	Características del esmalte sobre la placa de aluminio 1100 previamente decapada	83
Tabla 3.34.	Características del esmalte sobre la placa de aluminio 1100 previamente decapada y anodizada	84
Tabla 3.35.	Energía aplicada a la placa de aluminio durante el ensayo de resistencia al impacto	86
Tabla 3.36.	Resultados de las pruebas de resistencia al impacto de la placa decapada con las mejores condiciones de operación	86
Tabla 3.37.	Resultados de las pruebas de resistencia al impacto de la placa decapada y anodizadas con las mejores condiciones de operación	88
Tabla AIII.1.	Eventos que afecta la adherencia del esmalte	102
Tabla AIV.1.	Criterios para la evaluación de la adherencia del esmalte porcelánico en la prueba de resistencia al impacto	105

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Diagrama del proceso químico para la obtención de alúmina por el método Bayer	6
Figura 1.2.	Célula electrolítica para la obtención de aluminio por el proceso Hall	7
Figura 1.3.	Diagrama de flujo del proceso de la producción de aluminio secundario o de segunda fusión	9
Figura 1.4.	Ejemplo de la nomenclatura de las aleaciones de aluminio y significado de cada dígito	12
Figura 1.5.	Métodos de protección contra la corrosión en metales	18
Figura 1.6.	Celda electrolítica utilizada en el proceso de anodizado de aluminio	24
Figura 2.1.	Diagrama de flujo del proceso del tratamiento superficial del aluminio por anodizado	27
Figura 2.2.	Horno de atronado, formado por: 1.- Crisol de atronado; 2.- Cámara de atronado; 3.- Ventilador; 4.- Tubería de ingreso de la mezcla aire-gas; 5.- Recipiente de cobre; 6.- Tanque de gas	33
Figura 2.3.	Aplicación de esmalte porcelánico por método de espolvoreo	34
Figura 2.4.	Ciclo de cocción del esmalte porcelánico	34
Figura 2.5.	Equipo para ensayos de fricción, constituido por: 1.- Cilindro giratorio; 2.- Placa de aluminio de estudio; 3.- Soporte para placas	35
Figura 2.6.	Impactómetro	43
Figura 3.1.	Decapado alcalino del aluminio	45
Figura 3.2.	Representación del agua libre y ligada	48
Figura 3.3.	Captación de esmalte en función de la concentración de hidróxido de sodio del baño de decapado	51
Figura 3.4.	Espesor de la capa de esmalte en función de la concentración de hidróxido de sodio del baño de decapado	51
Figura 3.5.	Solubilidad del aluminio en hidróxido de sodio a diferentes temperaturas	55

Figura 3.6.	Captación de esmalte en función de la temperatura del baño de decapado	58
Figura 3.7.	Espesor del esmalte en función de la temperatura del baño de decapado	58
Figura 3.8.	Captación del esmalte en función de la variación del tiempo de decapado	64
Figura 3.9.	Espesor de la capa de esmalte en función del tiempo de decapado	64
Figura 3.10.	Variación de la captación de esmalte en función de la concentración de ácido crómico en el baño de anodizado	72
Figura 3.11.	Variación del espesor del esmalte en función de la concentración de ácido crómico en el baño de anodizado	73
Figura 3.12.	Captación de esmalte en función del tiempo de anodizado	78
Figura 3.13.	Variación del espesor del esmalte en función del tiempo de anodizado	79
Figura 3.14.	Diagrama de Pareto	82
Figura AIV.1.	Tipos de círculos concéntricos formados en las pruebas de resistencia al impacto	104

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Determinación de la captación y el espesor del esmalte sobre la pieza de aluminio	100
ANEXO II	
Análisis estadístico de las condiciones de operación de los procesos de decapado y anodizado sobre la adherencia del esmalte porcelánico	101
ANEXO III	
Construcción del diagrama de pareto	102
ANEXO IV	
Criterios para la evaluación de la adherencia del esmalte porcelánico sobre la superficie de aluminio según la norma ASTM B 219	104

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el estudio de la influencia que ejercen los tratamientos de limpieza en piezas de aluminio sobre la adherencia del esmalte porcelánico. Para lo cual se determinaron los valores de las variables de operación de los procesos de decapado y anodizado, que permitieron incrementar el espesor de la capa de óxido de aluminio en la superficie de las piezas metálicas, con la finalidad de evitar la corrosión. A través del diseño experimental unifactorial (al azar) se estudió el efecto de las variables de operación de los procesos de decapado y anodizado sobre la adherencia del esmalte. Se realizaron 4 repeticiones de cada ensayo. Los resultados fueron analizados mediante el programa STATGRAPHICS con un 95 % de confianza. Para éste experimento, se utilizaron placas de aluminio 1100, con dimensiones de 3x3 cm. El proceso se inició con un tratamiento superficial de las placas de aluminio para eliminar cualquier tipo de impurezas. Las placas fueron sometidas a procesos de: pulido mecánico (lijado), desengrasado, decapado, anodizado y sellado. Entre cada proceso se realizó un lavado de la pieza con agua destilada. Las condiciones de operación de los procesos de decapado y anodizado fueron las siguientes: para el decapado se utilizaron concentraciones de hidróxido de sodio de 10,0, 12,5 y 15,0 %, las temperaturas fueron de 50 y 60 °C y los tiempos de 2 y 5 minutos. Para el anodizado las concentraciones del ácido crómico fueron de 3,0; 7,5 y 10% y tiempos de 35 y 39 minutos. La evaluación del efecto sobre la adherencia entre el esmalte porcelánico crudo y la superficie de aluminio previamente decapada y anodizada se realizó por medio de los ensayos de fricción y resistencia al impacto, en los que se determinó la cantidad de esmalte captado y la adherencia respectivamente. De los resultados obtenidos se concluyó que: al someter a la pieza a los tratamientos de: lijado; desengrasado; decapado en hidróxido de sodio al 10,0 %, temperatura de 50 °C, por un tiempo de 2 minutos; anodizado con ácido crómico al 3,0 % a una temperatura de 35 °C, durante 35 minutos; sellado y esmaltado, se obtuvo una adherencia promedio del $86,34 \pm 1,93$ % evaluada a través de los ensayos de fricción y resistencia al impacto.

INTRODUCCIÓN

Ecuador actualmente importa alrededor de 129 millones USD de productos de aluminio primario (principalmente barras, alambρόn, perfiles y tuberías), y exporta alrededor de 33 millones USD de productos metálicos acabados (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2014).

La mayor parte de perfiles metálicos son utilizados como materia prima para la elaboración de contenedores, recipientes, tuberías, etc; estos últimos se los usa como materiales para ofrecer servicios industriales, por tal motivo, es importante evitar los procesos de corrosión de las superficies metálicas empleadas, particularmente de aquellas que se encuentran expuestas a los agentes atmosféricos. Los óxidos formados durante la corrosión contaminan el producto. Adicionalmente, esto significa para el país, una pérdida de millones de toneladas de metales (Silva y Cevallos, 2012, p. 9).

En países industrializados, se estima que el 5 % del producto interno bruto (PIB) se emplea para corregir y evitar problemas con la corrosión metálica (Gómez de León y Alcaraz, 2004, p. 14).

Por otro lado, la corrosión metálica provoca contaminación ambiental puesto que genera: aumento de productos residuales, contaminación de agua y suelo (Bilurbina, Iribarre y Liesa, 2003, p.14).

En el sector productivo cerámico existe un creciente interés en el desarrollo de nuevos materiales con mejores beneficios tecnológicos, entre los que se destacan: mayor índice de refracción y mejor resistencia mecánica. Entre estas nuevas tecnologías se encuentra el anodizado que representa un avance en el desarrollo de la calidad superficial de la perfilería de aluminio, reduciendo notablemente las marcas de extrusión y permitiendo la aplicación de varias tonalidades y acabados innovadores (Guerrero, Dávila, Gales, Pontón, Rosas, Sotomayor y Valdivieso, 2011, pp. 26-27).

Para la industria, el aluminio anodizado posee numerosas posibilidades de uso entre las principales se encuentran: protección contra la oxidación y abrasión, acción aislante (Coca, 2004, p. 741).

Las impurezas presentes en la mayoría de las aleaciones de aluminio, disminuyen notablemente la resistencia a la corrosión (Vielhaber, 2002, p. 26). Antes de esmaltar una pieza metálica se debe preparar cuidadosamente, para lo cual se realiza una limpieza superficial y un desengrasado ya que de esta operación depende la calidad del acabado. Una mala preparación de la superficie metálica antes del esmaltado, puede generar defectos tales como: descascarillamiento, baja adherencia, escamado, grietas, etc. (Estrada y Jiménez, 2010, p. 124).

En este estudio se pretende disminuir los procesos de corrosión metálica mediante la limpieza superficial y la generación de capas protectoras para obtener materiales con nuevos acabados y principalmente otorgarle otras propiedades físicas en comparación con las que posee el metal sin tratamiento de anodizado y decapado. Esto se logrará mediante el uso de detergentes para una limpieza previa, baños de hidróxido de sodio como agente decapante y baños de ácido crómico como agente anodizante.

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y USO INDUSTRIAL DEL ALUMINIO

1.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ALUMINIO

El aluminio es un material muy versátil, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas lo hacen especialmente apto para aplicaciones en donde la temperatura es un factor crítico. (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 157).

Entre sus propiedades físicas cabe resaltar que posee un bajo peso específico, por su elevada conductividad eléctrica y calorífica es muy utilizado en la industria eléctrica. El aluminio es idóneo para la fundición debido a su bajo punto de fusión, así como su alta temperatura de ebullición (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 157).

En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de las propiedades físicas del aluminio puro. Estas propiedades pueden variar dependiendo del tipo de aleación de aluminio (Aparicio, et al, 2001, p.14).

Tabla 1.1. Propiedades físicas del aluminio puro

Propiedad	Valor
Color	Blanco-plata
Densidad a 20 °C	2,699 g/cm ³
Viscosidad (en el punto de fusión)	0,012 poise
Punto de fusión	660,2 °C
Punto de ebullición	2057 °C/2480 °C
Calor específico a 20 °C	930 J
Conductividad térmica a 0 °C	0,50 Cal/s/cm ² /cm/°C
Resistividad eléctrica a 20 °C	2,69 μΩ cm
Calor de fusión	397 J/g
Calor de vaporización	1,08x10 ⁻⁴ J/g K
Capacidad calorífica	0,9 J/g K

(Aparicio, et al, 2001, p.14)

Dentro de las propiedades mecánicas se destacan su gran ductilidad y maleabilidad, con lo cual se pueden obtener hilos delgados así como láminas. Su bajo peso específico permite obtener aleaciones más ligeras que se emplean en la industria aeronáutica y vehículos de transporte (Coca, 2004, p. 6).

1.1.2 USO INDUSTRIAL DEL ALUMINIO

El aluminio, en estado puro se lo utiliza en la elaboración de espejos para uso doméstico y para telescopios reflectores (Pancorbo, 2011, p. 330).

Para la industria, se utiliza el aluminio en aleaciones con otros materiales. Entre los principales usos industriales de estas aleaciones, se destaca los siguientes (Pancorbo, 2011, p. 330):

- Transporte: El uso de aluminio en la fabricación de medios de transporte, reduce el consumo de combustible puesto que es un material ligero. Otra de las razones principales para utilizarlo se debe a que puede ser reciclado. El aluminio es materia prima para la estructura de bicicletas, automóviles, aviones, y tanques. (Aparicio, et al, 2001, p.14).
- Edificios y viviendas: carpintería metálica como ejemplo puertas, techos, cerraduras, ventanas, canales de desagüe, etc. (Coca, 2004, p. 6).
- Embalaje de alimentos: Se prefiere el uso de aluminio ya que en comparación con otros envases da protección durante largos periodos de tiempo puesto que impide el paso de oxígeno y de la luz, es muy ligero, ocupa poco espacio, permite un sistema de enfriamiento rápido, es flexible y principalmente es un material reciclable. Existen varias formas de almacenamiento entre las principales se destacan: latas, papel de aluminio, protección interna de los envases de cartón, laminas para embalaje de medicamentos. (Pancorbo, 2011, p. 331).
- Bienes de uso doméstico: por su conductividad térmica se utiliza en la

fabricación de utensilios de cocina, herramientas, etc. (Aparicio, et al, 2001, p.14).

- Transmisión eléctrica: este material permite el transporte de energía de una forma más económica, por su alta resistencia a la corrosión y su baja densidad es utilizado en revestimientos de cables (Coca, 2004, p. 6).
- Recipientes criogénicos: presenta buen comportamiento a bajas temperaturas. (Aparicio, et al, 2001, p.14).
- Otros usos incluyen la elaboración de herramientas, aparatos electrodomésticos y equipo deportivo como; raquetas de tenis, palos de baseball, esquís.

1.2 OBTENCIÓN INDUSTRIAL DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio es uno de los elementos químicos más importantes y difundidos en la naturaleza. Por sus excelentes propiedades la industria emplea el aluminio para aleaciones ligeras (Odetti, 2006, p. 128).

Este metal no se encuentra en estado puro, por tal motivo su extracción era considerablemente difícil, por lo que fue calificado como un metal precioso durante un tiempo. Sin embargo, con las mejoras en los proceso de extracción, los precios de comercialización bajaron (Robinson, 2010, p. 725).

1.2.1 MINERALES DE ALUMINIO

Algunos minerales se emplean principalmente como fuente de obtención de otras sustancias que no se encuentran disponibles naturalmente o simplemente sus concentraciones no son utilizables a escala industrial (Mantell, 2003, p. 364), este es el caso del aluminio, si bien es considerado como el segundo elemento más abundante de la tierra, no se encuentra en estado puro, solo existe en la

naturaleza en combinación con otros materiales, algunos ejemplos se presentan en la Tabla 1.2. (Odetti, 2006, p. 129).

Tabla 1.2. Minerales que contienen aluminio

Compuestos	Minerales
Silicatos	Caolín Arcilla Feldespato Mica Pizarras
Óxidos	Óxido de aluminio hidratado Bauxita Óxido de aluminio anhídrido Corindón, rubí, zafiro (en forma cristalina)
Fluoruros	Criolita (fluoruro doble de sodio y aluminio) Na_3AlF_6

(Mantell, 2003, p. 365)

A escala industrial, el aluminio es uno de los metales que se obtiene grandes cantidades, se lo extrae principalmente de la bauxita, que contiene alrededor de un 35 al 60 % de Al_2O_3 impurificada con óxidos de: hierro, silicio y titanio, así como por pequeñas cantidades de arcillas y otros silicatos (Robinson, 2010, p. 725).

En la Tabla 1.3 se muestra las composiciones típicas de una bauxita australiana manufacturada en Europa Occidental, así como de una bauxita europea (griega) rica en hierro (Coca, 2004, p. 9).

Tabla 1.3. Composición típica de las bauxitas

Procedencia	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	TiO_2 (%)	CaO (%)	Pérdidas por calcinación (%)	Minerales de aluminio principal	Acompañante
Weipa (Australia)	55,0	10,0	5,0	2,5	trazas	25,0	Hidrargilita	Bohemita Caolinita
Eleusis (Grecia)	51,0	30,0	2,0	2,5	2,0	12,0	Bohemita Diasporonita	Caolinita

(Coca, 2004, p. 9)

1.2.2 ALUMINIO PRIMARIO O DE PRIMERA FUSIÓN

1.2.2.1 Metalurgia del aluminio

La metalurgia de este metal, está condicionada por su carácter electroquímico, manifestada por su gran afinidad con el oxígeno y el cloro. La reducción del óxido de aluminio con carbono es posible realizarla en un horno eléctrico, a una temperatura sobre los 2 000°C, sin embargo, los óxidos que forman parte de la bauxita como: óxido férrico, dióxido de silicio y dióxido de titanio, se reducen a temperaturas inferiores, como resultado se obtiene una aleación de aluminio, silicio y titanio que contiene carbono, de esta se puede obtener aluminio a un costo muy elevado. Por esta razón es económicamente imposible extraer aluminio por procedimientos convencionales de reducción con carbono (Coca, 2004, p. 8).

La metalurgia extractiva del aluminio consiste en dos fases (Mantell, 2003, p. 364):

- Transformación de la bauxita en alúmina
- Electrólisis de la alúmina disuelta en criolita fundida

Para la primera fase, se realiza un método químico por vía húmeda conocido como proceso Bayer (Mantell, 2003, p. 364), que consiste en: lavar, pulverizar y disolver a la bauxita en una solución alcalina caliente de hidróxido de sodio a altas condiciones de presión y temperatura, como resultado se obtiene una solución de aluminato de sodio y residuos de bauxita que contienen hierro, silicio y titanio, los cuales son conocidos comúnmente con el nombre de “barro rojo”, éste se va depositando en el fondo del tanque y posteriormente es removido (Rubinos, 2007, p. 38).

La solución de aluminato de sodio sedimentada, es bombeada hacia un precipitador en el que se añade partículas finas de alúmina como germen inoculante de la cristalización. Posteriormente las partículas que se van depositando en el fondo del tanque, son removidas del precipitador y pasan a un

horno calcinador a 1 100 °C para eliminar el agua producto de la cristalización. Se obtiene un polvo blanco que es la alúmina pura (Rubinos, 2007, p. 39).

En la Figura 1.1 se presenta un diagrama de la primera fase del proceso químico para la obtención y producción de aluminio.

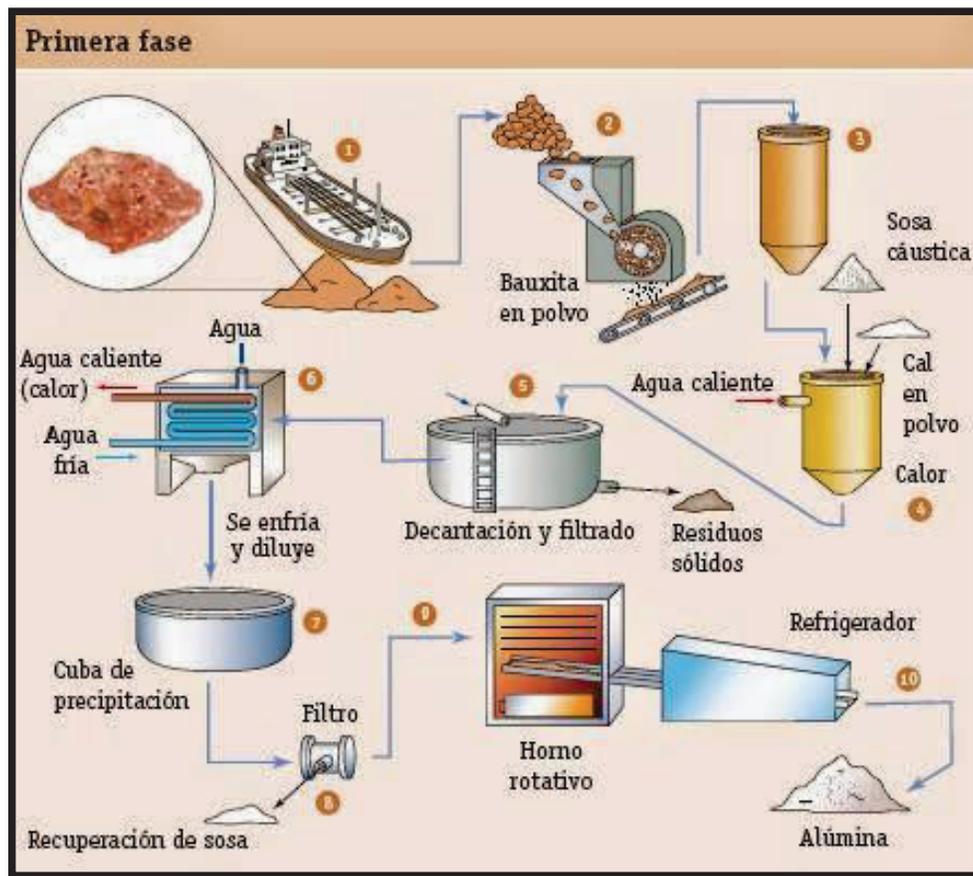


Figura 1.1. Diagrama del proceso químico para la obtención de alúmina por el método Bayer (Rubinos, 2007, p. 43)

La segunda fase consiste en una electrólisis de la alúmina disuelta en criolita fundida, este procedimiento fue elaborado por Hall y Heroult (Robinson, 2010, p. 726).

El aluminio se obtiene a partir de la reducción electroquímica de la mezcla de alúmina y criolita (Na_3AlF_6). La alúmina se disuelve en criolita fundida a una temperatura de 1 000 °C. Los ánodos son barras de grafito parcialmente sumergidas en el electrolito, estos se oxidan y dan lugar a la formación de CO_2

gas y a medida que se consumen se desplazan hacia abajo, de tal forma que continúen sumergidos en la mezcla fundida de alúmina y criolita. (Robinson, 2010, p. 726).

El acero recubierto de grafito propio de la vasija electrolítica, actúa como cátodo. Los iones aluminio se reducen a aluminio metálico en el cátodo de carbono que recubre la vasija. Debido a que el aluminio es más denso que la mezcla fundida de alúmina y criolita, el aluminio cae al fondo de la célula donde se lo remueve y puede extraerse de la misma (Robinson, 2010, p. 726).

El aluminio primario o de primera fusión tiene un grado de pureza entre el 93,3 - 99,8 %. El metal puro luego de alearse con otros elementos, se lo utiliza para la preparación de lingotes de aleaciones, barras, tochos de extrusión, planchas para laminados, etc. (Navarro, 2011, p. 26).

En la Figura 1.2 se esquematiza una celda electrolítica típica para la obtención de aluminio.

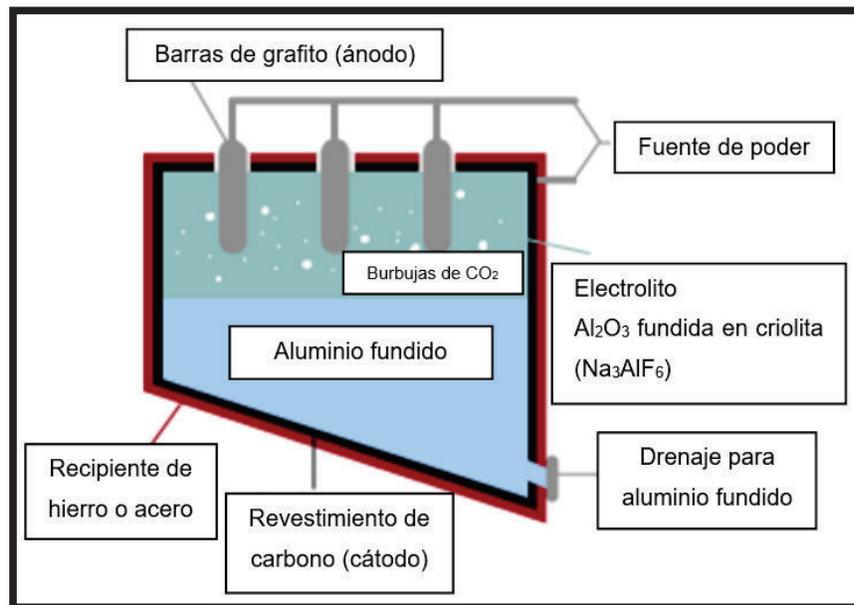


Figura 1.2. Célula electrolítica para la obtención de aluminio por el proceso Hall (Robinson, 2010, p. 726).

1.2.3 ALUMINIO SECUNDARIO O DE SEGUNDA FUSIÓN

Este proceso es muy variable ya que depende de dos parámetros fundamentales que son (Gonzalo, 2008, p. 5):

- El tipo de materia prima secundaria, ésta es muy heterogénea.
- Del producto final, es decir, el contenido de aluminio.

En general, el proceso está constituido de las siguientes etapas (Gonzalo, 2008, p. 5):

- Recuperación, clasificación y almacenamiento de las materias primas secundarias.
- Tratamiento térmico en horno de fusión para la eliminación de las capas de pintura.
- Control de la colada de aluminio.
- Moldeo para la obtención de lingotes.

En el tratamiento térmico se pueden utilizar varios tipos de hornos, con lo cual se pueden emplear o no sales fundentes. Con el empleo de las sales fundentes se obtiene un mayor grado de recuperación del aluminio, puesto que se disminuye el grado de oxidación del metal (De la Torre, Guevara y Yépez, 2009, p. 38).

El reciclaje del aluminio es económicamente importante, puesto que, el 25 % de las necesidades totales están cubiertas por las aleaciones secundarias que se obtienen a partir de estos materiales reciclados. Las características químicas del aluminio no se ven afectadas por el proceso de reciclado. Este proceso se puede repetir indefinidamente y los objetos de aluminio se pueden fabricar totalmente con material reciclado (Coca, 2004, p. 18).

En la Figura 1.3 se muestra el diagrama del proceso de la producción de aluminio secundario o de segunda fusión.

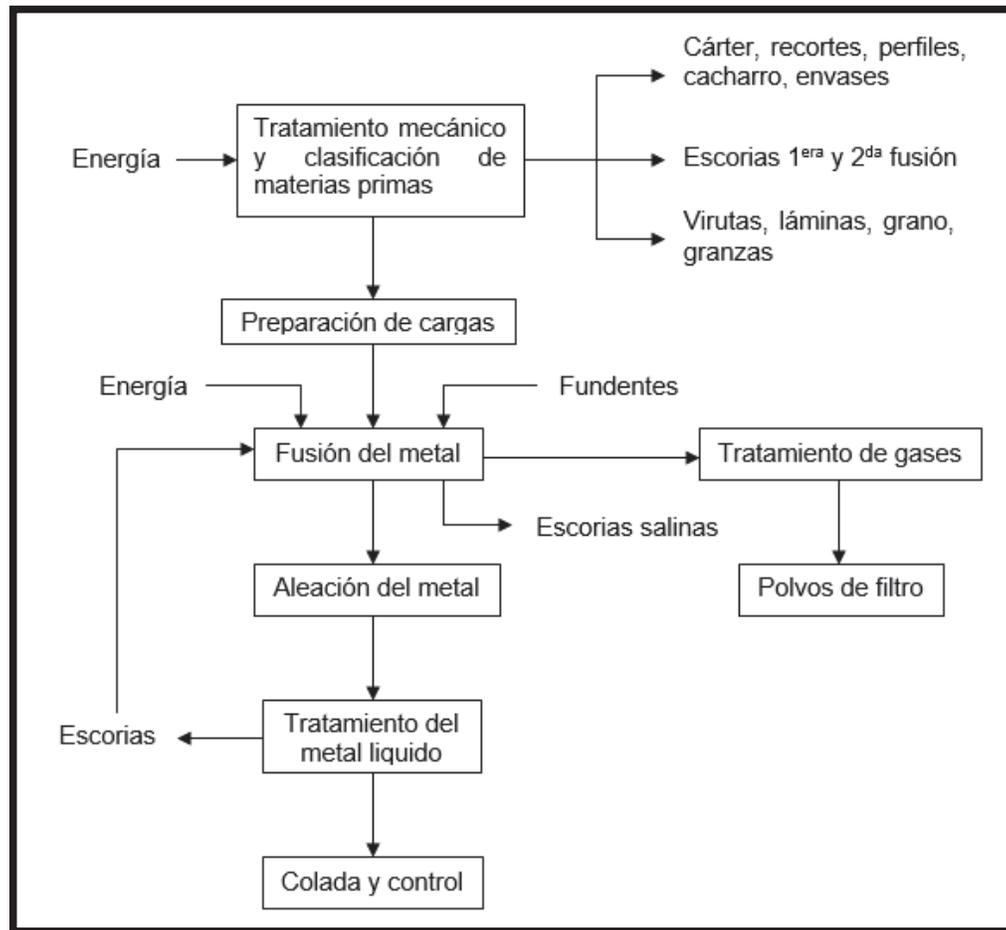


Figura 1.3. Diagrama de flujo del proceso de la producción de aluminio secundario o de segunda fusión (Gonzalo, 2008, p. 5)

1.2.4 ALEACIONES DE ALUMINIO

Las aleaciones de aluminio ocupan el segundo lugar en los materiales que se utilizan con fines estructurales. Las combinaciones de aluminio con diferentes elementos, hacen de éste un material versátil, económico y atractivo para varias aplicaciones. (Coca, 2004, p. 35).

Puesto que, el aluminio puro presenta una baja resistencia a la tracción y poca dureza, al unirlo con cobre, magnesio, manganeso, silicio, zinc y pequeñas cantidades de cromo, hierro, níquel, estaño y titanio, aumentan las características mecánicas del mismo (DeGarmo, Blank y Kohser, 2002, p. 223).

Se señalan las ventajas de cada elemento.

- Cobre: las propiedades mecánicas aumentan, sin embargo, se reduce la resistencia a la corrosión, aleación tratable térmicamente (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 159).
- Magnesio: mayor resistencia a la corrosión, aumento de dureza y solubilidad (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 159).
- Manganeso: reduce la resistencia ante el desgaste, no altera la resistencia a la corrosión, aumenta la sensibilidad al agrietamiento de las aleaciones tratables térmicamente (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 159).
- Silicio: mejora la fluidez y la resistencia al agrietamiento en caliente. Combinado con el magnesio, aumenta la resistencia mecánica. Disminuye la densidad y el coeficiente de expansión térmica, aumenta la resistencia a la corrosión (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 159).
- Zinc: reduce la resistencia a la corrosión sin alterar sus propiedades mecánicas (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 159)
- Cromo: al combinar este elemento con aluminio conjuntamente con cobre, magnesio y manganeso, aumenta la resistencia mecánica de la aleación. (Kalpakjian y Schmid, 2002, pp. 159-160).
- Hierro: incrementa las resistencias: mecánica, al agrietamiento y a la fluencia. Un alto contenido del hierro, disminuye notablemente la ductilidad. (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 160).
- Níquel: combinado con cobre, mejora las propiedades a altas temperaturas y se reduce el coeficiente de expansión térmica. (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 160).

- Estaño: mejora las características antifricción (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 160).
- Titanio: aumenta la resistencia mecánica, reduce la tendencia al agrietamiento (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 160)

Nomenclatura:

Se agrupan por un sistema de 4 dígitos, el primer índice indica el aleante mayoritario (Ibars, 2007, p.10). En la Tabla 1.4 se presenta el sistema utilizado para identificar a las aleaciones del aluminio en función del elemento aleante.

Tabla 1.4. Identificación de las aleaciones de aluminio

Aleaciones de forja		Aleaciones de moldeo	
Aleación	Composición	Aleación	Composición
1XXX	Aluminio al 99 % de pureza	1XXX.0	99,0 % Aluminio
2XXX	Cobre	2XXX.0	Cobre
3XXX	Manganeso	3XXX.0	Silicio-cobre o magnesio
4XXX	Silicio	4XXX.0	Silicio
5XXX	Magnesio	5XXX.0	Magnesio
6XXX	Magnesio y silicio	7XXX.0	Zinc
7XXX	Zinc	8XXX.0	Estaño
8XXX	Otros elementos	9XXX.0	Otros elementos

(de Santis, 2015, p. 39)

Para identificar a las aleaciones de moldeo se añade un código el cual identifica el tratamiento que se puede efectuar a estas aleaciones entre los que se encuentran (de Santis, 2015, p. 39)

F: sin tratamientos agregados

O: analizado

H: endurecido mecánico

W: solubilización

T: templado

Los siguientes índices, representan otros aleantes minoritarios. En la Figura 1.4 se presenta un ejemplo de la nomenclatura de una aleación de aluminio y el significado de cada dígito.

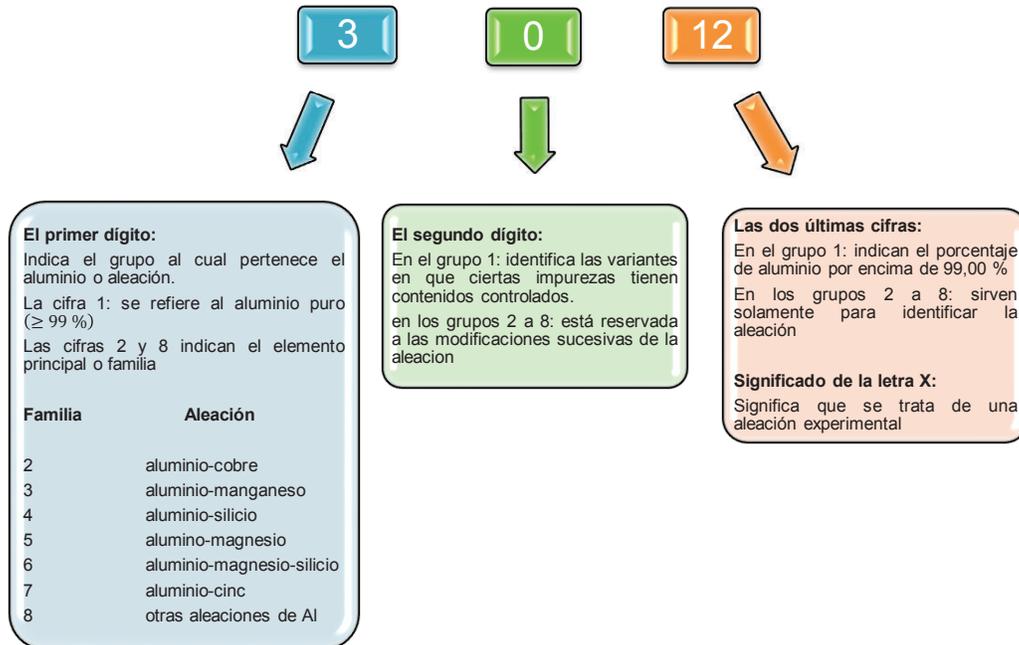


Figura 1.4. Ejemplo de la nomenclatura de las aleaciones de aluminio y significado de cada dígito (Ibars, 2007, p. 10)

El aluminio se puede clasificar según el modelo de transformación de las aleaciones en: aleaciones de moldeo y aleaciones de forja (Morral, Jimeno y Molera, 2004, p. 1217).

1.2.4.1 Aleaciones de moldeo:

Se las utiliza de forma líquida, para la fabricación de piezas de formas más o menos complejas por ejemplo picaportes, bloques, etc (Giachino y Weeks, 2007, p. 156).

A diferencia del aluminio puro que solidifica bruscamente a una temperatura dada,

las aleaciones de moldeo solidifican en un rango de temperatura considerable, éstas pasan por un estado pastoso en el cual los cristales de aluminio puro se mezclan con aleación líquida. Giachino y Weeks, 2007, p. 157).

Las aleaciones más comunes para el moldeo están constituidas de aluminio-silicio y aluminio-silicio-cobre. (Rodríguez, Castro y del Real, 2012, p. 28). Se pueden añadir otros elementos como cinc, magnesio, etc, para facilitar la fabricación de pieza (llenado de moldes y fundición) (García, Navarro y Águeda, 2005, p. 58).

1.2.4.2 Aleaciones de forja:

Se utiliza en la construcción mecánica en forma de placas, que normalmente son ensamblados por soldadura, atornillados, doblados, etc, soportan elevadas deformaciones plásticas. Sus propiedades pueden ser modificadas mediante tratamientos térmicos. (Barros, Gil y Camacho, 2010, pp. 466-468).

Las aleaciones de aluminio forjado se dividen en dos grupos: aleaciones de forja no tratables térmicamente y aleaciones de forja tratables térmicamente (Barros, Gil y Camacho, 2010, pp. 466-468).

- **Aleaciones de forja no tratables térmicamente:**

No pueden ser endurecidas por precipitación, para aumentar su resistencia únicamente se las trabaja en frío. Según la norma AISI-SAE, existen tres grupos principales (Barros e Ibáñez, 2014, pp. 276-285):

Aleación 1xxx:

Este tipo de aleación está constituida por 99 % de aluminio, por lo que es considerado como aluminio técnicamente puro, el silicio es el elemento aleante y la principal impureza es el hierro. Se caracteriza por su alta conductividad térmica y eléctrica, bajas propiedades mecánicas, excelente resistencia a la corrosión y excelente trabajabilidad (Barros e Ibáñez, 2014, pp. 276-278).

Aleación 3xxx:

Aleación constituida por 98,8 % de aluminio, el manganeso es el elemento aleante principal, está presente en un 1,2 %. Tienen un 20 % más de resistencia que las aleaciones 1xxx. Se caracteriza por: buena resistencia mecánica, alta resistencia a la corrosión, buena maleabilidad (Barros e Ibáñez, 2014, pp. 278-280).

Aleación 4xxx:

Está constituida por 88 % de aluminio, el principal elemento aleante es el silicio, que se puede añadir hasta un 12 %. Este tipo de aleaciones presentan un punto de fusión bajo sin que se produzca fragilidad (Barros e Ibáñez, 2014, pp. 280-282).

Aleación 5xxx:

Este tipo de aleación está constituida por 95 al 98 % de aluminio, el aleante principal es el magnesio cuya composición varía del 2 al 5 %. Tiene buenas características de soldadura y buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos (Barros e Ibáñez, 2014, pp. 283-285).

- **Aleaciones de forja tratables térmicamente:**

Se utilizan tratamientos térmicos para endurecerlas por precipitación. Al ser tratadas con altas temperaturas, alcanzan mayores valores de resistencia y dureza (García, Navarro, Gómez, Gracia y Águeda, 2010 p. 35). Existen tres grupos principales:

Aleación 2xxx:

El cobre es el principal componente aleante, también contiene magnesio en pocas cantidades. Este tipo de aleaciones requieren de tratamientos térmicos para obtener propiedades óptimas principalmente en el aumento de la tensión de

fluencia. No presentan una buena resistencia a la corrosión. (Barros e Ibáñez, 2014, pp. 285-287).

Aleación 6xxx:

Dentro de este grupo de aleaciones, los principales elementos aleantes son magnesio y silicio. Dentro de las características principales de este tipo de aleaciones están: resistencia a la corrosión, maleabilidad y soldabilidad (Barros e Ibáñez, 2014, pp. 287-288).

Aleaciones 7xxx:

Los principales componentes aleantes son: zinc (en cantidades de 1 a 8 %) y magnesio (en menor porcentaje). Por lo general, para mejorar las propiedades de estas aleaciones, se puede añadir pequeñas cantidades de otros elementos como: cobre, cromo y escandio (Barros e Ibáñez, 2014, pp. 288-289).

1.3 MECANISMO DE CORROSIÓN DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

La corrosión del aluminio es de tipo localizada, con formación de diversas picaduras separadas entre sí por grandes áreas de material sin atacar. Las picaduras están recubiertas de alúmina blanca ($\text{Al}(\text{OH})_3$) gelatinosa dándole un aspecto de ampollas muy voluminosas (Pancorbo, 2011, pp. 331, 336).

Otra de las causas de la corrosión localizada se debe a los puntos de contacto con los metales de distinta naturaleza en presencia de soluciones que contienen sales conductoras (agua de mar) (Pancorbo, 2011, pp. 336, 337).

La corrosión uniforme sobre superficies de aluminio es rara, excepto en ambientes corrosivos especiales (altamente ácidos o alcalinos). Sin embargo, la corrosión puede ir desde un ataque superficial hasta una rápida dilución, esto se ve influenciado por la solubilidad de la película de óxido, ya que, dependiendo de

los iones presentes en el medio corrosivo, de su concentración y de la temperatura, el resultado es un aumento en la velocidad de ataque (Pancorbo, 2011, p. 338)

Para evaluar el ataque corrosivo uniforme se realiza una medición de la pérdida de peso o de grosor de la pieza metálica tratada. (Pancorbo, 2011, p. 338).

La corrosión localizada se presenta en entornos en los cuales la película de óxido es débil y adopta una de las siguientes formas (Pancorbo, 2011, p. 339):

- Corrosión por picadura.
- Corrosión de hendiduras, se incluye la corrosión de tinción y de cataplasma.
- Corrosión filiforme.
- Corrosión galvánica, se incluye la corrosión por deposición y por corrientes pérdidas.
- Corrosión intergranular.
- Corrosión por exfoliación.
- Corrosión biológica, generalmente es causada o acelerada por la presencia de picaduras o grietas.

La corrosión localizada tiene un mecanismo electroquímico y es causada por una diferencia en el potencial. Esta diferencia de potencial puede ser generada por las siguientes razones (Pancorbo, 2011, pp. 340, 341):

- Presencia de microconstituyentes catódicos que pueden ser compuestos intermetálicos insolubles o elementos únicos. Más comunes son: aluminio de cobre (CuAl_2), aluminio de hierro (FeAl_3) y silicio.
- Metales pesados en la superficie de la placa.
- Impurezas como hierro o cobre que se encuentran incrustadas en la superficie de la placa (es la menos frecuente).

El único tipo de corrosión localizada que no tiene un mecanismo electroquímico es la corrosión por fricción, que es una forma de oxidación en seco. En casi todos los casos de corrosión localizada, el proceso es una reacción con agua como se indica en la Ecuación 1.1 (Pancorbo, 2011, p. 341)



El producto de corrosión es casi siempre trihidróxido de óxido de aluminio (bayerita). La corrosión localizada no suele ocurrir en agua extremadamente pura a temperatura ambiente, pero puede ocurrir en soluciones más conductoras debido a la presencia de iones tales como cloruro o sulfato. (Davis, 2000, pp. 31-33)

1.3.1 MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

La corrosión es un problema que no se puede eliminar por completo, pero se puede controlar utilizando métodos de protección adecuados, la aplicación de éstos depende de varios factores como: el ambiente corrosivo, el área o superficie a proteger, costo por fabricación, mantenimiento, etc. Por lo tanto cada caso es específico y no se puede dar soluciones generales (Bilurbina, Liesa e Iribarren, 2003, pp. 89-91).

Los métodos de protección tienen por objetivo evitar la corrosión o disminuir el deterioro de los materiales dentro de las industrias en general. Esta protección consiste en recubrir el material que se desea proteger con una película adherente de otro material que no se corroa. (Bilurbina, Liesa e Iribarren, 2003, pp. 91-92).

Para evitar la corrosión, otro de los métodos que se considera es el uso de metales de alta pureza, puesto que, éstos presentan mayor resistencia (Vielhaber, 2002, p. 116).

También se pueden añadir elementos aleantes para aumentar la resistencia a la corrosión. Otra opción es someter a las aleaciones a tratamientos térmicos

adecuados, con lo cual, se consiguen estructuras más homogéneas. (Bilurbina, Liesa e Iribarren, 2003, pp. 93-95).

En la Figura 1.5, se muestran los métodos de protección superficial utilizados en metales.

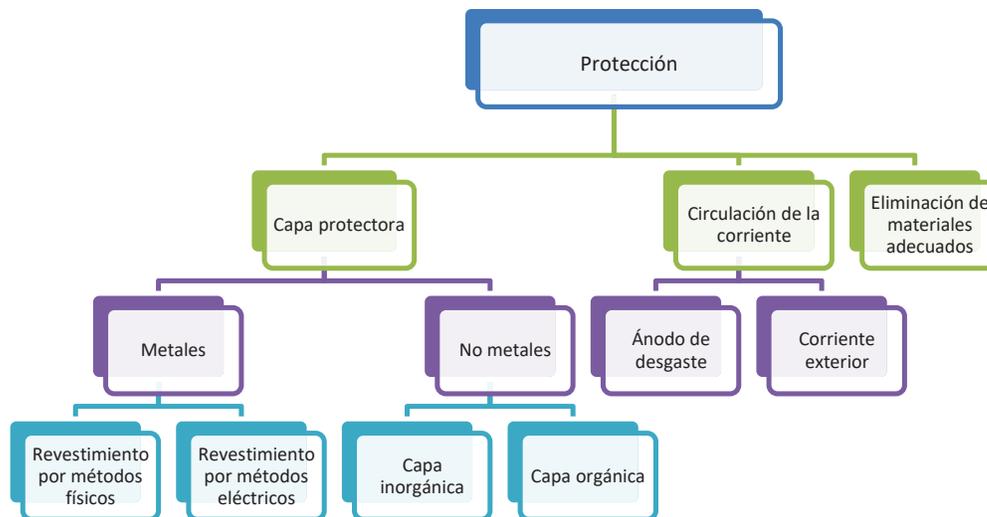


Figura 1.5. Métodos de protección contra la corrosión en metales
(Ghali, 2010, p. 185)

1.3.2 PROTECCIÓN POR RECUBRIMIENTOS

Actúan como barrera protectora entre el metal y el agente corrosivo (Ghali, 2010, p. 185)

1.3.2.1 Recubrimientos orgánicos

Pinturas:

Son los más utilizados, protegen al metal de la corrosión atmosférica, previamente se debe realizar una limpieza de la superficie metálica y posteriormente aplicar la pintura, la cual se endurece hasta formar una película sólida y compacta. Adicionalmente aportan un mejor acabado estético a la pieza metálica (Pancorbo, 2011, pp. 384-386).

Lacas:

Son el resultado de la combinación de algunos materiales con ciertos óxidos metálicos, presentan características como: insolubles, coloreadas y muy estables. La mayoría contienen pigmentos que otorgan al recubrimiento orgánico las propiedades anticorrosivas necesarias (Pancorbo, 2011, pp. 386-389).

Resinas:

Son sustancias sólidas, solubles en aceites y alcohol. Generalmente son utilizadas para revestir suelos e impermeabilizar techos (Pancorbo, 2011, pp. 390-391).

1.3.2.2 Recubrimientos inorgánicos**Esmaltes:**

Son recubrimientos duros, compactos, y presentan alta resistencia química frente a un gran número de agentes corrosivos. Resisten a altas temperaturas y a la abrasión (Pancorbo, 2011, pp. 391-393)

1.3.2.3 Recubrimientos metálicos

Es uno de los métodos más utilizados, consiste en recubrir la pieza a proteger con una capa de metal protector. La elección del metal protector se la realiza en base al metal a proteger y del espesor de la capa que se desee obtener. La protección mediante recubrimientos metálicos es muy frecuente en el caso de materiales de hierro y de acero (Pancorbo, 2011, pp. 394-397).

1.3.2.4 Recubrimientos por películas pasivas

Se basa en la formación de una capa protectora sobre la superficie del metal, con lo cual se impide el paso de oxígeno y humedad, deteniendo así la corrosión del

metal. Muchos metales y aleaciones, como el aluminio, el cinc o los aceros inoxidable, basan su resistencia a la oxidación en la formación espontánea de capas protectoras de óxido. Otras veces, la capa se crea artificialmente; por ejemplo, el hierro se trata a veces, con ácido fosfórico para formar una capa protectora de fosfato y los aceros se recubren de cromatos (Pancorbo, 2011, pp. 398-400).

1.3.3 POLARIZACIÓN ELECTROQUÍMICA

1.3.3.1 Protección anódica

Mantienen el metal que están protegiendo en condición anódica pero con la tensión suficiente para que sea posible la pasivación del metal, por lo tanto, se reduce su velocidad de corrosión. (Cembrero, Ferrer, Pascual y Pérez, 2005, p. 76)

1.3.3.2 Detección catódica

Con una fuente exterior de tensión hacen más electronegativo el metal que protegen, teniendo en cuenta que la corrosión electroquímica es sólo factible en las zonas anódicas, y que éstas quedan eliminadas de la superficie, favorecida por dicho sistema de protección. Los ánodos más utilizados con los de cinc, magnesio, aluminio o aleaciones de magnesio (Cembrero, Ferrer, Pascual y Pérez, 2005, p. 78).

1.3.4 OTROS MÉTODOS DE PROTECCIÓN

1.3.4.1 Modificación del metal

Cuando se añaden elementos a un metal base con la finalidad de modificar sus propiedades físicas. (Ferrer, 2011, p. 102)

1.3.4.2 Modificación del medio

Generalmente, en los procesos de corrosión electroquímica intervienen: el agua (electrolito) y el oxígeno (reactivo catódico). La eliminación de uno de estos elementos, conlleva a la suspensión del proceso corrosivo. (Ferrer, 2011, p. 103).

Los procesos más utilizados son (Ferrer, 2011, p. 103).

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

1.3.4.3 Modificación del diseño

Como norma básica, se debe evitar el contacto directo entre metales de distintas características electroquímicas. Se puede evitar el proceso corrosivo con un diseño adecuado de equipo o estructura metálica (Ferrer, 2011, p. 104).

1.4 PROCESO DE ANODIZADO DEL ALUMINIO

1.4.1 TRATAMIENTO SUPERFICIAL

En general, desde el punto de vista de la adhesión, los metales presentan características particulares como: alta energía superficial, capas superficiales de óxido, adsorción de humedad y contaminación atmosférica. Rodríguez, Castro y del Real, 2012, p. 171).

Inicialmente la adhesión es adecuada, pero esta tiende a disminuir con el transcurso del tiempo, por este motivo se requiere de tratamientos superficiales que permitan aumentar la durabilidad de la superficie metálica frente a condiciones atmosféricas tales como: humedad, temperatura, corrosión salina, etc. (Rodríguez, Castro y del Real, 2012, p. 172).

La elección del tratamiento superficial de los metales depende de: naturaleza del metal, estado inicial de la superficie del metal, tipo de adhesivo, condiciones climáticas, criterios económicos. Los tratamientos superficiales comúnmente empleados en metales son: limpieza con disolvente, pulido mecánico, tratamientos químicos (Rodríguez, Castro y del Real, 2012, p. 173).

1.4.1.1 Pulido mecánico

Las planchas de aluminio que salen de la extrusora (proceso de fabricación), presentan marcas o rayas que se pueden eliminar con el pulido mecánico, con lo cual se obtiene una superficie más regular y se aumenta la superficie de contacto para una mejor adherencia. (Molera, 200, p. 59)

Para conseguir un grado de pulido determinado, se utiliza abrasivos de diferente granulometría, de esta manera los abrasivos de granulometría inferior eliminan las rayas dejadas por los abrasivos de granulometría superior. De forma general, los abrasivos están constituidos por partículas de carborundo (carburo de silicio), de alúmina, o de diamante (Marín, 2014, p. 5).

1.4.1.2 Desengrase químico

Se utilizan disolventes orgánicos clorados, soluciones acuosas alcalinas, detergentes, etc. Estas sustancias eliminan polvo, grasas, barnices y pintura (Marín, 2014, p. 4).

La solución para la limpieza se aplica suavemente (inmersión) o compresión mediante un equipo de presión (aspersión), luego de este proceso se realiza un lavado de la pieza con agua natural y secado al aire (Marín, 2014, p. 5).

La elección del procedimiento a emplear depende del estado y del tamaño de la pieza, por ejemplo para piezas que no presenten ningún tipo de óxido y están ligeramente engrasadas, será suficiente un desengrase ligero o un desengrase alcalino suave (Marín, 2014, p. 5).

1.4.1.3 Decapado

Se trata de un método de limpieza que permite eliminar la capa de óxido de la superficie metálica para conseguir una mejor adherencia del recubrimiento. Generalmente se emplean soluciones ácidas o básicas, siendo las más comunes los ácidos: sulfúrico, clorhídrico y fosfórico, y la base más empleada el hidróxido de sodio (Cortés, 2007, pp. 512-513).

1.4.1.4 Neutralizado

Después del proceso de decapado, la superficie del metal se cubre por una capa de color gris debido a las impurezas o a la presencia de metales como: silicio, magnesio, hierro, cobre, etc. Esta capa se remueve con una solución diluida de ácido nítrico. Posteriormente se lava con agua para eliminar los residuos de ácido. (Cortés, 2007, p. 513).

1.4.2 ANODIZADO

La oxidación anódica o anodizado, es un proceso electrolítico destinado a producir aceleradamente capas de óxido de mayor espesor, uniformidad, estabilidad y diferente estructura de las que se formarían espontáneamente en la superficie del aluminio. (Cortés, 2007, p. 514).

En la Figura 1.6 se muestra el esquema del proceso de anodizado de aluminio el cual se realiza en una celda electrolítica con dos electrodos de aluminio conectados a una fuente de corriente continua. (Vergara, 2010, p.12)

El voltímetro y el amperímetro están conectados a los electrodos en serie y en paralelo respectivamente. Generalmente se utiliza como electrolito ácido sulfúrico en concentración de 12-25 % en peso. Se pueden utilizar otros electrolitos como: ácido crómico, ácido fosfórico, ácido oxálico, ácido bórico, citratos (Vergara, 2010, p.12).

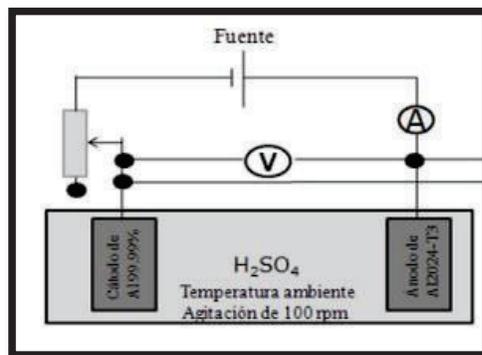
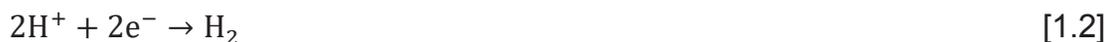


Figura 1.6. Celda electrolítica utilizada en el proceso de anodizado de aluminio (Vergara, 2010, p. 12)

Las reacciones que se producen en la superficie de los electrodos se indican en las Ecuaciones 1.2 y 1.3 (Ferrer y Amigó, 2003, p. 520).

Cátodo:



Ánodo:



Como se puede observar en la Ecuación 1.3, en el ánodo se forma el óxido de aluminio Al_2O_3 , cuyo espesor depende de las condiciones de operación como: temperatura, concentración del electrolito y densidad de corriente (Ferrer y Amigó, 2003, p. 520).

1.4.2.1 Anodizado en medio crómico

- **Procedimiento Bengough y Stuart**

El proceso consiste en sumergir la pieza de aluminio en un baño de ácido crómico de concentración 2 al 5 % en peso. Para piezas laminadas y forjadas, la temperatura es de 40 °C y para piezas moldeadas la temperatura es de 30 °C. La

intensidad de corriente es del orden de 0,3 a 0,4 A/dm², ésta debe aplicarse según el “*ciclo Bengough*”. El proceso dura 40 minutos con un voltaje de 40 V que se suministra de la siguiente forma: el voltaje se aumenta progresivamente durante 10 minutos, luego, durante 20 minutos se mantiene el voltaje en 40 V y finalmente 10 minutos de elevación hasta 50 V. (Ghali, 2010, p. 86)

Se debe tener en cuenta que la concentración de ácido crómico disponible, en el baño, sea de 3 % en peso, cuando el contenido de ácido crómico llega al 10 % en peso, el baño debe sustituirse total o parcialmente (Henley, 2013, p. 67)

Las capas anódicas que se obtienen son opacas y de color gris, gris claro para el aluminio puro, gris muy oscuro para las aleaciones ricas en silicio. Estas capas son menos porosas y más delgadas que las obtenidas en baños sulfúricos; su espesor varía entre 2 a 5 µm, son más flexibles. Su resistencia química parece ser, con espesor igual, superior a la de las capas obtenidas en medio de ácido sulfúrico. (Henley, 2013, p. 67)

- **Procedimiento con voltaje constante**

Este proceso fue implementado por Buzzard del Bureau of Standards de los Estados Unidos, consiste en un baño electrolítico con un contenido de 5 al 10 % en peso de ácido crómico, se aplica un voltaje constante de 40 V lo que permite reducir la duración del tratamiento. Las capas que se obtienen son opacas, sus características se asemejan a la de las capas anódicas en medio crómico de Bengough, presentan menor resistencia a la abrasión. (Barros, 2014, p. 109).

- **Procedimiento BF4**

El proceso se realiza en un baño de ácido crómico con la adición de ácidos bórico y oxálico. Las capas tienen un color blanco grisáceo y pueden ser coloreadas. Este proceso se basa en la aplicación de un voltaje constante de 40 V con una temperatura de 40 °C por 40 minutos (Totten y Scott, 2003, pp. 499-501).

1.4.3 FACTORES QUE AFECTAN LAS PROPIEDADES Y NATURALEZA DE LA CAPA DE ÓXIDO DE ALUMINIO

1.4.3.1 Influencia del metal base

Cuando el metal base es el aluminio al 99,99 % y ciertas aleaciones obtenidas a partir de él, puede anodizarse sin alterar la superficie metálica, el resultado es una película de óxido de aluminio homogénea y transparente. Si el contenido de aluminio es del 99,7 % al 99,8 % los aleantes afectarán la homogeneidad y transparencia del óxido de aluminio (Henley, 2013, p. 82).

1.4.3.2 Influencia del electrolito

En el ánodo, además de la reacción principal de separación de oxígeno, se producen reacciones secundarias, en las que, el electrolito reacciona con las impurezas y los constituyentes que forman parte del ánodo, produciendo recubrimientos de distintas características como: homogeneidad, transparencia y coloración (Henley, 2013, p. 83).

1.4.3.3 Influencia de las condiciones de operación

Al utilizar el mismo electrolito, cualquier cambio en los parámetros del proceso de anodizado, afecta la actividad del electrolito sobre el ánodo, por lo cual se modificarán las características del recubrimiento (Henley, 2013, p. 84).

1.4.3.4 Temperatura del electrolito

La conductividad del electrolito aumenta con el incremento de temperatura, también se produce una disminución del voltaje necesario para mantener la densidad de corriente determinada. (Henley, 2013, p. 85).

2 PARTE EXPERIMENTAL

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar las condiciones de operación de un proceso de limpieza superficial de placas de aluminio 1100, para lo cual se deben determinar las condiciones de operación, de los procesos de decapado y anodizado, que permitan aumentar la adherencia del esmalte porcelánico.

En la Figura 2.1 se presenta un diagrama de flujo del proceso de limpieza de superficies de aluminio utilizado a escala industrial.

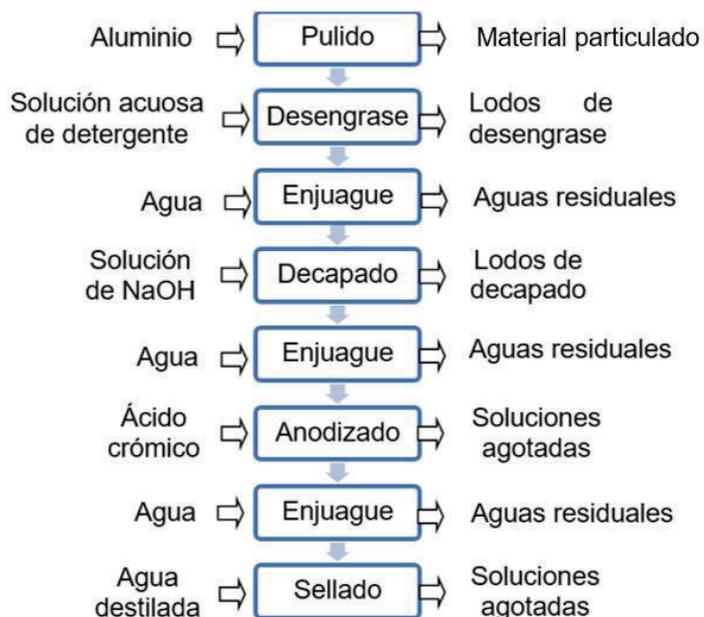


Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso del tratamiento superficial del aluminio por anodizado

El proceso experimental se inició con una limpieza mecánica superficial, que consistió en un pulido con lija de agua # 200, luego se realizó el desengrase con una solución de concentración 3 % de tensoactivos aniónicos (detergente común) y posteriormente se lavaron las placas con agua destilada.

A escala industrial el decapado de aluminio se realiza introduciendo las láminas en una solución de hidróxido de sodio de concentración 10 – 15 %, a una

temperatura de 50 – 60 °C durante un tiempo de 2 – 5 min (Estrada y Jiménez, 2010, p. 124).

Se prepararon 3 baños de decapado, con concentraciones de hidróxido de sodio de: 10,0; 12,5 y 15,0 %, se mantuvo la temperatura en 50 °C y el tiempo fue de 2 minutos.

El proceso de decapado se evaluó a través de la determinación de la retención del esmalte, para lo cual se aplicó el método descrito en la ficha técnica del Laboratorio de Producción de Vidrio de la EPN. Dicho ensayo consistió en frotar la superficie de la placa esmaltada, aplicando fricción con un cilindro de acero en cuyo extremo había una lija # 200. Se determinó la cantidad de esmalte que quedó adherido a la placa por diferencia de pesos.

Para evaluar el efecto de la temperatura, se realizaron dos baños de decapado, en los cuales los valores de temperatura fueron de 50 y 60 °C, el tiempo fue de 2 minutos y se utilizó la concentración de hidróxido de sodio con la cual se obtuvo mayor adherencia del esmalte. La evaluación se realizó a través de la retención del esmalte por medio del ensayo de fricción descrito en el párrafo anterior.

Finalmente para evaluar el efecto del tiempo, se realizaron dos baños de decapado, las duraciones fueron de: 2 y 5 minutos, se emplearon las condiciones de concentración de hidróxido de sodio y de temperatura con las cuales se obtuvo mayor adherencia del esmalte, determinadas anteriormente. El resultado se evaluó de la misma forma que en los casos anteriores.

Con base en los mejores resultados obtenidos en la evaluación de la adherencia del esmalte en función de la concentración del hidróxido de sodio, temperatura y tiempo de decapado, se realizó el anodizado de las placas de aluminio.

La composición química para el proceso de anodizado fue la siguiente: ácido crómico de 3,0 – 10,0 %. Las condiciones del baño fueron: temperatura de 35 °C, tiempo entre 35 – 39 minutos, voltaje 40 V, densidad de corriente 0,3 A/dm²

(Canales, 2009, p. 27). Una vez finalizado el proceso se lavaron las piezas con agua destilada.

Para evaluar la adherencia del esmalte en función de la concentración del ácido crómico, se prepararon tres baños, en los cuales se utilizaron concentraciones de: 3,0; 7,5 y 10,0 %, para los tres baños el tiempo fue de 35 minutos.

Se trataron las piezas previamente decapadas dentro de una celda electrolítica constituida por: una disolución de ácido crómico, por la cual se hizo pasar una corriente entre el aluminio (ánodo) y el cátodo constituido por aluminio (Lizarbe, 2010, p. 462). La evaluación del proceso se realizó a través de la determinación de la cantidad de esmalte retenido por medio del ensayo de fricción.

Para determinar el tiempo de anodizado se realizó el proceso con la concentración de ácido crómico con la que se obtuvo mayor adherencia del esmalte, y los tiempos fueron de 35 y 39 minutos. Se realizó la misma evaluación que en el caso anterior.

Las placas decapadas y anodizadas fueron selladas, este proceso consistió en introducir las láminas en una solución de dicromato de potasio de concentración 52,5 g/L durante 20 minutos (Canales, 2009, p. 36). Una vez realizado el sellado se lavaron las placas con agua desmineralizada y finalmente se las secó.

Para realizar la evaluación de la adherencia del esmalte, se hicieron dos procesos. El primero consistió en esmaltar las piezas previamente limpias y decapadas. Para el segundo proceso, se esmaltaron las piezas previamente limpias, decapadas y anodizadas. El decapado y anodizado se realizaron bajo las condiciones de operación con las cuales se obtuvo mayor adherencia de esmalte porcelánico.

La determinación de la calidad del proceso de acondicionamiento de las láminas de aluminio, se realizó con base en la evaluación del grado de adherencia que se

logró entre la superficie de aluminio y el esmalte. Las pruebas se efectuaron a través del impactómetro cuyo esquema se presenta en la Figura 2.6.

2.1 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA, DEL TIEMPO Y DE LA CONCENTRACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO EN EL PROCESO DE DECAPADO DEL ALUMINIO 1100

2.1.1 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO EN EL PROCESO DE DECAPADO DEL ALUMINIO 1100

A través del diseño experimental unifactorial (al azar) se estudió el efecto de la concentración de hidróxido de sodio sobre la adherencia del esmalte. Se realizaron 4 repeticiones de cada ensayo. Los resultados fueron analizados mediante el programa STATGRAPHICS con un 95 % de confianza.

2.1.1.1 Preparación de las materias primas

La preparación de las placas de aluminio 1100 con dimensiones de 3x3 cm se realizó con el proceso que se describe a continuación:

Se pulieron las superficies de las placas manualmente con una lija de agua #200 para eliminar la capa de óxido, hasta obtener una superficie homogénea y opaca evaluada de forma visual. Posteriormente se las lavó en un baño de concentración 3 % de tensoactivos aniónicos (detergente común). Luego las placas fueron enjuagadas en agua destilada y secadas con papel adsorbente. Se las guardó en fundas de plástico con cierre hermético para evitar la oxidación.

2.1.1.2 Decapado:

El decapado de las placas de aluminio se realizó de la siguiente manera: En los vasos de precipitación de 100 mL, se prepararon las soluciones de

hidróxido de sodio de concentraciones de 10,0; 12,5 y 15,0 %. Se colocaron las soluciones en una plancha de calentamiento hasta que alcanzaron la temperatura de 50 °C. Se introdujo una placa de aluminio en cada solución durante 2 minutos, tiempo en el cual la temperatura se mantuvo constante. Finalmente las placas fueron extraídas de los baños y se enjuagaron con agua destilada hasta eliminar toda la solución de hidróxido de sodio. Las placas fueron secadas con papel absorbente.

En la Tabla 2.1 se presentan las condiciones de los tres baños de decapado.

Tabla 2.1. Condiciones de operación del decapado con distintas concentraciones de hidróxido de sodio

Baño N°	Concentración de hidróxido de sodio (% p/p)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	10,0	50	2
2	12,5		
3	15,0		

2.1.1.3 Formulación del esmalte

- **Preparación y dosificación de las materias primas**

En la Tabla 2.2 se presentan las materias primas fuentes de los óxidos utilizados en la formulación del esmalte porcelánico. Adicionalmente se indica la composición porcentual y el peso de cada materia prima necesaria para preparar 40 g de esmalte.

La formulación y dosificación de las materias para la preparación de 40,0 g de esmalte se realizó con el procedimiento descrito a continuación:

En un mortero con la ayuda del pistilo se molieron cada una de las materias primas de forma manual. Tomando en cuenta que el carbonato de potasio absorbe humedad, se secó a una temperatura de 50 °C por un tiempo de 2 horas,

antes y después de la molienda. Con la ayuda de la espátula de acero y el pincel de cerda #12, se colocaron las materias primas en el tamiz de acero de 20 cm de ancho malla #200 ASTM (75 μm). Finalmente el producto obtenido se almacenó en las fundas con cierre hermético. Las materias primas CaCO_3 , NaF y zircosil no necesitaron molienda.

Con la espátula se colocó cada materia prima en un vidrio de reloj para pesar en una balanza analítica ADAM, la cantidad que se indica en la Tabla 2.2. Finalizado éste proceso las materias primas fueron mezcladas y el producto final (esmalte crudo) fue almacenado en un funda con cierre hermético.

Tabla 2.2. Materias primas fuentes de los óxidos formadores de esmalte y dosificación de las materias primas para la preparación del esmalte porcelánico

Materias primas	Fórmula	% p/p	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido bórico	H_3BO_3	6,77	3,90
Alúmina, 99 %	Al_2O_3	1,40	0,80
Bórax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	45,75	26,35
Carbonato de litio, 99 %	Li_2CO_3	0,93	0,54
Carbonato de calcio	CaCO_3	5,00	2,88
Carbonato de potasio	K_2CO_3	4,07	2,34
Carbonato de magnesio	MgCO_3	1,07	0,61
Cuarzo	SiO_2	29,62	17,06
Fluoruro de sodio	NaF	1,72	0,99
Zircosil	$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$	3,69	2,12

(Yáñez, 2014, p. 116)

- **Fusión de las materias primas y atronado del esmalte**

El atronado del esmalte se realizó con la siguiente metodología: Se colocó la mezcla de materias primas en el crisol de material refractario con perforación en la base, el mismo que, con la ayuda de unas pinzas, se introdujo en el horno para atronado de vidrio. En la parte inferior del horno se colocó un recipiente de cobre

con agua a la temperatura ambiente. Luego de 1 h y 25 minutos el esmalte fundido se recogió en el recipiente con agua. El esmalte obtenido se lavó con agua destilada hasta eliminar las impurezas visibles. Se secó durante 1 h a temperatura de 120 °C. Finalmente se molió en un mortero con pistilo y se lo tamizó a través del tamiz #200 ASTM (75 µm). En la Figura 2.2 se muestra un esquema del proceso de atronado del esmalte y el equipo utilizado.



Figura 2.2. Horno de atronado, formado por: 1.- Crisol de atronado; 2.- Cámara de atronado; 3.- Ventilador; 4.- Tubería de ingreso de la mezcla aire-gas; 5.- Recipiente de cobre; 6.- Tanque de gas

- **Aplicación del esmalte**

El método utilizado para aplicar el esmalte fue el siguiente:

Las placas de aluminio fueron colocadas sobre una hoja de papel bond. Se pesaron 0,7 g de esmalte porcelánico en una balanza analítica ADAM, este se colocó en el tamiz de malla #200 (75µm). Se cubrió, con el esmalte crudo en polvo, la superficie de la placa de aluminio con la ayuda del pincel de cerda #12 para obtener una superficie más uniforme como se indica en la Figura 2.3. Se colocaron las piezas sobre la superficie refractaria y se las introdujo dentro del horno programable. Se cocieron las pizas en un horno WISE THERM a través del ciclo de cocción que consistió en el calentamiento de la placa metálica desde la

temperatura ambiente hasta la temperatura de 300 °C durante 15 minutos. Luego se realizó la maduración que consistió en mantener la temperatura en 300 °C durante 5 minutos, inmediatamente se incrementó la temperatura hasta los 600 °C en un tiempo de 10 minutos. Posteriormente se efectuó el enfriamiento, para lo cual se mantuvo la temperatura de 600 °C durante 10 minutos y posteriormente se enfrió hasta 500 °C en un tiempo de 20 minutos con lo cual se concluyó el ciclo de cocción como se muestra en la Figura 2.4. Finalmente se apagó el horno para que las piezas se enfríen lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiente.



Figura 2.3. Aplicación de esmalte porcelánico por método de espolvoreo

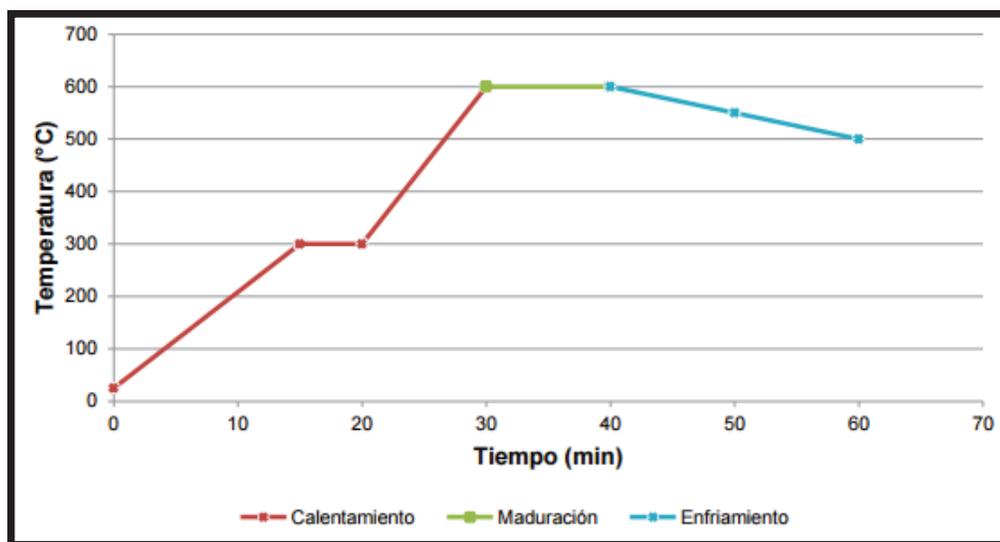


Figura 2.4. Ciclo de cocción del esmalte porcelánico (Yáñez, 2014, p. 28)

2.1.1.4 Determinación de la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio

Para determinar el espesor de la capa de esmalte se midió con el micrómetro el espesor de la placa antes del proceso de esmaltado y al final, por diferencia de estos valores se determinó el espesor de la capa de esmalte.

Se aplicó el proceso descrito en la ficha técnica del Laboratorio de Producción de Vidrio de la EPN bajo la norma ASTM B916-01 *Método de prueba estándar para adherencia de revestimientos de esmalte porcelánico en chapa metálica* (ASTM International, 2014a, p. 2).

Las placas de aluminio esmaltadas fueron pesadas en una balanza analítica METTLER. Se colocó la placa en el interior del soporte del equipo para ensayos de fricción. Se ajustó el cilindro al eje agitador y se puso en contacto con la superficie esmaltada como se indica en la Figura 2.5. Se encendió el motor del agitador y se colocó una fuerza de fricción en un área de 3,14 cm² durante 2 minutos a 60 rpm. Se removió el cilindro y el esmalte desprendido; se pesó la placa frotada. Se determinó la cantidad de esmalte que quedó adherida a la superficie de la placa de aluminio, por diferencia de pesos.

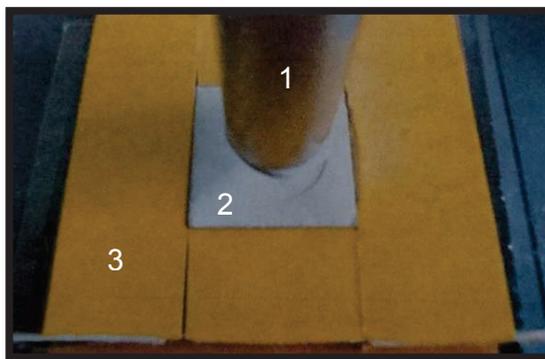


Figura 2.5. Equipo para ensayos de fricción, constituido por: **1.-** Cilindro giratorio; **2.-** Placa de aluminio de estudio; **3.-** Soporte para placas

Se determinó el porcentaje de adherencia del esmalte a partir de las Ecuaciones: 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 (Yáñez, 2014, p. 103)

$$P_{ei} = P_{(p+e)i} - P_p \quad [2.1]$$

$$P_{fe} = P_{(p+e)f} - P_p \quad [2.2]$$

$$P_{ed} = P_{ie} - P_{fe} \quad [2.3]$$

$$P_{ee} = \frac{A_e \times P_{ie}}{A_p} \quad [2.4]$$

$$\% \text{Desprendido} = \frac{P_{ed}}{P_{ee}} \times 100 \quad [2.5]$$

$$\% \text{Adherencia} = 100 - \% \text{Desprendido} \quad [2.6]$$

Donde:

P_p : Peso de la placa (g)

P_{ei} : Peso del esmalte adherido antes del ensayo de fricción (g)

P_{ef} : Peso del esmalte adherido después del ensayo de fricción (g)

$P_{(p+e)i}$: Peso de la placa con esmalte antes del ensayo de fricción (g)

$P_{(p+e)f}$: Peso de la placa con esmalte después del ensayo de fricción (g)

P_{ed} : Peso de esmalte desprendido del área de ensayo (g)

P_{ee} : Peso de esmalte adherido en el área de ensayo, antes de la fricción (g)

A_p : Área de la placa (cm²)

A_e : Área ensayada (cm²)

2.1.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE DECAPADO DEL ALUMINIO 1100

Por medio del diseño experimental unifactorial (al azar) se estudió el efecto de la temperatura sobre la adherencia del esmalte. Se realizaron 4 repeticiones de cada ensayo. Los resultados fueron analizados mediante el programa STATGRAPHICS con un 95 % de confianza.

2.1.2.1 Preparación de las materias primas

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.1

2.1.2.2 Decapado

Para determinar la temperatura del baño de decapado que permita obtener la mejor adherencia del esmalte porcelánico, se realizaron pruebas con temperaturas de 50 y 60 °C. En la Tabla 2.3 se presentan las condiciones de operación para cada baño de decapado. Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.2

Tabla 2.3. Condiciones de operación del decapado con distintas temperaturas

Baño N°	Temperatura (°C)	Concentración de hidróxido de sodio (% p/p)	Tiempo (min)
1	50	10,0	2
2	60		

2.1.2.3 Formulación del esmalte

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.3

2.1.2.4 Determinación de la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.4

2.1.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL TIEMPO EN EL PROCESO DE DECAPADO DEL ALUMINIO 1100

El estudio del efecto del tiempo sobre la adherencia del esmalte se realizó a través del diseño experimental unifactorial (al azar). Se realizaron 4 repeticiones de cada ensayo. Los resultados fueron analizados mediante el programa STATGRAPHICS con un 95 % de confianza.

2.1.3.1 Preparación de las materias primas

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.1

2.1.3.2 Decapado

Para establecer el tiempo en el cual deben mantenerse sumergidas las placas en el baño de decapado y obtener la mejor adherencia del esmalte porcelánico; se realizaron pruebas con tiempos de 2 y 5 minutos aplicadas al baño de decapado. Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1. En la Tabla 2.4 se muestran las condiciones de operación.

Tabla 2.4. Condiciones de operación del baño de decapado a diferentes tiempos

Baño N°	Tiempo (min)	Concentración del hidróxido de sodio (% p/p)	Temperatura (°C)
1	2	10	50
2	5		

2.1.3.3 Formulación del esmalte

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.3

2.1.3.4 Determinación de la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.4

2.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL TIEMPO Y LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO CRÓMICO EN EL PROCESO DE ANODIZADO DEL ALUMINIO 1100

2.2.1 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO CRÓMICO EN EL PROCESO DE ANODIZADO

Con un diseño un experimental unifactorial (al azar) se realizó estudió el efecto de la concentración del ácido crómico sobre la adherencia del esmalte. Se hicieron 4 repeticiones de cada ensayo. Los resultados fueron analizados mediante el

programa STATGRAPHICS con un 95 % de confianza.

2.2.1.1 Preparación de las materias primas

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.1

2.2.1.2 Anodizado

Antes del proceso de anodizado se realizó una limpieza mecánica de las placas de aluminio que consistió en un lijado manual de la placa hasta que se obtuvo una superficie homogénea y opaca. Luego se lavaron con agua y detergente, posteriormente se secaron con el papel adsorbente y se las guardó en fundas de plástico con cierre hermético para evitar la oxidación. Finalmente las placas fueron decapadas con las mejores condiciones que se evaluaron en la sección 2.1.1.

En la Tabla 2.5 se muestran las condiciones de operación del proceso de anodizado.

Tabla 2.5. Condiciones de operación del anodizado a diferentes concentraciones de ácido crómico

Baño N°	Concentración de ácido crómico (% p/p)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Voltaje (V)	Intensidad de corriente (A/dm ²)
1	3,0	35	35	40	0,3
2	7,5				
3	10,0				

Se colocaron las placas en una celda electrolítica constituida por una solución de ácido crómico, las condiciones de operación fueron: temperatura de 35 °C, densidad de corriente 0,4 A/dm², tiempo 35 minutos y voltaje 40 V. Posteriormente se lavaron las piezas con agua destilada.

2.2.1.3 Formulación del esmalte

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.3

2.2.1.4 Determinación de la adherencia del esmalte con la superficie metálica

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.4

2.2.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL TIEMPO EN EL PROCESO DE ANODIZADO

A través del diseño experimental unifactorial (al azar) se estudió el efecto del tiempo sobre la adherencia del esmalte. Se realizaron 4 repeticiones de cada ensayo. Los resultados fueron analizados mediante el programa STATGRAPHICS con un 95 % de confianza.

2.2.2.1 Preparación de las materias primas

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.1

2.2.2.2 Anodizado

Para determinar el tiempo de anodizado, se realizó el proceso con tiempos de 35 y 39 minutos. En la Tabla 2.6 se muestran las condiciones de operación para el baño de anodizado, la variable de operación fue el tiempo, la concentración del ácido crómico fue de 3,0 % en peso.

Se realizó la evaluación que se describe en la Sección 2.1.1.4 de este documento.

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.2.

Tabla 2.6. Condiciones de operación del baño de anodizado a diferentes tiempos

Baño N°	Tiempo (min)	Concentración de ácido crómico (% p/p)	Temperatura (°C)	Voltaje (V)	Intensidad de corriente (A/dm ²)
1	35	3,0	35	40	0,3
2	39				

2.2.2.3 Formulación del esmalte

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.3

2.2.2.4 Determinación de la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio

Se siguió el procedimiento que se indica en la sección 2.1.1.4

2.2.3 SELLADO

Se realizó el sellado de la superficie de las placas, con las mejores condiciones de anodizado previamente determinadas con el proceso que se describe a continuación:

Se introdujeron las láminas en una solución de dicromato de potasio a 52,5 g/L durante 20 minutos (Canales, 2009, p. 36). Una vez realizado el sellado se lavaron las placas con agua desmineralizada y finalmente se las secó.

2.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL DECAPADO Y DEL ANODIZADO SOBRE LA ADHERENCIA ENTRE EL ALUMINIO 1100 Y EL ESMALTE PORCELÁNICO

2.3.1 FORMULACIÓN DEL ESMALTE

Se realizó el procedimiento que se describe en la Sección 2.1.1.3 de este documento.

2.3.2 DETERMINACIÓN DE LA ADHERENCIA DEL ESMALTE

Para realizar la evaluación, se esmaltaron las placas que fueron únicamente decapadas bajo las mejores condiciones de operación y las placas que fueron sometidas a los procesos de decapado y anodizado bajo las mejores condiciones de operación determinadas anteriormente. Las pruebas se efectuaron a través de un método diseñado en el Laboratorio de Producción de Vidrio de la EPN (Mera, Vásquez, Bolaños y Oscullo, 2008, p. 91), siguiendo la norma ASTM E 23-16 *Métodos de prueba estándar para ensayos de impacto de barras con muesca de materiales metálicos* (ASTM International, 2014b, p. 2).

Para evaluar la adherencia entre el esmalte porcelánico y la placa de aluminio se realizaron dos pruebas, la primera sobre la placa previamente lijada, desengrasada y decapada. Y la segunda sobre la placa previamente lijada, desengrasada, decapada, anodizada y sellada. Los procesos de decapado y anodizado se realizaron con las mejores condiciones de operación determinadas en las secciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

Se colocó la placa esmaltada en la base del equipo. Se introdujo la esfera de acero de 68,6 g en el tubo guía a una altura de 0,5 m. Se dejó caer la esfera. Se evaluó la adherencia a través de los parámetros de la Norma ASTM E 23-16 *Métodos de prueba estándar para ensayos de impacto de barras con muesca de materiales metálicos* que se presenta en el Anexo IV. Se repitió este procedimiento para alturas de 1,0 y 1,5 m. Se realizó el mismo procedimiento con la esfera de 94,8 g. En la Figura 2.6 se presenta el esquema del equipo utilizado para realizar las pruebas de impacto.

La energía que se transmite a la placa esmaltada, en la prueba de resistencia al impacto, es igual a la energía potencial gravitacional que posee la esfera antes del impacto. Esta energía se determina con la Ecuación AV.1 (Yáñez, 2014, p. 104).

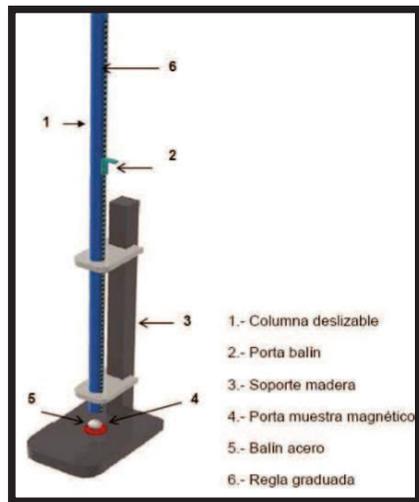


Figura 2.6. Impactómetro (Estévez, 2008, p. 62)

$$\text{Energía} = m \times g \times h$$

[2.7]

Donde:

m = masa de la esfera (kg)

g = aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$)

h = altura desde la cual se deja caer la esfera (m)

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

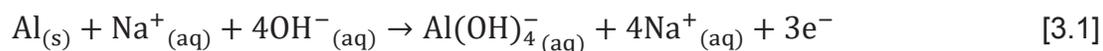
3.1 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO, DE LA TEMPERATURA Y DEL TIEMPO EN EL PROCESO DE DECAPADO DEL ALUMINIO 1100

3.1.1 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO EN EL PROCESO DE DECAPADO

En la Tabla 3.1 se presentan las imágenes fotográficas de las placas de aluminio decapadas bajo las condiciones de operación reportadas en la Tabla 2.1. También se incluye la imagen de la placa no procesada para evaluar la apariencia de las mismas antes y después de este proceso.

La muestra tratada con hidróxido de sodio al 15,0 % presentó una superficie totalmente manchada, en comparación con la placa procesada con hidróxido de sodio al 12,5 % en la cual las manchas se formaron en la esquina superior derecha como se indica en las fotografías de la Tabla 3.1.

Los defectos en el decapado se debieron a la composición química de la placa de aluminio 1100 utilizada para la investigación, al realizar éste proceso con hidróxido de sodio caliente y de concentraciones mayores al 10,0 %, el reactivo químico atacó al aluminio y a sus elementos aleantes que son: cobre, manganeso, cinc, silicio y hierro. La reacción química que se produce durante el decapado se muestra en la Ecuación 3.1



Como se muestra en la Ecuación 3.1 el tetrahidroxoaluminato ($\text{Al}(\text{OH})_4^-_{(aq)}$) que se forma en el baño, precipita como alúmina la cual: forma sarro, espesa el baño

y ensucia el perfil de aluminio. Se obtuvo como resultado una superficie áspera. Éste proceso se muestra en la Figura 3.1.

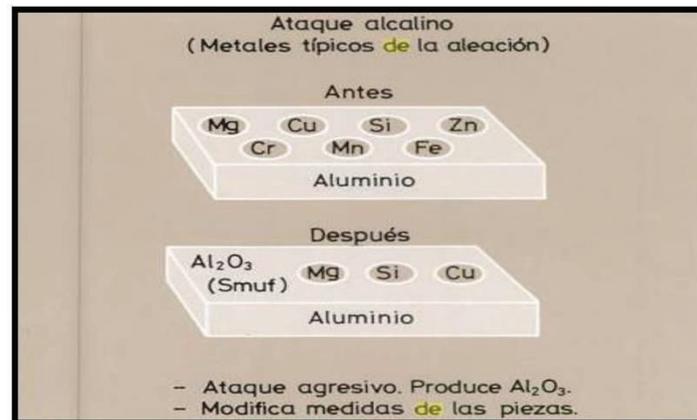


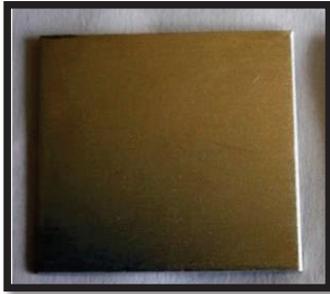
Figura 3.1. Decapado alcalino del aluminio
(Ortega, 1990, p. 73)

Otra de las causas de la presencia de manchas en las placas se debió a que la resistencia a la corrosión del aluminio disminuyó cuando la capa de óxido natural fue removida (en el proceso de lijado). Los contaminantes del ambiente (principalmente partículas de polvo) se adhirieron a la superficie metálica y las condiciones ambientales de humedad aceleraron el proceso de corrosión (Keijzer, 2004, p. 2)

La superficie decapada no resiste la exposición excesiva al medio ambiente, puesto que los contaminantes del ambiente aceleran el proceso de corrosión, es por esta razón que inmediatamente después del proceso de decapado se lavaron las placas con agua destilada y se las secó. Posteriormente se las guardó envueltas en papel absorbente y dentro de fundas con cierre hermético, se las mantuvo lejos de cualquier agente contaminante como se recomienda en la obra de Coca (2004) para el decapado de superficies de aluminio (p.723).

Los defectos superficiales de fabricación y almacenamiento, fueron menos notorios en la pieza después de ser decapada, sin embargo no se eliminaron totalmente durante éste proceso, el hecho se explica debido a que la capa de alúmina que se eliminó fue delgada. (Coca, 2004, p.723).

Tabla 3.1. Características de las placas de aluminio 1100 decapadas con diferentes concentraciones de hidróxido de sodio

Placa inicial	Concentración de hidróxido de sodio (%p/p)	Placas decapadas	Observaciones
	10,0		<ul style="list-style-type: none"> • Superficie mate sin brillo metálico • Aspecto blanco uniforme
	12,5		<ul style="list-style-type: none"> • Superficies manchadas • Sensación áspera al tacto • Color mate característico del aluminio expuesto al decapado
	15,0		

3.1.1.1 Determinación de la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio decapada con soluciones de hidróxido de sodio de concentraciones: 10,0; 12,5 y 15,0 %

Con los resultados del ensayo de fricción se determinó el porcentaje de adherencia entre la superficie metálica y el esmalte porcelánico. En la Tabla 3.2 se presentan los valores del porcentaje de adherencia que se obtuvieron luego de

realizar el proceso de decapado con distintas concentraciones de hidróxido de sodio. Para realizar los cálculos del porcentaje de adherencia se utilizaron las ecuaciones descritas en la sección 2.1.1.4 de éste documento.

Tabla 3.2. Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio decapado con diferentes concentraciones de hidróxido de sodio

Concentración de hidróxido de sodio (% p/p)	A_p (cm ²)	A_e (cm ²)	P_p (g)	$P_{(p+e)i}$ (g)	$P_{(p+e)f}$ (g)	P_{ei} (g)	P_{ef} (g)	P_c (A_e) (g)	P_{ed} (g)	Adherencia (%)
10,0	8,9856	3,1416	1,6006	2,3452	2,2595	0,7446	0,6589	0,2603	0,0857	67,07
	8,9654	3,1416	1,5984	2,3400	2,2542	0,7416	0,6557	0,2599	0,0858	66,97
	9,0050	3,1416	1,6390	2,3866	2,3008	0,7476	0,6618	0,2608	0,0858	67,10
	9,0030	3,1416	1,6388	2,3858	2,3000	0,7470	0,6612	0,2607	0,0858	67,08
12,5	8,9877	3,1416	1,6019	2,3335	2,2295	0,7317	0,6276	0,2557	0,1040	59,33
	8,9885	3,1416	1,6022	2,3335	2,2297	0,7313	0,6275	0,2556	0,1038	59,39
	9,0010	3,1416	1,6373	2,3709	2,2669	0,7336	0,6296	0,2561	0,1041	59,36
	9,0001	3,1416	1,6371	2,3701	2,2662	0,7330	0,6291	0,2559	0,1039	59,38
15,0	9,0035	3,1416	1,6380	2,3709	2,2507	0,7329	0,6128	0,2557	0,1201	53,02
	8,9956	3,1416	1,6046	2,3350	2,2151	0,7304	0,6104	0,2551	0,1200	52,97
	8,9976	3,1416	1,6091	2,3405	2,2206	0,7314	0,6115	0,2554	0,1199	53,05
	8,9987	3,1416	1,6081	2,3392	2,2193	0,7312	0,6113	0,2553	0,1199	53,03

Donde:

P_p : Peso de la placa (g)

P_{ei} : Peso del esmalte adherido antes del ensayo de fricción (g)

P_{ef} : Peso del esmalte adherido después del ensayo de fricción (g)

$P_{(p+e)i}$: Peso de la placa con esmalte antes del ensayo de fricción (g)

$P_{(p+e)f}$: Peso de la placa con esmalte después del ensayo de fricción (g)

P_{ed} : Peso de esmalte desprendido del área de ensayo (g)

P_{ee} : Peso de esmalte adherido en el área de ensayo, antes de la fricción (g)

A_p : Área de la placa (cm²)

A_e : Área ensayada (cm²)

Con el incremento de la concentración del hidróxido de sodio, la adherencia del esmalte porcelánico disminuyó. Esto se debe a la formación de tetrahidroaluminato ($Al(OH)_4^-$ (aq)) lo que produce el sarro en ciertas zonas de la placa. Las reacciones químicas entre el esmalte y el aluminio durante la cocción, no se producen por la presencia del sarro que es un contaminante. (Vielhaber, 2002, p. 115).

Dentro de las reacciones principales que producen en el proceso de cocción del esmalte se encuentran: la eliminación del agua higroscópica (humedad libre) y el agua ligada (moléculas ligadas dentro de la estructura cristalina) como se indica en la Figura 3.2, durante éste proceso se hincha la masa porcelánica y aumenta la porosidad. Después comienzan a fundir los nitratos y los fundentes según alcanzan su punto de fusión. Se forma anhídrido carbónico del carbonato sódico, óxido nítrico de los nitratos. Los fundentes en estado líquido reaccionan con las sustancias refractarias con la formación de silicatos, aluminatos y boratos. (Vielhaber, 2002, p. 62)

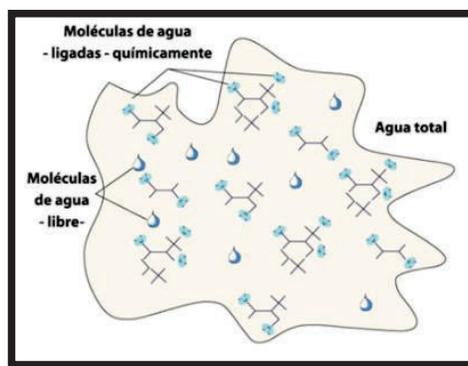


Figura 3.2. Representación del agua libre y ligada (Treybal, 1980, p. 182)

Los resultados de la cantidad de esmalte captado sobre las superficies de las placas decapadas con distintas concentraciones de hidróxido de sodio, se reportan en la Tabla 3.3. Un ejemplo de cálculo se presenta en el Anexo I.

Tabla 3.3. Captación de esmalte sobre placas decapadas con distintas concentraciones de hidróxido de sodio

Concentración de hidróxido de sodio (% p/p)	Área cubierta (cm ²)	Peso placa (g)	Peso esmalte (g)	Esmalte captado (g/dm ²)	Promedio de esmalte captado (g/dm ²)
10,0	1,2434	1,6006	0,6589	0,5299	0,5299 ± 0,0004
	1,2391	1,5984	0,6557	0,5292	
	1,2475	1,6390	0,6618	0,5305	
	1,2471	1,6388	0,6612	0,5302	

Tabla 3.3. Captación de esmalte sobre placas decapadas con distintas concentraciones de hidróxido de sodio (**continuación...**)

Concentración de hidróxido de sodio (% p/p)	Área cubierta (cm ²)	Peso placa (g)	Peso esmalte (g)	Esmalte captado (g/dm ²)	Promedio de esmalte captado (g/dm ²)
12,5	1,2439	1,6019	0,6276	0,5046	0,5046 ± 0,0002
	1,2440	1,6022	0,6275	0,5044	
	1,2467	1,6373	0,6296	0,5050	
	1,2465	1,6371	0,6291	0,5047	
15,0	1,2472	1,6380	0,6128	0,4913	0,4906 ± 0,0004
	1,2455	1,6046	0,6104	0,4901	
	1,2460	1,6091	0,6115	0,4908	
	1,2462	1,6081	0,6113	0,4905	

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados del espesor de la capa de esmalte que se obtuvo sobre las placas tratadas con distintas concentraciones de hidróxido de sodio en el baño de decapado. El ejemplo de cálculo está en el Anexo I.

Tabla 3.4. Espesor de la capa de esmalte sobre aluminio decapado a diferentes concentraciones de hidróxido de sodio

Concentración de hidróxido de sodio (% p/p)	Espesor de la placa (mm)	Espesor de la placa + esmalte (mm)	Espesor del esmalte (mm)	Espesor esmalte promedio (mm)
10,0	0,7112	0,7720	0,0608	0,0606 ± 0,0003
	0,7056	0,7661	0,0605	
	0,7102	0,7712	0,0610	
	0,7096	0,7699	0,0603	
12,5	0,7086	0,7679	0,0593	0,0594 ± 0,0003
	0,7102	0,7692	0,0590	
	0,7010	0,7608	0,0598	
	0,7093	0,7689	0,0596	
15,0	0,7005	0,7592	0,0587	0,0596 ± 0,0007
	0,7110	0,7703	0,0593	

Tabla 3.4. Espesor de la capa de esmalte sobre aluminio decapado a diferentes concentraciones de hidróxido de sodio (**continuación...**)

Concentración de hidróxido de sodio (% p/p)	Espesor de la placa (mm)	Espesor de la placa + esmalte (mm)	Espesor del esmalte (mm)	Espesor esmalte promedio (mm)
15,00	0,7103	0,7704	0,0601	0,0596 ± 0,0007
	0,7101	0,7706	0,0605	

Con los resultados del ensayo de fricción presentados en la Tabla 3.4, se determinó que la mayor captación de esmalte se obtuvo sobre la placa tratada con el baño de decapado al 10,0 % de hidróxido de sodio.

De la Tabla 3.4 se determinó que la placa con mayor espesor de la capa de esmalte fue la que se trató con la solución hidróxido de sodio al 10,0 % del baño de decapado.

A partir de los resultados que se presentan en la Tabla 3.3 se obtuvo la Figura 3.3 la cual indica la tendencia de la captación del esmalte pocalánico sobre la superficie metálica luego de ser decapada con distintas concentraciones de hidróxido de sodio.

En la Figura 3.4 se presenta la tendencia del espesor de la capa de esmalte, la cual fue realizada con los resultados que se reportan en la Tabla 3.4.

Conforme aumenta la concentración de hidróxido de sodio del baño de decapado la cantidad de esmalte que se retuvo en la superficie metálica luego del ensayo de fricción disminuye de forma lineal al igual que el espesor de la capa de esmalte, para un rango de concentraciones de hidróxido de sodio del 10,0 al 15,0 %, como se indican en las Figuras 3.3 y 3.4 respectivamente.

El efecto de la concentración de hidróxido de sodio sobre la captación de esmalte y su espesor es igual a $-7,9 \times 10^{-3}$ g/ dm² y $-6,0 \times 10^{-5}$ mm respectivamente en el rango de 10,0 % a 15,0 %.

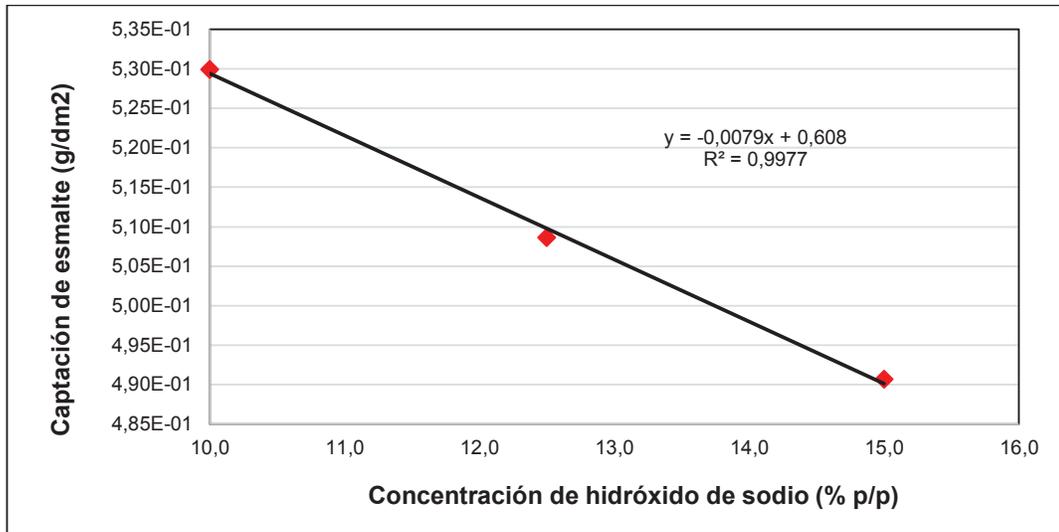


Figura 3.3. Captación de esmalte en función de la concentración de hidróxido de sodio del baño de decapado

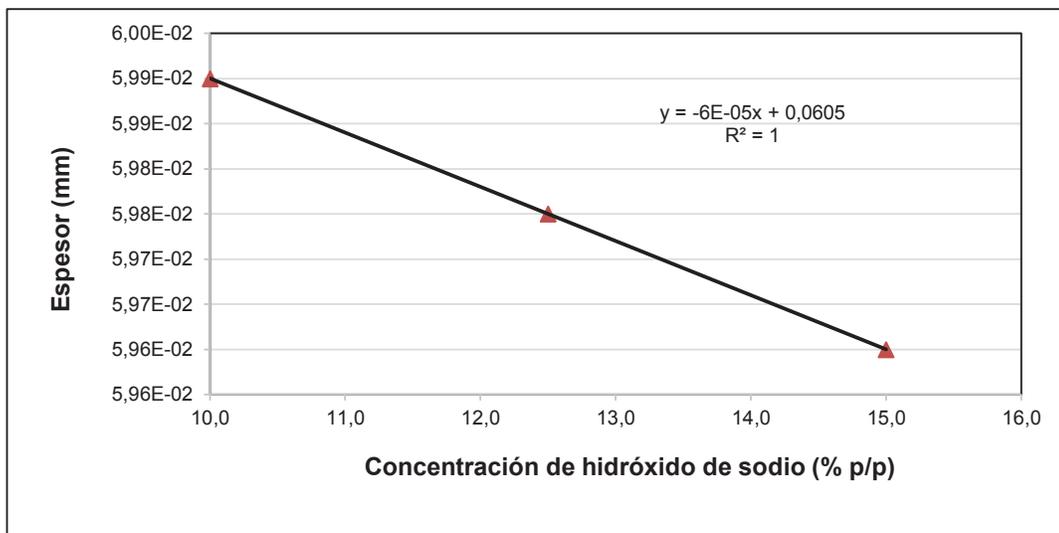
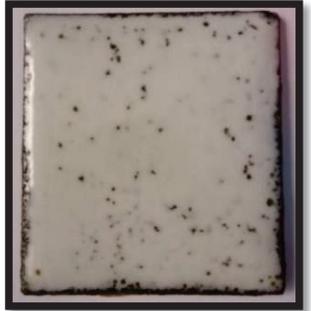


Figura 3.4. Espesor de la capa de esmalte en función de la concentración de hidróxido de sodio del baño de decapado

Estos resultados coinciden con lo que se expone en el trabajo realizado por Smith (2006), ya que durante el proceso de decapado se desprende hidrógeno de la solución decapante y éste se depositó en la superficie de la placa de aluminio de forma irregular por lo que la capa de óxido fue afectada y su porosidad disminuyó por lo tanto, no existió suficiente espacio para que el esmalte se adhiera (p. 67).

Se examinaron las propiedades de las placas esmaltadas tales como: aspecto de la superficie, defectos, porcentaje de adherencia y espesor. En la Tabla 3.5 se indican las características de las placas de aluminio esmaltadas.

Tabla 3.5. Características del esmalte aplicado sobre las placas decapadas con distintas concentraciones de hidróxido de sodio

Concentración de hidróxido de sodio (% p/p)	Características		Placa esmaltada
10,0	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación : Espesor:	Lisa No presenta fallas visibles $67,06 \pm 0,04 \%$ $0,5299 \pm 0,0004 \text{ g/dm}^2$ $0,0599 \pm 0,0003 \text{ mm}$	
12,5	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Parcialmente lisa Puntillado y puntos negros $59,37 \pm 0,02 \%$ $0,5046 \pm 0,0002 \text{ g/dm}^2$ $0,0594 \pm 0,0003 \text{ mm}$	
15,0	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Parcialmente lisa Puntillado y puntos negros $53,02 \pm 0,02 \%$ $0,4906 \pm 0,0004 \text{ g/dm}^2$ $0,0596 \pm 0,0007 \text{ mm}$	

Cuando el decapado se realizó con concentraciones de hidróxido de sodio superiores al 10 %, las placas presentaron defectos en la capa de esmalte. Esto,

se debió al desprendimiento de hidrógeno de la solución decapante y que a las condiciones del esmaltado se hayan producido procesos químicos de óxido reducción entre los componentes del esmalte y entre éstos y el aluminio.

Como se menciona en la obra de Smith (2006) el hidrógeno superficial fue absorbido por el metal y al ser sometido a procesos de acabado a alta temperatura, como el esmaltado, el metal liberó el gas hidrógeno y se formaron burbujas en la superficie del esmalte por lo que ésta presentó una apariencia no homogénea y con defectos (p. 67).

Las capas de esmalte en polvo que se aplicaron a las placas metálicas por medio de método de espolvoreo fueron heterogéneas lo que impidió que éstas tengan un proceso de cocción uniforme, puesto que el calor dentro del horno no se distribuye de igual manera en presencia de irregularidades superficiales, se obtuvo una superficie esmaltada no homogénea.

Los defectos de puntillado en los esmaltes se deben a la contaminación como: materia orgánica, carbonatos, óxido de hierro, por lo tanto, se debe tomar en cuenta que la mala limpieza mecánica o residuos del decapado ocasionan daños en el resultado final de la pieza esmaltada, es importante controlar los procesos de acondicionamiento superficial. (Franquesa y Mulero, 2010, p. 24-29).

En la Tabla 3.6 se presenta el análisis estadístico que descompone la varianza de Adherencia en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 114805, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos.

Tabla 3.6. Análisis de varianza para la adherencia del esmalte en función de la concentración de hidróxido de sodio

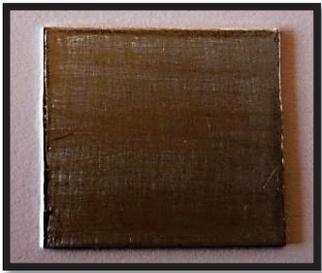
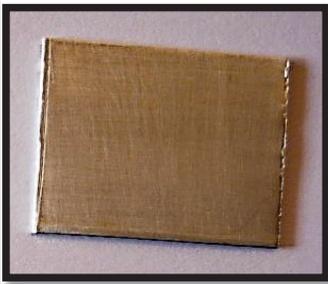
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	395,44	2	197,72	114 805,24	0,0000
Intra grupos	0,0155	9	0,00172222		
Total (Corr.)	395,456	11			

El valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, por lo tanto, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Adherencia entre un nivel de Concentración de hidróxido de sodio y otro como se indica en la Tabla 3.6.

3.1.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE DECAPADO

En la Tabla 3.7 se presentan las imágenes fotográficas de las placas de aluminio decapadas a las temperaturas que se indican en la Tabla 2.3 y la apariencia de las mismas antes y después del experimento. El proceso se realizó con la concentración de hidróxido de sodio determinada en la sección 3.1.1, que fue de 10,0 % con la cual se obtuvo los mejores resultados de adherencia del esmalte. El tiempo se mantuvo constante.

Tabla 3.7. Características de las placas de aluminio 1100 decapadas a distintas condiciones de temperatura

Placa inicial	Temperatura del baño de decapado (°C)	Después del decapado	Observaciones
	50		<ul style="list-style-type: none"> Superficie homogénea, brillante y limpia.
	60		<ul style="list-style-type: none"> Formación de machas que cubren toda la superficie metálica

La placa decapada a la temperatura de 60 °C presentó una superficie rugosa en

comparación con la placa decapada a una temperatura de 50 °C cuya superficie fue totalmente lisa. Con el aumento de la temperatura se acelera el proceso de decapado pero como resultado se obtiene una superficie más áspera. (Keijzer, 2004, p. 2).

Esto se debe a que al aumentar la temperatura del baño de hidróxido de sodio se incrementa la solubilidad del aluminio, como se indica en la Figura 3.5, con lo cual se da lugar a la formación del tetrahidroxoaluminato (Al(OH)_4^-) lo que produce el sarro y por lo tanto la superficie metálica se mancha y es irregular.

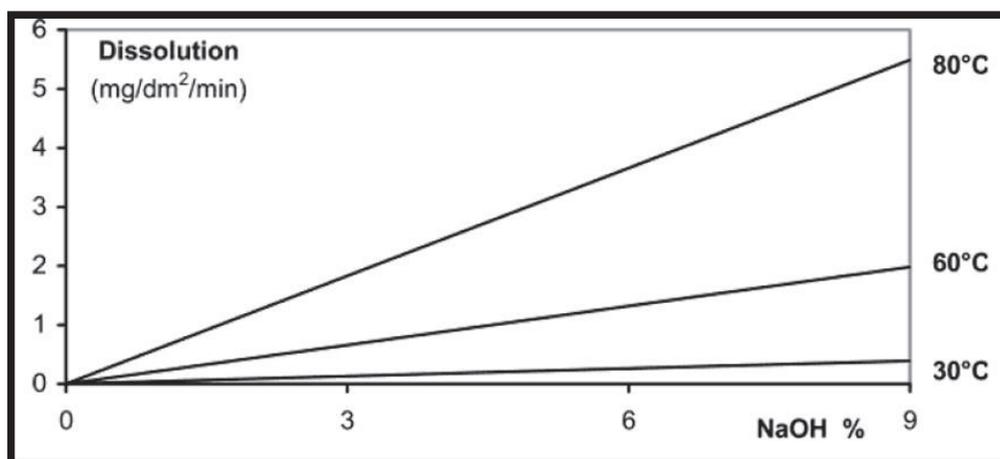


Figura 3.5. Solubilidad del aluminio en hidróxido de sodio a diferentes temperaturas (Stanga, 210, p. 51)

Para obtener una apariencia uniforme es importante controlar correctamente el proceso de decapado y las condiciones de operación como: la concentración de hidróxido de sodio, la temperatura de la solución y las impurezas que actúan como agentes secuestrantes que afectan el proceso (Coca, 2004, p.720).

3.1.2.1 Determinación de la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio decapada a las temperaturas de 50 y 60 °C

En la Tabla 3.8 se presentan los resultados del ensayo de fricción al cual fueron sometidas las placas de aluminio decapadas con distintas condiciones de temperatura para determinar el efecto sobre la adherencia del esmalte.

Tabla 3.8. Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio decapado con diferentes temperaturas

Temperatura del baño de decapado (°C)	A _p (cm ²)	A _e (cm ²)	P _p (g)	P _{(p+e)j} (g)	P _{(p+e)f} (g)	P _{ei} (g)	P _{ef} (g)	P _c (A _e) (g)	P _{ed} (g)	Adherencia (%)
50	9,0050	3,1416	1,6373	2,4279	2,2983	0,7906	0,6611	0,2758	0,1296	66,08
	8,9974	3,1416	1,6062	2,3517	2,2648	0,7455	0,6586	0,2603	0,0869	66,60
	8,9756	3,1416	1,6044	2,3476	2,2592	0,7433	0,6549	0,2602	0,0884	66,03
	8,9567	3,1416	1,6035	2,3389	2,2511	0,7354	0,6476	0,2579	0,0878	65,96
60	9,0050	3,1416	1,6373	2,3871	2,2983	0,7498	0,6611	0,2616	0,0887	53,38
	9,0010	3,1416	1,6533	2,3836	2,2642	0,7303	0,6109	0,2549	0,1194	53,15
	9,0003	3,1416	1,6533	2,3846	2,2653	0,7313	0,6120	0,2553	0,1193	53,27
	9,0005	3,1416	1,6533	2,3845	2,2650	0,7312	0,6117	0,2552	0,1195	53,19

(Ver nomenclatura en la tabla 3.2)

Se determinó que la mayor adherencia del esmalte se obtuvo al tratar la placa metálica con hidróxido de sodio al 10,0 % a la temperatura de 50 °C. La diferencia del porcentaje de adherencia es del 14 % aproximadamente en un rango de temperatura de 50 °C a 60 °C. El aumento de la temperatura provocó que el aluminio se degrade y por lo tanto el esmalte no se adhiera sobre la superficie dañada.

Los resultados de la cantidad de esmalte captado sobre la superficie metálica y el espesor del mismo se reportan en las Tablas 3.9 y 3.10 respectivamente.

De los resultados del ensayo de fricción que se presentan en la Tabla 3.9, se concluyó que se obtuvo una mayor captación del esmalte en la placa tratada con el baño de decapado a la temperatura de 50 °C. La diferencia entre el baño a la temperatura de 50 °C y el de 60 °C es de 0,04 g/dm².

A partir de los resultados presentados en la Tabla 3.10 se determinó que la capa de esmalte con mayor espesor se obtuvo cuando la placa fue decapada a la temperatura de 50 °C en comparación con la placa decapada a 60 °C.

Tabla 3.9. Captación de esmalte sobre la superficie de aluminio decapado a distintas temperaturas y después del ensayo de fricción

Temperatura del baño de decapado (°C)	Área cubierta (cm ²)	Peso placa (g)	Peso esmalte (g)	Esmalte captado (g/dm ²)	Promedio de esmalte captado (g/dm ²)
50	1,2475	1,6373	0,2616	0,5299	0,5273 ± 0,002
	1,2459	1,6062	0,2603	0,5286	
	1,2413	1,6044	0,2602	0,5276	
	1,2373	1,6035	0,2579	0,5234	
60	1,2406	1,6533	0,2547	0,4907	0,4906 ± 0,0003
	1,2467	1,6533	0,2549	0,4900	
	1,2465	1,6533	0,2553	0,4910	
	1,2466	1,6533	0,2552	0,4907	

Tabla 3.10. Espesor de la capa de esmalte sobre el aluminio decapado a distintas temperaturas

Temperatura del baño de decapado (°C)	Espesor de la placa (mm)	Espesor de la placa + esmalte (mm)	Espesor del esmalte (mm)	Espesor esmalte promedio (mm)
50	0,7060	0,7663	0,0603	0,0599 ± 0,0005
	0,7045	0,7643	0,0598	
	0,7023	0,7614	0,0591	
	0,7001	0,7607	0,0606	
60	0,7093	0,7678	0,0585	0,0597 ± 0,0006
	0,7005	0,7610	0,0605	
	0,7110	0,7713	0,0603	
	0,7103	0,7701	0,0598	

En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran las variaciones de la captación de esmalte y su espesor respectivamente. La evaluación se realizó en función de la variación de la temperatura del baño de decapado.

Por medio de una gráfica de barra se realiza la comparación de la cantidad de esmalte captado y el espesor que se obtuvo luego del ensayo de fricción entre los

dos niveles de temperaturas analizador. Estos valores presentaron una tendencia que disminuye con el aumento de la temperatura como se indican las Figuras 3.6 y 3.7 respectivamente.

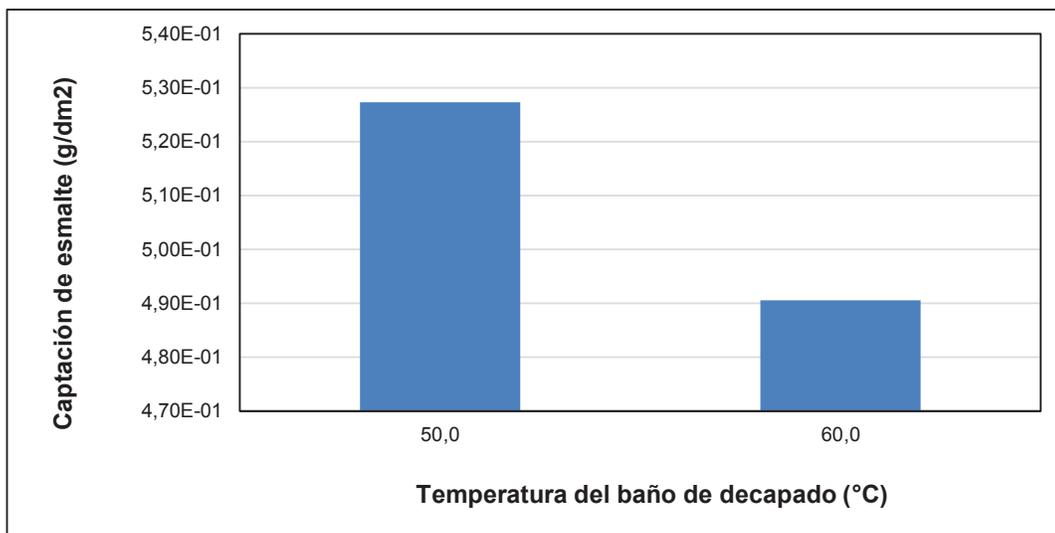


Figura 3.6. Captación de esmalte en función de la temperatura del baño de decapado

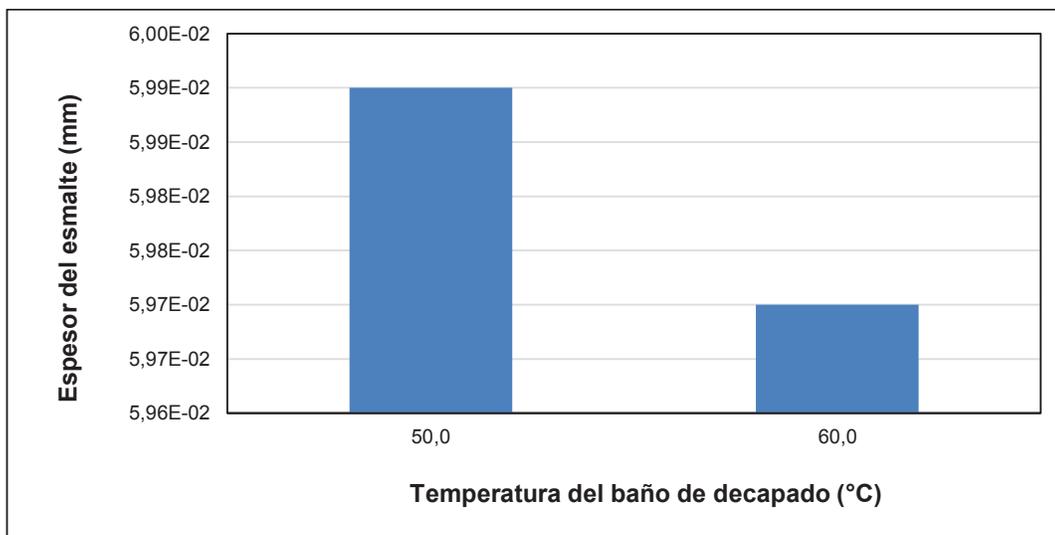


Figura 3.7. Espesor del esmalte en función de la temperatura del baño de decapado

En la Tabla 3.11 se presentan las características de las placas de aluminio esmaltadas con el mismo esmalte y bajo las mismas condiciones de cocción que las aplicadas en el estudio del efecto de la concentración del hidróxido de sodio.

Tabla 3.11. Evaluación del esmalte porcelánico aplicado sobre las placas decapadas con distintas temperaturas

Temperatura del baño de hidróxido de sodio (°C)	Características		Placa esmaltada
50	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Lisa No presenta fallas $66,17 \pm 0,22 \%$ $0,5273 \pm 0,002 \text{ g/dm}^2$ $0,0599 \pm 0,0005 \text{ mm}$	
60	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Parcialmente lisa Puntillado y puntos negros $53,25 \pm 0,08 \%$ $0,4906 \pm 0,0003 \text{ g/dm}^2$ $0,0597 \pm 0,006 \text{ mm}$	

Como se muestran en las imágenes de la Tabla 3.11, el esmalte presentó buenas características como: superficie lisa, espesor uniforme y sin fallas en la placa que fue decapada con solución del 10 % de hidróxido de sodio y a 50 °C.

En el caso de la placa decapada con solución del 10 % de hidróxido de sodio y a la temperatura de 60 °C, no presentó buena calidad en la superficie puesto que se observa parcialmente lisa y no homogénea, con burbujas internas y la capa de esmalte presenta un espesor heterogéneo.

Al comparar las características superficiales de las placas presentadas en la Tabla 3.11, se concluye que los mejores resultados se lograron cuando el decapado se ha realizado en el baño de hidróxido de sodio al 10,0 % de concentración, a la temperatura 50 °C y el tiempo de 2 minutos, en comparación

con los resultados de la placa decapada con solución de hidróxido de sodio al 10 %, a la temperatura de 60 °C y 2 minutos en la que la superficie presentó defectos en forma de manchas oscuras.

Defectos como puntos negros en el esmalte fueron producto de la contaminación de las materias primas durante su preparación. En la molienda la fricción del molino provocó el desgaste de su recubrimiento y estas partículas metálicas que se incorporaron al esmalte crudo aparecieron en forma de puntos negros en el esmalte cocido (Vielhaber, 2002, p. 116).

La Tabla 3.12 presenta los resultados del análisis en los que descompone la varianza de Adherencia en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 6966,15, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Adherencia entre un nivel de Temperatura y otro.

Tabla 3.12. Análisis de varianza para la adherencia del esmalte en función de la temperatura

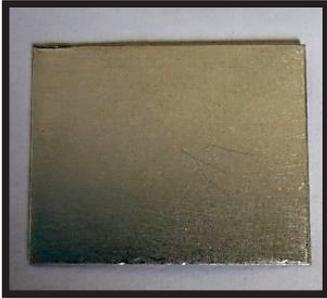
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	333,853	1	333,853	6 966,15	0,0000
Intra grupos	0,28755	6	0,047925		
Total (Corr.)	334,14	7			

3.1.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL TIEMPO EN EL PROCESO DE DECAPADO

En la Tabla 3.13 se reportan las imágenes fotográficas, en las que se observa el efecto del tiempo de permanencia de la placa de aluminio dentro del baño de decapado, sobre la estructura de la superficie del aluminio, se utilizó una solución de hidróxido de sodio al 10 % de concentración y a una temperatura de 50 °C,

para realizar la correspondiente comparación, también se presenta la fotografía de la placa antes de procesarla. Las condiciones de operación se reportan en la Tabla 2.4.

Tabla 3.13. Características de las placas de aluminio 1100 antes y después del decapado

Placa inicial	Tiempo del decapado (minutos)	Después del decapado	Observaciones
	2		<ul style="list-style-type: none"> Superficie metálica totalmente homogénea, brillante y limpia.
	5		<ul style="list-style-type: none"> Superficie totalmente deteriorada y sin brillo

El aumento del tiempo de permanencia dentro del baño de decapado provocó la descomposición de la superficie de la placa de aluminio, esto se evidencia por la formación de varias manchas lo que permite considerar un tiempo máximo de realización del proceso bajo las condiciones de: solución de decapado hidróxido de sodio al 10,0 %, a 50 °C.

3.1.3.1 Determinación de la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio decapada a 2 y 5 minutos

Para evaluar la adherencia del esmalte porcelánico sobre la superficie de aluminio decapada se realizaron ensayos de fricción, los resultados se presentan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio decapado con diferentes tiempos

Tiempo del decapado (min)	A _p (cm ²)	A _e (cm ²)	P _p (g)	P _{(p+e)j} (g)	P _{(p+e)f} (g)	P _{ei} (g)	P _{ef} (g)	P _e (A _e) (g)	P _{ed} (g)	Adherencia (%)
2	8,9967	3,1416	1,6120	2,3578	2,2718	0,7458	0,6598	0,2604	0,0860	66,96
	8,9866	3,1416	1,6075	2,3513	2,2651	0,7438	0,6576	0,2600	0,0861	66,87
	8,9624	3,1416	1,5916	2,3346	2,2479	0,7430	0,6564	0,2605	0,0867	66,73
	9,001	3,1416	1,6287	2,3752	2,2883	0,7465	0,6596	0,2606	0,0869	66,65
5	9,003	3,1416	1,6388	2,3934	2,2756	0,7546	0,6368	0,2633	0,1178	55,25
	8,9887	3,1416	1,6122	2,3626	2,2465	0,7504	0,6343	0,2623	0,1160	55,76
	8,9825	3,1416	1,5953	2,3444	2,2274	0,7491	0,6321	0,2620	0,1170	55,34
	9,015	3,1416	1,6201	2,3740	2,2576	0,7539	0,6375	0,2627	0,1165	55,67

(Ver nomenclatura de la Tabla 3.2)

De la Tabla 3.14 se determinó que un aumento en el tiempo de decapado afectó la composición química de la placa puesto que el hidróxido de sodio al estar en contacto con la placa por un tiempo mayor atacó al aluminio, como resultado se obtuvo menor adherencia al incrementar el tiempo del baño.

En la Tabla 3.15, se reportan los resultados de la captación de esmalte porcelánico sobre las placas decapadas con distintos tiempos de duración del proceso. El esmalte aplicado y las condiciones de cocción corresponden a las ya citadas en la Sección 2.1.1.3 de este documento.

Tabla 3.15. Captación de esmalte sobre superficies de aluminio decapadas a diferentes tiempos y después del ensayo de fricción

Tiempo del decapado (min)	Área cubierta (cm ²)	Peso placa (g)	Peso esmalte (g)	Esmalte captado (g/dm ²)	Promedio de esmalte captado (g/dm ²)
2	1,2458	1,6120	0,2604	0,5296	0,5293 ± 0,0004
	1,2436	1,6075	0,2600	0,5288	
	1,2385	1,5916	0,2605	0,5300	
	1,2467	1,6287	0,2606	0,5291	

Tabla 3.15. Captación de esmalte sobre superficies de aluminio decapadas a diferentes tiempos y después del ensayo de fricción (**continuación...**)

Tiempo del decapado (min)	Área cubierta (cm ²)	Peso placa (g)	Peso esmalte (g)	Esmalte captado (g/dm ²)	Promedio de esmalte captado (g/dm ²)
5	1,2471	1,6388	0,2633	0,5106	0,5098 ± 0,0006
	1,2441	1,6122	0,2623	0,5099	
	1,2427	1,5953	0,2620	0,5086	
	1,2497	1,6201	0,2627	0,5101	

Los resultados del espesor de la capa de esmalte porcelánico se presentan en la Tabla 3.16. La evaluación se realizó sobre las placas decapadas a diferentes tiempos.

Tabla 3.16. Espesor del esmalte sobre superficies de aluminio decapadas a diferentes tiempos y después del ensayo de fricción

Tiempo del decapado (min)	Espesor de la placa (mm)	Espesor de la placa + esmalte (mm)	Espesor del esmalte (mm)	Espesor esmalte promedio (mm)
2	0,7086	0,7682	0,0596	0,0601 ± 0,0007
	0,7086	0,7687	0,0601	
	0,7102	0,7707	0,0605	
	0,7010	0,7613	0,0603	
5	0,7027	0,7638	0,0611	0,0598 ± 0,0003
	0,7112	0,771	0,0598	
	0,7056	0,7652	0,0596	
	0,7122	0,7709	0,0587	

Al comparar los resultados presentados en las Tablas 3.15 y 3.16 se determinó que la mayor cantidad de esmalte captado y el mayor espesor de la capa de éste, se obtuvo en la placa tratada durante 2 minutos en el baño de decapado.

El incremento del tiempo de decapado, generó que la captación de esmalte y su

espesor disminuyeran, las tendencias de este hecho se muestran en las Figuras 3.8 y 3.9 respectivamente.

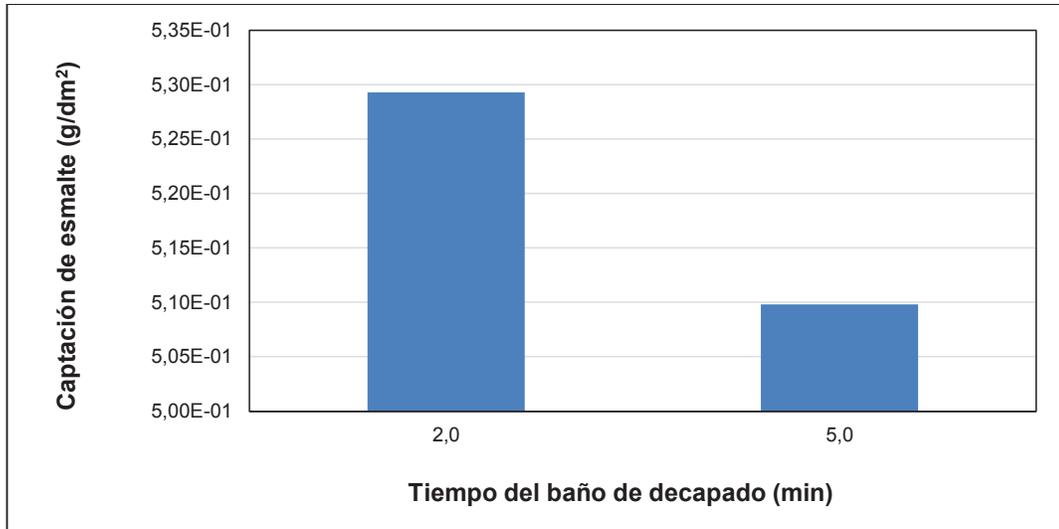


Figura 3.8. Captación del esmalte en función de la variación del tiempo de decapado

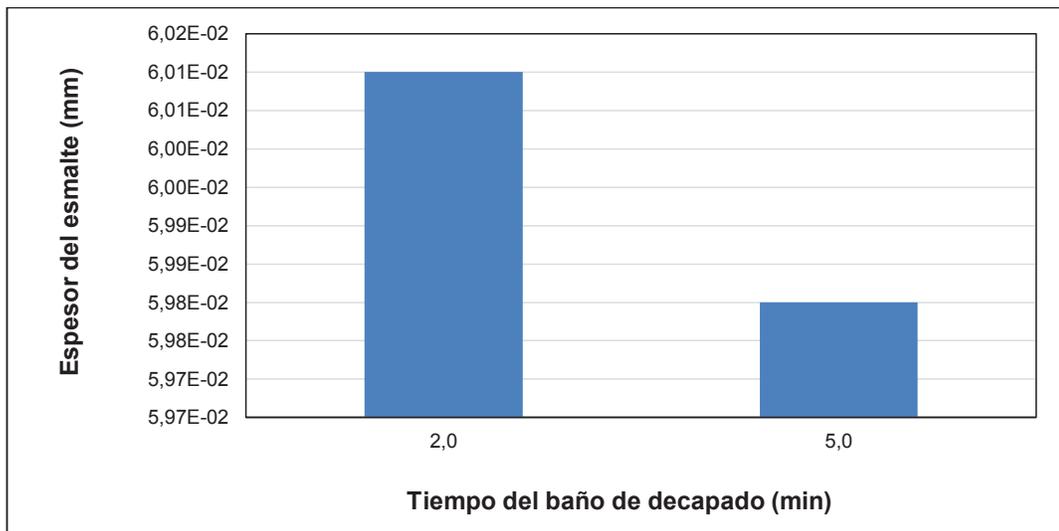
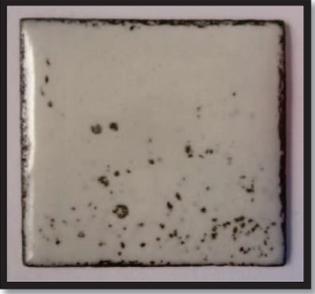


Figura 3.9. Espesor de la capa de esmalte en función del tiempo de decapado

En la Tabla 3.17 se detallan las propiedades evaluadas de las placas esmaltadas tales como: aspecto de la superficie, imperfecciones, porcentaje de adherencia, captación y espesor.

Tabla 3.17. Evaluación de la capa de esmalte aplicada sobre las placas de aluminio decapadas a diferentes tiempos

Tiempo del baño de decapado (minutos)	Observaciones		Placa esmaltada
2	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Lisa No presenta fallas visibles $66,80 \pm 0,11 \%$ $0,5293 \pm 0,0004 \text{ g/dm}^2$ $0,0598 \pm 0,0007 \text{ mm}$	
5	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Parcialmente lisa Puntillado, puntos negros $55,51 \pm 0,21 \%$ $0,5098 \pm 0,0006 \text{ g/dm}^2$ $0,0601 \pm 0,0003 \text{ mm}$	

El esmalte presentó características como superficie lisa, espesor uniforme y sin fallas en la placa que fue decapada con hidróxido de sodio al 10,0 % en peso a una temperatura de 50 °C y un tiempo de 2 minutos.

En el caso de la placa decapada con hidróxido de sodio al 10,0 % en peso a una temperatura de 50 °C y un tiempo de 5 minutos, presentó una superficie poco recubierta y de mala, sobre esta se identificaron defectos como burbujas internas y un espesor heterogéneo.

Defectos como: puntillado y presencia de puntos negros sobre la superficie metálica, se observaron sobre la placa tratada en el baño de decapado durante un tiempo superior a 2 minutos.

Por lo tanto al variar las condiciones de operación del proceso de decapado

dentro de los rangos de estudio: concentración del hidróxido de sodio, temperatura y tiempo, se obtuvo como resultado el deterioro de la placa metálica y por lo tanto la contaminación del esmalte durante el proceso de cocción.

La Tabla 3.18 indica los resultados del análisis estadístico, puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Adherencia entre un nivel de Tiempo y otro.

Tabla 3.18. Análisis de varianza para la adherencia del esmalte en función del tiempo de decapado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	255,267	1	255,267	6 319,14	0,0000
Intra grupos	0,242375	6	0,0403958		
Total (Corr.)	255,509	7			

La evaluación del efecto de las tres variables del proceso de decapado sobre la adherencia del esmalte porcelánico a la superficie de la pieza de aluminio y del espesor logrado, a través de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales realizadas bajo diferentes valores de cada parámetro, se concluye en que con una solución de hidróxido de sodio de concentración del 10,0 % en peso a la temperatura de 50 °C y tiempo de 2 minutos, se obtiene una mejor adherencia del esmalte, así como una superficie totalmente recubierta, lisa, brillante y con espesor homogéneo.

3.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO CRÓMICO Y DEL TIEMPO Y EN EL PROCESO DE ANODIZADO DEL ALUMINIO 1100

3.2.1 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO CRÓMICO EN EL PROCESO DE ANODIZADO DEL ALUMINIO 1100

En la Tabla 3.19 se presentan las imágenes fotográficas las placas de aluminio

anodizadas a las condiciones que se reportan en la Tabla 2.5. La variable de estudio fue la concentración del ácido crómico, se mantuvieron constantes los valores de: voltaje, densidad de corriente, temperatura y tiempo.

Tabla 3.19. Características de las placas de aluminio 1100 anodizadas con soluciones de ácido crómico de distintas concentraciones

Placa inicial	Concentración de ácido crómico (% p/p)	Después del anodizado
	3,0	
	7,5	
	10,0	

Las fotografías de la Tabla 3.19 presentan la acción del ácido crómico sobre la superficie de aluminio, en las placas que se realizó el anodizado con una concentración de solución de ácido crómico del 3,0 y del 7,5 % en peso, es la misma lográndose superficies brillantes y limpias.

En el caso de la placa anodizada con soluciones de ácido crómico del 10,0 % se notó la formación de estrías sobre la superficie metálica. Éste resultado se explica con lo que propone Henley (2013) en sus trabajos sobre anodizado de aluminio, cuando el metal base es aluminio al 99,99 % y ciertas aleaciones obtenidas a partir de él, puede anodizarse sin alterar la superficie metálica, el resultado es una película de óxido de aluminio homogénea y transparente. Si el contenido de aluminio es del 99,7 al 99,8 % los aleantes afectarán la homogeneidad y transparencia del óxido de aluminio (p. 82).

Para la evaluación de las condiciones de operación del proceso de anodizado, se utilizaron placas de aluminio 1100 constituido por 99,00 % de aluminio y 1,00 % de aleantes entre los que se encuentran: manganeso, cinc, cobre, silicio y hierro, por lo tanto el anodizado no fue homogéneo. Se concluyó que la calidad del anodizado dependerá de la pureza del aluminio.

Otra de las causas de los defectos del anodizado se debió a diversos factores de manejo de la placa, antes del proceso, entre los que se destacan: presencia polvo producto del lijado, exposición de la placa en ambientes contaminados o por defectos en el proceso de decapado, lo que provocó zonas defectuosas en la superficie metálica y la contaminación del electrolito del baño de anodizado.

Este hecho se ratifica con lo que menciona Henley (2013) en su obra sobre las condiciones del anodizado de aluminio, donde se explica que el electrolito reacciona con las impurezas y los constituyentes que forman parte del ánodo, lo que produce recubrimientos de distintas características como: homogeneidad, transparencia y coloración (p. 83).

Se concluyó que la presencia de impurezas o los procesos previos realizados (pulido, lijado, decapado) afectaron la calidad de la capa de óxido de aluminio durante el proceso de anodizado.

Los defectos del anodizado con alta concentración de ácido crómico (10,0 % en peso) se debieron a la presencia de impurezas en el baño de anodizado, éstas

facilitaron el paso de la corriente y por puede ser que la temperatura no se mantuvo constante y varió con el tiempo, en consecuencia se obtuvo una capa de óxido no uniforme.

Por tal motivo es importante trabajar con una densidad de corriente baja como recomienda Vielhaber (2002) en su trabajo realizado sobre anodizado de aluminio, al mantener constante la concentración del electrolito durante todo el proceso, la disolución química será capaz de disolver irregularidades y una capa uniforme de óxido se logrará durante el proceso de anodizado. (p. 117).

Sin embargo, si la densidad de corriente es baja, significa menor tasa de formación del óxido y un tiempo más largo de anodización para obtener el espesor de la capa de óxido deseado (Vielhaber, 2002, p. 117).

La homogeneidad del anodizado se afectó con el cambio de las condiciones de operación, en este caso la concentración de ácido crómico, este resultado coincidió con lo que propuso Henley (2013) en sus estudios sobre anodizado, al utilizar el mismo electrolito, cualquier cambio en los parámetros del proceso de anodizado, afectan la actividad del electrolito sobre el ánodo, por lo cual se modificarán las características del recubrimiento (p. 84).

Se concluyó que para mantener una homogeneidad en la superficie anodizada, se deben mantener constantes las condiciones de operación del proceso, puesto que, un cambio en la magnitud de las mismas provocó variaciones en la calidad de la película de óxido de aluminio. Los mejores resultados obtenidos en el presente trabajo se lograron con soluciones de ácido crómico con concentraciones entre 3,0 y 7,5 %.

3.2.1.1 Determinación de la captación del esmalte con la superficie de aluminio anodizado con ácido crómico de concentración: 3,0; 7,5 y 10,0 %

Con los resultados obtenidos en el ensayo de fricción que se muestran en la

Tabla 3.20 se determinó la adherencia del esmalte porcelánico sobre la superficie anodizada con distintas concentraciones de ácido crómico.

Tabla 3.20. Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio anodizado con distintas concentraciones de ácido crómico

Concentración de ácido crómico (% p/p)	A_p (cm ²)	A_c (cm ²)	P_p (g)	$P_{(p+e)i}$ (g)	$P_{(p+e)f}$ (g)	P_{ei} (g)	P_{ef} (g)	P_e (A_e) (g)	P_{ed} (g)	Adherencia (%)
3,0	9,0001	3,1416	1,6336	2,4231	2,3798	0,7895	0,7461	0,2756	0,0434	84,26
	9,0015	3,1416	1,6380	2,4249	2,3824	0,7869	0,7445	0,2746	0,0424	84,55
	8,9916	3,1416	1,6115	2,3907	2,3586	0,7792	0,7471	0,2723	0,0322	88,19
	8,9938	3,1416	1,6091	2,3869	2,3552	0,7778	0,7461	0,2717	0,0317	88,34
7,5	8,9957	3,1416	1,6081	2,3759	2,3150	0,7678	0,7070	0,2682	0,0609	77,30
	9,005	3,1416	1,6373	2,3998	2,3390	0,7626	0,7017	0,2660	0,0608	77,14
	8,9844	3,1416	1,6062	2,3658	2,3062	0,7596	0,7000	0,2656	0,0596	77,56
	8,9726	3,1416	1,6044	2,3692	2,3088	0,7648	0,7044	0,2678	0,0604	77,45
10,0	8,9567	3,1416	1,6035	2,3816	2,2758	0,7781	0,6723	0,2729	0,1058	61,25
	8,9723	3,1416	1,6533	2,4368	2,3302	0,7835	0,6769	0,2743	0,1066	61,13
	9,001	3,1416	1,6533	2,4440	2,3373	0,7907	0,6841	0,2760	0,1066	61,36
	9,0003	3,1416	1,6533	2,4355	2,3295	0,7822	0,6762	0,2730	0,1060	61,18

(Ver nomenclatura en la Tabla 3.2)

Dentro de los intervalos de concentración de ácido crómico evaluados 3,0 y 10,0 %, se verifica que a una menor concentración de ácido crómico la adherencia del esmalte fue mayor.

Los resultados de la captación de esmalte evaluado sobre las superficies de aluminio anodizadas se reportan en la Tabla 3.21.

Con los resultados del ensayo de fricción, se determinó la captación del esmalte y su espesor que se indican en la Tabla 3.21, se determinó que la mayor captación de esmalte se obtuvo en la placa tratada con ácido crómico al 3,0 % en peso durante el anodizado.

La Tabla 3.22 presenta los resultados del espesor de la capa de esmalte que se

obtuvo después del anodizado realizado a distintas concentraciones de ácido crómico.

Tabla 3.21. Captación de esmalte sobre la superficie de aluminio anodizado con distintas concentraciones de ácido crómico y luego del ensayo de fricción

Concentración del ácido crómico (% p/p)	Área cubierta (cm ²)	Peso placa (g)	Peso esmalte (g)	Esmalte captado (g/dm ²)	Promedio de esmalte captado (g/dm ²)
3,0	1,2465	1,6336	0,2756	0,5986	0,5987 ± 0,0009
	1,2468	1,6380	0,2746	0,5971	
	1,2447	1,6115	0,2723	0,6002	
	1,2451	1,6091	0,2717	0,5992	
7,5	1,2456	1,6081	0,2682	0,5676	0,5652 ± 0,002
	1,2475	1,6373	0,2660	0,5625	
	1,2431	1,6062	0,2656	0,5631	
	1,2406	1,6044	0,2678	0,5678	
10,0	1,2373	1,6035	0,2729	0,5434	0,5450 ± 0,002
	1,2406	1,6533	0,2743	0,5456	
	1,2467	1,6533	0,2760	0,5487	
	1,2465	1,6533	0,2730	0,5425	

Tabla 3.22. Espesor de la capa de esmalte sobre la superficie de aluminio anodizado con distintas concentraciones de ácido crómico

Concentración del ácido crómico (% p/p)	Espesor de la placa (mm)	Espesor de la placa + esmalte (mm)	Espesor del esmalte (mm)	Espesor esmalte promedio (mm)
3,0	0,7011	0,7614	0,0603	0,0599 ± 0,0003
	0,7093	0,7691	0,0598	
	0,7015	0,7606	0,0591	
	0,7110	0,7716	0,0606	
7,5	0,7101	0,7688	0,0587	0,0596 ± 0,0007
	0,7060	0,7653	0,0593	
	0,7045	0,7646	0,0601	
	0,7023	0,7628	0,0605	

Tabla 3.22. Espesor de la capa de esmalte sobre la superficie de aluminio anodizado con distintas concentraciones de ácido crómico (**continuación...**)

Concentración del ácido crómico (% p/p)	Espesor de la placa (mm)	Espesor de la placa + esmalte (mm)	Espesor del esmalte (mm)	Espesor esmalte promedio (mm)
7,5	0,7133	0,7729	0,0596	0,0596 ± 0,0007
10,0	0,7093	0,7691	0,0598	0,0595 ± 0,0005
	0,7005	0,7595	0,059	
	0,7110	0,7708	0,0598	
	0,7133	0,7729	0,0596	

A partir de los resultados que se presentan en las Tablas 3.21 y 3.22 se construyeron las Figuras 3.10 y 3.11 en las que se representa la variación de la capa de esmalte y su espesor en función del incremento de la concentración de ácido crómico para el baño de anodizado.

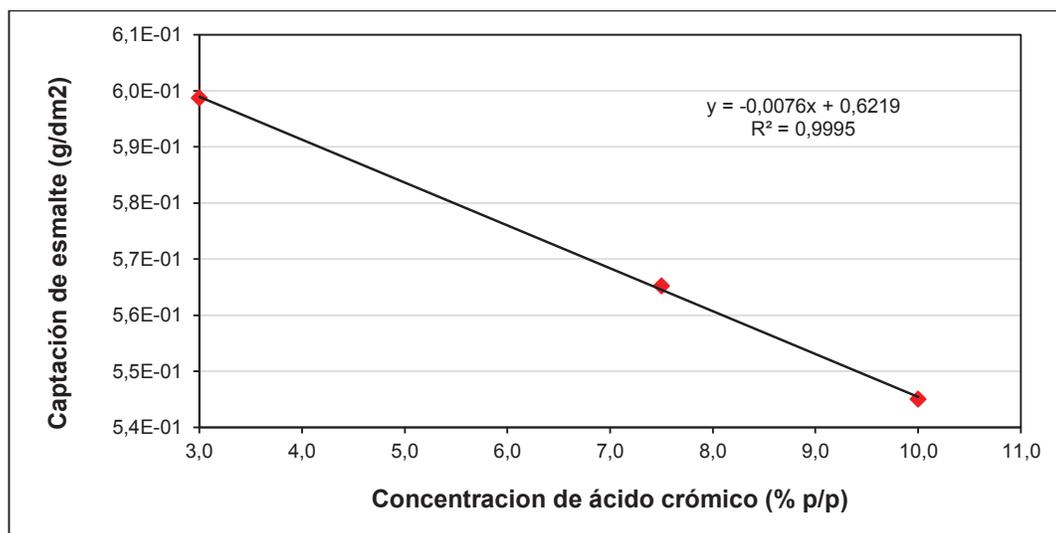


Figura 3.10. Variación de la captación de esmalte en función de la concentración de ácido crómico en el baño de anodizado

Al incrementar la concentración de ácido crómico en el baño de anodizado, el espesor de la capa de esmalte disminuyó al igual que la cantidad de esmalte que se retuvo en la superficie metálica luego del ensayo de fricción como se indican en las Figuras 3.10 y 3.11 respectivamente. El efecto de la concentración del

ácido crómico del proceso de decapado sobre la captación y el espesor del esmalte es mínima e igual a $-7,6 \times 10^{-3} \text{ g/dm}^2$ y $-5,8 \times 10^{-5} \text{ mm}$, respectivamente en el rango de 3,0 % a 10,0 %

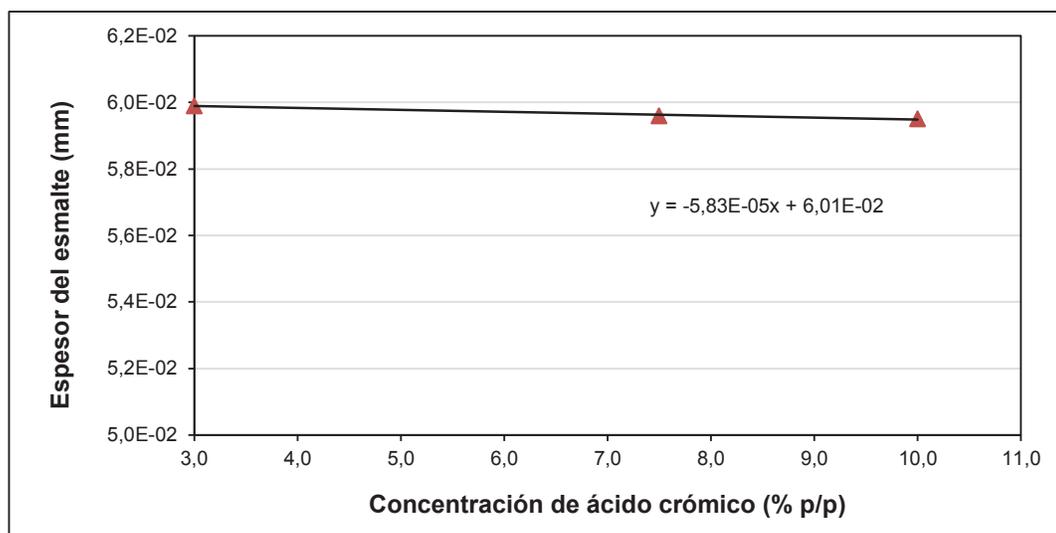


Figura 3.11. Variación del espesor del esmalte en función de la concentración de ácido crómico en el baño de anodizado

Se examinaron las propiedades de las placas esmaltadas tales como: aspecto de la superficie, defectos, porcentaje de adherencia y espesor. En la Tabla 3.23 se pueden observar las características de las placas de aluminio esmaltadas.

El esmalte presentó buenas características como: superficie lisa, espesor uniforme y sin fallas en la placa que fue anodizada con ácido crómico al 3,0 %.

En el caso de la placa anodizada con ácido crómico al 7,5%, esta presentó una superficie parcialmente lisa, con burbujas internas.

La placa anodizada con ácido crómico al 10,0 %, no presentó buena calidad en la superficie, se identificaron defectos como burbujas internas y un espesor heterogéneo.

La placa anodizada en el baño de ácido crómico de concentración de 3,0 %, a la

temperatura de 50 °C, voltaje de 40 V, densidad de corriente de 0,3 A/dm² y 35 minutos, condiciones con las que se obtuvo una mayor captación de esmalte y mayor espesor.

Tabla 3.23. Evaluación del esmalte aplicado sobre las placas de aluminio anodizadas a diferentes concentraciones de ácido crómico

Concentración de ácido crómico (% p/p)	Características	Características	Placa esmaltada
3,0	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Lisa No presenta fallas $86,34 \pm 1,93 \%$ $0,5986 \pm 0,0009 \text{ g/dm}^2$ $0,0595 \pm 0,0003 \text{ mm}$	
7,5	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Parcialmente lisa Burbujas internas $77,36 \pm 0,14 \%$ $0,5652 \pm 0,002 \text{ g/dm}^2$ $0,0596 \pm 0,0007 \text{ mm}$	
10,0	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Parcialmente lisa Burbujas internas $61,23 \pm 0,07 \%$ $0,5450 \pm 0,002 \text{ g/dm}^2$ $0,0599 \pm 0,0005 \text{ mm}$	

La Tabla 3.24 indica el análisis estadístico, puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Adherencia entre un nivel de Concentración de ácido crómico y otro.

Tabla 3.24. Análisis de varianza para la adherencia de esmalte en función de la concentración de ácido crómico

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1294,7	2	647,35	386,28	0,0000
Intra grupos	15,0828	9	1,67586		
Total (Corr.)	1309,78	11			

3.2.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL TIEMPO EN EL PROCESO DE ANODIZADO

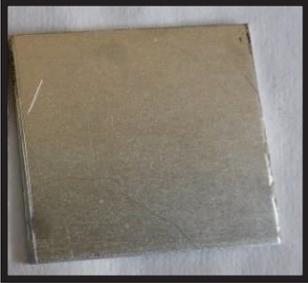
En la Tabla 3.25 se presentan las imágenes fotográficas de las placas de aluminio anodizadas con los baños de ácido crómico al 3,0 % y la apariencia de las mismas antes y después del proceso. El anodizado se realizó con la concentración de ácido crómico determinada en la sección 3.2.1 con la cual se obtuvo los mejores resultados de adherencia del esmalte.

Para la placa anodizada con una concentración de solución de ácido crómico al 3,0 % y tiempo de 35 minutos, el resultado fue una superficie brillante y limpia como se indica en la Tabla 3.25.

En el caso de las placas anodizadas con soluciones de ácido crómico del 3,0 % y tiempo de 39 minutos, se observa la formación de estrías sobre la superficie de aluminio. A mayor tiempo de anodizado, la capa porosa de la superficie metálica aumenta.

Se concluyó que la calidad de la capa de óxido anódico depende del tiempo de anodizado.

Tabla 3.25. Características de las placas de aluminio 1100 con distintos tiempos de anodizado

Placa inicial	Tiempo del baño de anodizado (minutos)	Antes del anodizado
	35	
	39	

3.2.2.1 Determinación de la captación del esmalte con la superficie de aluminio anodizado a 35 y 39 minutos

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos de fricción, se determinó el efecto que ejerció el tiempo del baño de anodizado sobre la adherencia entre el esmalte porcelánico y la superficie metálica.

En la Tabla 3.26 se presentan los resultados de la adherencia del esmalte sobre las placas anodizadas bajo diferentes condiciones de operación.

Los resultados de la captación de esmalte y su espesor se reportan en las Tablas 3.27 y 3.28 respectivamente. Estos resultados fueron evaluados bajo distintas condiciones de tiempo del baño de decapado.

Tabla 3.26. Porcentaje de adherencia del esmalte porcelánico sobre aluminio anodizado con diferentes tiempos

Tiempo del anodizado (min)	A _p (cm ²)	A _e (cm ²)	P _p (g)	P _{(p+e)i} (g)	P _{(p+e)f} (g)	P _{ei} (g)	P _{ef} (g)	P _e (A _e) (g)	P _{ed} (g)	Adherencia (%)
35	9,0005	3,1416	1,6533	2,4313	2,3883	0,7781	0,7350	0,2716	0,0431	84,14
	8,9967	3,1416	1,6287	2,4113	2,3681	0,7826	0,7394	0,2733	0,0432	84,19
	9,001	3,1416	1,6388	2,4274	2,3841	0,7886	0,7453	0,2752	0,0434	84,25
	8,9934	3,1416	1,6122	2,3938	2,3510	0,7816	0,7388	0,2730	0,0428	84,32
29	8,9976	3,1416	1,5953	2,3475	2,2895	0,7521	0,6941	0,2626	0,0580	77,91
	8,9917	3,1416	1,6201	2,3637	2,3062	0,7436	0,6861	0,2598	0,0575	77,86
	9,005	3,1416	1,6336	2,4030	2,3432	0,7694	0,7096	0,2684	0,0598	77,72
	8,9974	3,1416	1,6380	2,3899	2,3310	0,7519	0,6930	0,2625	0,0589	77,56

(Ver nomenclatura en la Tabla 3.2)

Tabla 3.27. Captación de esmalte sobre la superficie de aluminio anodizado a diferentes tiempos y luego del ensayo de fricción

Tiempo del anodizado (min)	Área cubierta (cm ²)	Peso placa (g)	Peso esmalte (g)	Esmalte captado (g/dm ²)	Promedio de esmalte captado (g/dm ²)
35	1,2466	1,6533	0,2716	0,5896	0,5935 ± 0,002
	1,2458	1,6287	0,2733	0,5935	
	1,2467	1,6388	0,2752	0,5978	
	1,2451	1,6122	0,2730	0,5934	
39	1,2460	1,5953	0,2626	0,5571	0,5583 ± 0,005
	1,2447	1,6201	0,2598	0,5512	
	1,2475	1,6336	0,2684	0,5688	
	1,2459	1,6380	0,2625	0,5562	

De los resultados del ensayo de fricción que se muestran en la Tabla 3.27, se determinó que se obtuvo una mayor captación de esmalte en la placa que se trató en el baño de anodizado durante 35 minutos.

Con la Tabla 3.28 se determinó que la placa que obtuvo una capa de esmalte con mayor espesor fue la que se trató en el baño de anodizado durante 35 minutos en comparación con la placa decapada durante un tiempo mayor de 39 minutos.

Tabla 3.28. Espesor de la capa de esmalte sobre la superficie de aluminio anodizado a diferentes tiempos

Tiempo del decapado (min)	Espesor de la placa (mm)	Espesor de la placa + esmalte (mm)	Espesor del esmalte (mm)	Espesor esmalte promedio (mm)
35	0,7103	0,7688	0,0585	0,0598 ± 0,0006
	0,7027	0,7632	0,0605	
	0,7005	0,7608	0,0603	
	0,7110	0,7708	0,0598	
39	0,7133	0,7744	0,0611	0,0597 ± 0,0007
	0,7101	0,7699	0,0598	
	0,7060	0,7656	0,0596	
	0,7045	0,7632	0,0587	

A partir de los resultados de las Tablas 3.27 y 3.28 se construyeron las Figuras 3.12 y 3.13 en las que se reportan la variación de la captación del esmalte y su espesor en función del tiempo de anodizado respectivamente.

Al incrementar el tiempo de anodizado, el espesor de la capa de esmalte disminuyó al igual que la cantidad de esmalte que se retuvo en la superficie metálica luego del ensayo de fricción como se indican en las Figuras 3.12 y 3.13 respectivamente.

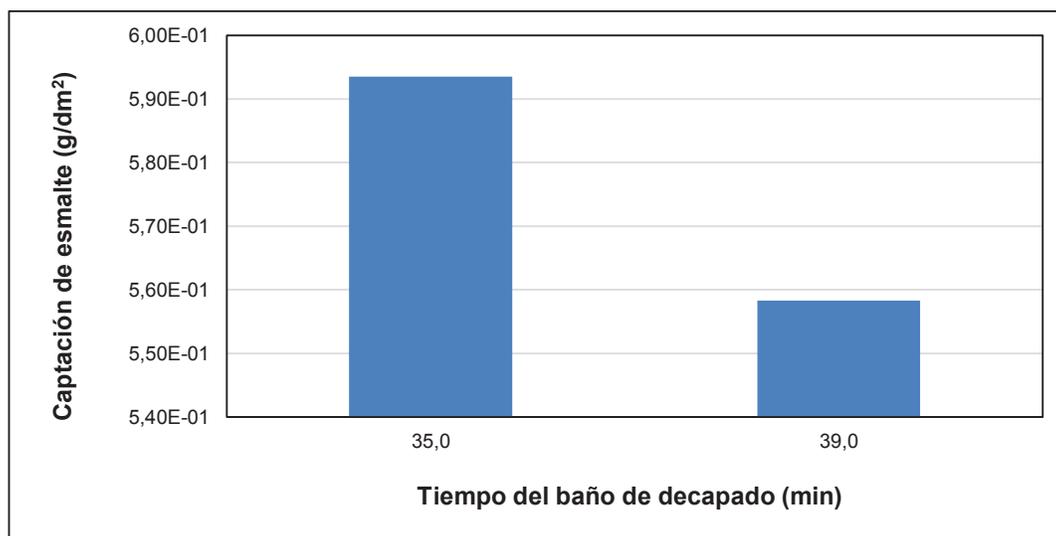


Figura 3.12. Captación de esmalte en función del tiempo de anodizado

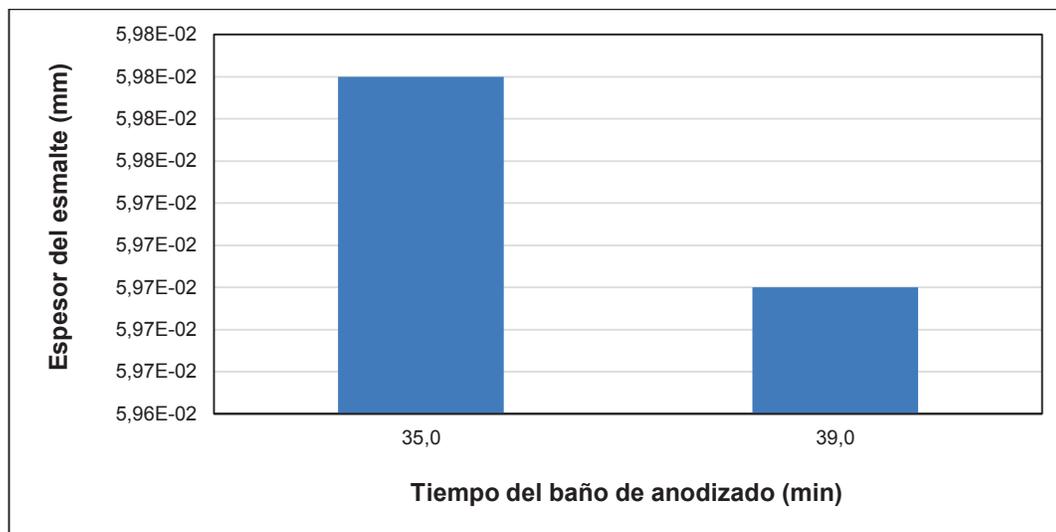


Figura 3.13. Variación del espesor del esmalte en función del tiempo de anodizado

Para determinar las características finales del esmalte porcelánico, se evaluaron parámetros como: cobertura, aspecto de la superficie, defectos, porcentaje de adherencia y espesor. En la Tabla 3.29 se presentan los resultados finales de las placas metálicas esmaltadas.

El esmalte presentó buenas características como superficie lisa, espesor uniforme y sin fallas en la placa que fue anodizada con ácido crómico al 3,0 % y tiempo de 35 minutos.

Tabla 3.29. Evaluación del esmalte aplicado sobre las placas de aluminio anodizadas a diferentes tiempos

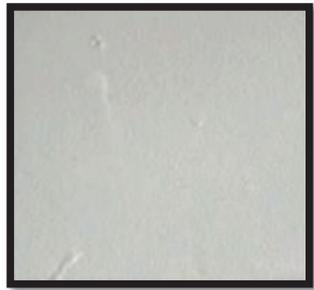
Tiempo del anodizado (minutos)	Características		Placa esmaltada
35	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Lisa No presenta fallas $84,23 \pm 0,06 \%$ $0,5935 \pm 0,002 \text{ g/dm}^2$ $0,0597 \pm 0,0006 \text{ mm}$	

Tabla 3.29. Evaluación del esmalte aplicado sobre las placas de aluminio anodizadas a diferentes tiempos

Tiempo del anodizado (minutos)	Características		Placa esmaltada
39	Superficie al tacto: Defectos: Adherencia: Captación: Espesor:	Parcialmente lisa Burbujas internas $77,76 \pm 0,12 \%$ $0,5583 \pm 0,005 \text{ g/dm}^2$ $0,0598 \pm 0,0007 \text{ mm}$	

En el caso de la placa anodizada con ácido crómico al 3,0 % en peso y tiempo de 39 minutos, presentó una superficie parcialmente lisa, burbujas internas, no se obtuvo una buena calidad en la superficie por la presencia de defectos como burbujas internas y un espesor heterogéneo.

En la Tabla 3.30 se presenta el análisis estadístico, puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Adherencia entre un nivel de Tiempo de anodizado y otro.

Tabla 3.30. Análisis de varianza de la adherencia del esmalte en función del tiempo de anodizado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	83,5278	1	83,5278	5 437,12	0,0000
Intra grupos	0,092175	6	0,0153625		
Total (Corr.)	83,62	7			

Finalizadas las evaluaciones de las características de las placas luego del proceso de anodizado y las pruebas de adherencia del esmalte, se concluyó que la placa anodizada en el baño de ácido crómico de concentración del 3,0 %, a la temperatura de 50 °C, voltaje de 40 V, densidad de corriente de 0,3 A/dm² y 35

minutos se obtuvo una mejor adherencia del esmalte en comparación con las placas anodizadas durante 39 minutos a las mismas condiciones.

En la Tabla 3.31 se presenta un resumen de los resultados con los cuales se obtuvo la mejor adherencia del esmalte sobre la placa de aluminio.

Tabla 3.31. Condiciones de operación para los procesos de decapado y anodizado

Proceso	Condiciones de operación
Decapado	Contracción de hidróxido de sodio: 10,0 % p/p Temperatura del decapado: 50 °C Tiempo del decapado: 2 min
Anodizado	Concentración del ácido crómico: 3,0 % p/p Tiempo del anodizado: 35 min

En la Tabla 3.32 se muestran los resultados del porcentaje de adherencia que se obtuvo en función de cada una de las variables analizadas en los procesos de decapado y anodizado de placas de aluminio. Las variables que se utilizaron para el análisis fueron: concentración del hidróxido de sodio, temperatura y tiempo de decapado, concentración de ácido crómico y tiempo de anodizado. Un ejemplo para la elaboración de diagrama de Pareto se indica en el Anexo III.

Tabla 3.32. Frecuencia y frecuencia acumulada para la serie de datos del porcentaje de adherencia

Causas	Simbología	Evento (Adherencia del esmalte)	% Acumulado
Concentración de hidróxido de sodio 3,0 %	causa 8	86,34	11
Tiempo de anodizado 35 min	causa 11	84,23	21
Tiempo de anodizado 39 min	causa 12	77,76	31
Concentración del ácido crómico 7,5 %	causa 9	77,36	40
Concentración de hidróxido de sodio 10,0 %	causa 1	67,06	49
Tiempo de decapado 2 min	causa 6	66,8	57
Temperatura de decapado 50 °C	causa 4	66,17	65

Tabla 3.32. Frecuencia y frecuencia acumulada para la serie de datos del porcentaje de adherencia (**continuación...**)

Causas	Simbología	Evento (Adherencia del esmalte)	% Acumulado
Concentración del ácido crómico 10,0 %	causa 10	61,23	73
Concentración de hidróxido de sodio 12,5 %	causa 2	59,37	80
Tiempo de decapado 5 min	causa 7	55,51	87
Concentración de hidróxido de sodio 15,0 %	causa 3	53,25	93
Temperatura de decapado 60 °C	causa 5	53,02	100

Con los datos de la Tabla 3.32 se construyó el diagrama de Pareto que se muestra en la Figura 3.14. A través del cual se identificaron las condiciones que ejercieron mayor influencia sobre la adherencia del esmalte.

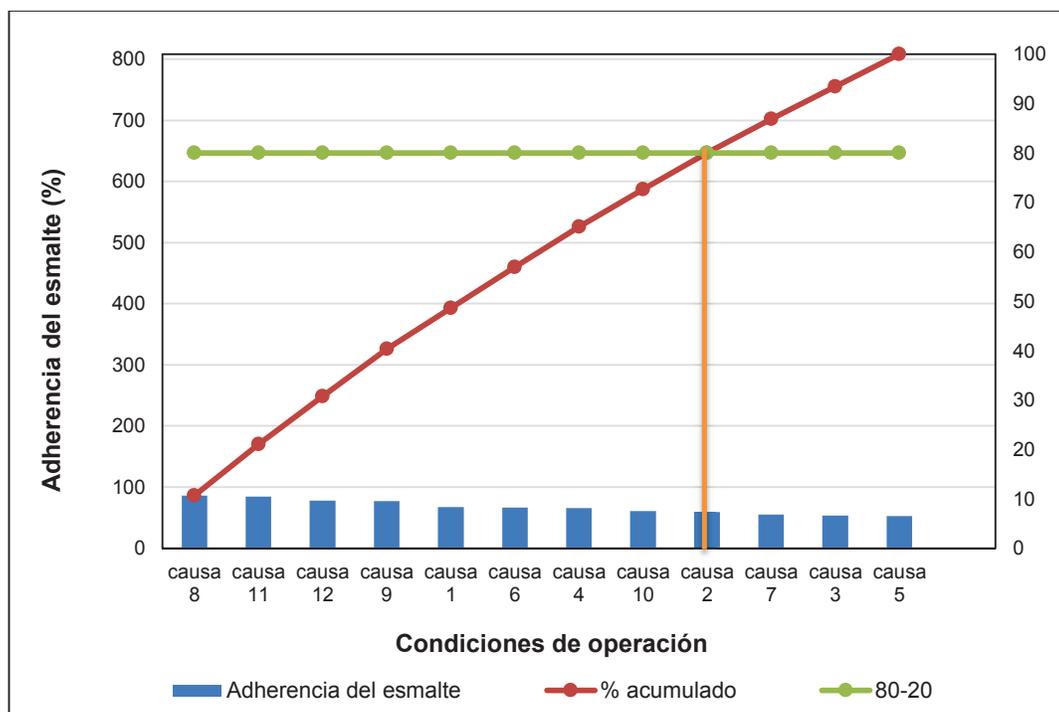


Figura 3.14. Diagrama de Pareto

Del análisis de la Figura 3.14, se observa que el diagrama de Pareto se divide en dos partes por medio de la línea color naranja. A la izquierda se encuentran los eventos que influyen en un 80 % sobre la adherencia del esmalte y estos son:

concentración del hidróxido de sodio del 10%; temperatura del decapado de 50 °C; tiempo de decapado de 2 min; concentración del ácido crómico en el rango de 3,0 – 10,0 % y tiempo de anodizado en el rango de 35 – 39 minutos. A la izquierda de la línea naranja se encuentran los eventos que ejercieron una influencia del 20 % sobre la adherencia del esmalte.

Se destaca que el incremento en la adherencia del esmalte se consiguió con un proceso de anodizado realizado con un baño electrolítico de ácido crómico del 3,0 % y un tiempo de 35 minutos, con estas dos condiciones se obtuvo un 84 % de adherencia aproximadamente.

3.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL DECAPADO Y DEL ANODIZADO SOBRE LA ADHERENCIA ENTRE EL ALUMINIO 1100 Y EL ESMALTE PORCELÁNICO

3.3.1 DETERMINACIÓN DE LA RETENCIÓN DE ESMALTE

En la Tabla 3.33 se presentan los resultados de la placa cubierta con esmalte porcelánico. Previamente la placa fue lijada, desengrasada y decapada con las mejores condiciones de operación determinadas anteriormente en la Sección 3.1.

Tabla 3.33. Características del esmalte sobre las placas de aluminio 1100 previamente decapadas

Procesos previos	Características		Placa esmaltada
Lijado Desengrasado Decapado	Superficie al tacto: Defectos:	Parcialmente rugosa Burbujas internas	

En la Tabla 3.33 se puede observar que la cobertura de la placa es del 97 %, adicionalmente presenta brillo, el espesor del esmalte porcelánico no es homogéneo y presenta una superficie rugosa debido a la presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa.

En la Tabla 3.34 se presentan los resultados de la placa cubierta con esmalte porcelánico. Previamente la placa fue lijada, desengrasada, decapada y anodizada con las mejores condiciones de operación determinadas anteriormente en las Secciones 3.1 y 3.2 para los procesos de decapado y anodizado respectivamente.

Tabla 3.34. Características del esmalte sobre la placa de aluminio 1100 previamente decapada y anodizada

Procesos previos	Características		Placa esmaltada
Lijado Desengrasado Decapado Anodizado Sellado	Superficie al tacto: Defectos:	Lisa Ninguno	

La superficie esmaltada que se muestra en la Tabla 3.34 presenta brillo, esto se debe a que la placa fue sometida a los procesos de decapado y anodizado, con lo cual se obtiene una superficie más lisa y homogénea.

La irregularidad de la superficie esmaltada, posiblemente se debió a la aplicación del esmalte, puesto que al espolvorear el esmalte en polvo sobre la superficie metálica la capa quedó muy gruesa lo que impidió que el esmalte no tenga un proceso de cocción adecuado con lo que se obtiene una superficie esmaltada no homogénea, este resultado coincidió con lo que indica Vielhaber (2002) en su obra sobre esmaltado de piezas metálicas (p. 115). Se concluye en que el proceso de cocción no fue el adecuado.

Los componentes del esmalte que se aplicó sobre la superficie metálica, únicamente fueron molidos manualmente, tamizados y mezclados. Al aplicar el esmalte no se garantizó una composición igual en toda la superficie metálica, ya que la mezcla no fue regular y la granulometría de sus componentes fue distinta puesto que el grado de molienda fue irregular.

Como resultado se obtuvo un esmaltado no homogéneo. El estudio realizado por Morales (2005) concuerda con los resultados que se obtuvieron durante la evaluación. (p. 314).

Otra de las causas de los defectos del esmalte fue la irregularidad de las placas metálicas, puesto que en el proceso de corte el diseño geométrico de la pieza no fue regular, por lo tanto el esmalte cubrió unas zonas y otras no. Este resultado coincidió con lo que se indica en la obra de Morales (2005) sobre el esmaltado y la irregularidad de las piezas esmaltadas (p. 314).

Con el fin de evaluar cuantitativamente la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio, se realizaron pruebas de impacto a cada placa esmaltada. En la Tabla 3.25 se indican los valores de las masas de las esferas utilizadas en la prueba, las alturas a las que fueron lanzadas sobre la placa y la energía del impacto.

Las pruebas se efectuaron a través de un método diseñado en el Laboratorio de Producción de Vidrio de la EPN (Mera, Vásquez, Bolaños y Oscullo, 2008, p. 91), siguiendo la norma ASTM E 23-16 *Métodos de prueba estándar para ensayos de impacto de barras con muesca de materiales metálicos* (ASTM International, 2014b, p. 2). En el Anexo IV se encuentran los criterios para la evaluación de la adherencia del esmalte porcelánico.

En la Tabla 3.35 se presentan los valores de energía aplicadas a las placas de aluminio para la evaluación de la resistencia al impacto que presentó el esmalte, para determinar estos valores se utilizó la Ecuación 2.7 de este documento.

Tabla 3.35. Energía aplicada a la placa de aluminio durante el ensayo de resistencia al impacto

Masa de la esfera (kg)	Altura (m)	Energía (erg)
6,86 x10 ⁻²	0,5	3,36E+06
	1,0	6,72 E+06
	1,5	10,08 E+06
9,48 x 10 ⁻²	0,5	4,65 E+06
	1,0	9,29 E+06
	1,5	13,94 E+06

En la Tabla 3.36 se presentan los resultados del ensayo de resistencia al impacto de la placa previamente lijada, desengrasada y decapada con las mejores condiciones de operación que se obtuvieron en la sección 3.1 para el decapado.

Tabla 3.36. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto de la placa decapada con las mejores condiciones de operación

Energía de impacto (erg)	Placa inicial	Placa final	Criterio de adherencia
4,65 E+06			Adherencia excelente 4
9,29 E+06			Adherencia excelente 4

Tabla 3.36. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto de la placa decapada con las mejores condiciones de operación (**continuación...**)

Energía de impacto (erg)	Placa inicial	Placa final	Criterio de adherencia
13,94 E+06			Adherencia buena 3

A través de la comparación de los resultados obtenidos que se presentan en la Tabla 3.6 con los de la Figura AIV.1 que se presenta en el Anexo IV y con los criterios de evaluación que se indican en la Tabla AIV.1, se determinó la adherencia del esmalte sobre la superficie metálica por medio de la resistencia al impacto. La huella que presenta la placa en donde se realizó el impacto con mayor energía, presentó un diámetro mayor, por lo tanto, la adherencia del esmalte es buena. Sin embargo, la energía aplicada en cada caso no generó daños mayores en la superficie esmaltada.

En la Tabla 3.37 se presentan los resultados del ensayo de resistencia al impacto de la placa previamente lijada, desengrasada, decapada anodizada y sellada con las mejores condiciones de operación que se obtuvieron en las Secciones 3.1 y 3.2 para el decapado y anodizado respectivamente.

Al comparar los resultados obtenidos que se presentan en la Tabla 3.37 con los de la Figura AIV.1 que se encuentra en el Anexo IV y con los criterios de evaluación que se encuentran en la Tabla AIV.1, se determinó la adherencia del esmalte sobre la superficie metálica, la huella de la placa en donde se realizó el impacto no causó un gran daño a la placa esmaltada, por lo tanto se dice que la adherencia del esmalte es excelente.

Tabla 3.37. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto de la placa decapada y anodizadas con las mejores condiciones de operación

Energía de impacto (erg)	Placa inicial	Placa final	Criterio de adherencia
4,65 E+06			Adherencia excelente 4
9,29 E+06			Adherencia excelente 4
13,94 E+06			Adherencia excelente 4

Al comparar los resultados de las Tablas 3.36 y 3.37 se observa que las placas que fueron únicamente decapadas no presentaron una adherencia excelente, ya que al aplicar mayor energía de impacto, no causaron daños severos en el esmalte, pero la marca fue de un mayor diámetro.

En el caso de las placas anodizadas y decapadas, las marcas luego del ensayo al impacto, no fueron notorias y por lo tanto la adherencia del esmalte fue excelente.

Se concluyó que las piezas metálicas deben ser preparadas cuidadosamente para ser esmaltadas, realizando un perfecto desengrasado y limpieza de la superficie ya que la calidad del acabado depende de esta operación.

Defectos tales como descascarillamiento, grietas, baja adherencia, escamado pueden deberse a una inadecuada preparación de las superficie metálica como se recomienda en la obra de Estrada y Jiménez (2010) para el tratamiento superficial de piezas de aluminio antes de ser esmaltadas (p. 124).

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Los métodos de limpieza en los que se realizan tratamientos mecánicos como el lijado, en combinación con los tratamientos químicos que incluyan: desengrasado, decapado, anodizado y sellado permiten obtener capas de esmalte con excelente resistencia al impacto y una adherencia promedio del $86,34 \pm 1,93$ %.
- Al incrementar los valores de las variables de operación del proceso de decapado que son: concentración de hidróxido de sodio, temperatura y tiempo dentro de los rangos de: 10,0 – 15,0 %; 50 – 60 °C y 2 – 5 minutos respectivamente, se obtuvo como resultado la disminución de la adherencia del esmalte y presencia de fallas en la capa porcelánica principalmente puntos negros y superficie no homogénea.
- Con el aumento de los valores de las variables de operación del procesos de anodizado que son: concentración de ácido crómico y tiempo dentro de los rangos de: 3,0 – 10,0 % y 35 - 39 minutos respectivamente la cantidad de esmalte adherido a la superficie metálica disminuyó y la cantidad de fallas en la capa porcelánica aumentó, entre las que se destacan presencia de puntos negros y superficie no homogénea.
- Un proceso de tratamiento superficial de placas de aluminio 1100 que incluya pulido mecánico, decapado, anodizado y sellado, permite obtener capas de esmalte con excelente resistencia al impacto, en comparación con los procesos de limpieza en los que únicamente se realiza el pulido mecánico y decapado.

4.2 RECOMENDACIONES

Considerando que el presente trabajo constituye uno de los primeros dentro del esmaltado de piezas de aluminio y por los resultados obtenidos se sugiere lo siguiente:

- Realizar el estudio del efecto del número de capas de aplicación del esmalte con la resistencia al impacto y la calidad de la superficie del esmalte luego de la cocción.
- Realizar un estudio de factibilidad económica por los resultados obtenidos y compararlos con los resultados que se obtendrían si se utilizara ácido sulfúrico en el baño de anodizado.
- Comparar la calidad de la superficie anodizada con distintos tipos de ácidos y a diferentes concentraciones

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aparicio, C; Manero, J; Rodriguez, D; Domenech, A; Arandés, P y Planell, J. (2001). Aleaciones ligeras. (1 era. ed.). Barcelona: Ediciones UPC. Recuperado de: <https://books.google.com.ec/books?id=CxGiCgAAQBAJ&pg=PA13&dq=propiedades+del+aluminio&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwib59XVsubTAhUHbSYKHd-9A3AQ6AEINDAE#v=onepage&q=propiedades%20del%20aluminio&f=false>. (Abril, 2017).
2. ASTM International. (2014a). Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber Wheel apparatus. Recuperado de: <http://compass.astm.org/download/B916.01.pdf> (Octubre, 2013).
3. ASTM International. (2014b). Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. Recuperado de: <http://compass.astm.org/download/E23.16.pdf> (Octubre, 2013).
4. Barros, S. e Ibáñez, J. (2014). Introducción al conocimiento de materiales. (1era. ed.). España: Uned.
5. Barros, S., Gil, J. y Camacho, A. (2010). Introducción al conocimiento de los materiales y sus aplicaciones. (2 da. Ed.). España: Uned.
6. Bilurbina, L.; Iribarre, J. y Liesa, F. (2003). Corrosión y protección. Recuperado de: <https://books.google.com.ec/books?id=jMzAenR2UHkC&pg=PA13&dq=corrosion+metalica&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiHy9jjpavRAhUEQCYKHbneBSIQ6AEINzAE#v=onepage&q=corrosion%20metalica&f=false> (Enero, 2017).
7. Canales, C. (2009). Guía sobre las mejores técnicas disponibles en España del sector de tratamiento de superficies metálicas y plásticas. Recuperado de: <http://www.prtr-es.es/data/images/MTD-SUPERFICIES-METALICAS.pdf> (Octubre, 2013).

8. Cembrero, J., Ferrer, C., Pascual, M. y Pérez, M. (2005). Ciencia y tecnología de materiales: Problemas y cuestiones. (1 era. ed.). Madrid, España: Prentice Hall.
9. Coca, P. (2004). Manual del aluminio. (2da. ed.). Barcelona, España: Reverté.
10. Cortés, J. (2007). Técnicas de previsión de riesgos laborales: seguridad e higiene del trabajo. (9 na. ed.). Madrid: Tébar.
11. Davis, J. (2000). Corrosion of aluminum and aluminum alloys. (1 era ed.). Estados Unidos: ASM International
12. De la Torre, E., Guevara, A., Yépez, S. (2009). Influencia de sales de cloro y flúor en el reciclaje de aluminio por fusión. Revista Politécnica, 30(1), 37-45. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5517> (Marzo, 2015).
13. de Santis, A. (2015). Análisis de fallos en sistemas aeronáuticos. (1 era. ed.). España: Paraninfo. Recuperado de: <https://books.google.com.ec/books?id=TdE3DQAAQBAJ&pg=PA39&dq=nomenclatura+de+las+aleaciones+de+aluminio&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjVlcuUyvDTAhVM1CYKHVH6A7UQ6AEIQjAG#v=onepage&q=nomenclatura%20de%20las%20aleaciones%20de%20aluminio&f=false>. (Mayo, 2017).
14. DeGarmo, E., Black, J. y Kohser, R. (2002). Materiales y procesos de fabricación. (2da. Ed.). España: Reverté.
15. Estévez, I. (2008). Influencia de la concentración de sulfato de níquel en la adherencia de esmaltes porcelánicos tipos capas base para recubrimientos de láminas de acero (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). EPN. Quito. Ecuador.

16. Estrada, D. y Jiménez, I. (2010). Esmaltes sobre aluminio. Recuperado de: <http://boletines.secv.es/upload/197413123.pdf> (Octubre, 2013).
17. Ferrer, C. y Amigó, V. (2003). Tecnología de materiales. (1 era. ed.). Valencia: UPV
18. Ferrer, S. (2011). Corrosión y protección metálicas. (1 era. ed.). España: Raycar.
19. Franquesa, R y Mulero, M. (2010). Mejora del defecto de pinhole en la porcelana sanitaria (Memoria presentada para optar al título de Ingeniería Técnica Industrial Especialidad Química Industrial no publicada). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. (Julio, 2017).
20. Galván, V., Soriano, M., Elson, C. (2005). Materiales metálicos. (1era. ed.). Valencia: UPV.
21. García, J; Navarro, J; Águeda, E; Gómez, T. (2010). Tratamiento y recubrimiento de superficies. (1 era. ed.). España: Paraninfo, SA. Recuperado de: <https://books.google.com.ec/books?id=JJV71U3Zlw8C&pg=PA131&dq=proteccion+por+recubrimientos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjg57ORke3SAhXBsVQKHai0AW0Q6AEINTAF#v=onepage&q=proteccion%20por%20recubrimientos&f=false>. (Marzo, 2017)
22. García, J; Navarro, J; Águeda, E. (2005). Automatización: Elementos amovibles y fijos no estructurales. (1 era. ed.). España: Paraninfo SA. Recuperado de: <https://books.google.com.ec/books?id=INliNwh5ug8C&pg=PA58&dq=%E2%80%A2+Aleaciones+de+forja+no+tratables+t%C3%A9rmicamente&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj13bWD6OzSAhVIYiYKHS eGD5QQ6AEIMzAE#v=onepage&q=%E2%80%A2%20Aleaciones%20de%20forja%20no%20tratables%20t%C3%A9rmicamente&f=false>. (Marzo, 2017)

23. Ghali, E. (2010). Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys. (1 era. ed.). Hoboken: Wiley.
24. Giachino, J. y Weeks, W. (2007). Técnica y práctica de la soldadura. (1 era. ed.). España: Reverté.
25. Gómez de León, F. y Alcaraz, D. (2004). Manual básico de corrosión para ingenieros. Recuperado de: https://books.google.com.ec/books?id=B6tV_j4ofmQC&pg=PA13&dq=corrosion&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwigiJWY oqvRAhUB7iYKHez6AdgQ6AEIHjAA#v=onepage&q=corrosion&f=false (Enero, 2017).
26. Gonzalo, L. (2008). Obtención y caracterización de bohemita a partir de un residuo peligroso de la industria del aluminio. (Tesis de maestría). Recuperado <http://digital.csic.es/handle/10261/6195> (Marzo, 2015).
27. Guerrero, V.; Dávila, J.; Gales, S.; Pontón, P.; Rosas, N.; Sotomayor, V. y Valdivieso, C. (2011). Nuevos Materiales: Aplicaciones estructurales e industriales. (1 era ed.). ISBN: 978-9978-383-20-9 (Septiembre, 2016).
28. Henley, V. (2013). Anodic oxidation of aluminum and its alloys. (1era. ed.). Inglaterra: Pergamon press.
29. Ibars, J. (2007). Aluminio y Aleaciones de aluminio. (Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Química). Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/329178819/Aleaciones-de-Aluminio-t>. (Febrero, 2007)
30. Kalpakjian, S y Schmid, S. (2002). Manufactura: Ingeniería y tecnología. (4ta.ed.). México: Prentice Hall.
31. Keijzer, H. (2004). Manual del aluminio anodizado. (4ta. ed.). España: Reverté.

32. Lizarbe, R. (2010), Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión, Madrid, España: GRAFIMAD.
33. López, V; Otero, E; Escudero, E y González, J. (2001). Comportamiento del aluminio anodizado en exposiciones atmosféricas de larga duración. Recuperado de: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/posadas/trabajos/1509.pdf> (Enero, 2017).
34. Mantell, C. (2003). Ingeniería electro-química. (4ta. ed.). España: Reverté.
35. Marín, C. (2014). Pretratamiento de superficies metálicas: El primer paso para la calidad. Revista Metal Actual, 27(1), 54-60. Recuperado de http://www.metalactual.com/revista/27/recubrimientos_pretrata.pdf (Marzo, 2015).
36. Mera, L; Vásquez, P; Bolaños, S y Oscullo, L. (2008). Restauración del vidrio de desecho para preparar esmaltes porcelánico de primera capa. Revista Politécnica. 1(1), 86-94.
37. Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2014). Industrias Estratégicas: Propuesta ecuatoriana para desarrollar sus Industrias Estratégicas. Recuperado de: <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/11/INDUSTRIAS-ESTRATE%CC%81GICAS-ESPAN%CC%83OL.pdf> (Septiembre, 2016).
38. Morales, J. (2005). Tecnología de los Materiales Cerámicos. (1era. ed.). España: Díaz de Santos. Recuperado de: https://books.google.com.ec/books?id=TuWaxjnVOqIC&pg=PA312&dq=defectos+en+el+esmaltado&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiQ0I_dre_SAhXF6yYKHX4vDt0Q6AEIPzAH#v=onepage&q=defectos%20en%20el%20esmaltado&f=false. (Marzo, 2017)

39. Morral, F., Jimeno, E. y Molera, P. (2004). Metalurgia general. (1era. ed.). España: Reverté.
40. Navarro, A. (2011). Seguridad estructural en fachadas de vidrio y aluminio. (Tesis de maestría). Recuperado de Red federada de repositorios institucionales de publicaciones científicas. (id. MX_3fcb0eff4479d2a54118d2f7a87f9643).
41. Odetti, H y Bottani, E. (2006). Introducción a la química inorgánica. (3ra. ed.). Santa Fe, Argentina: UNL.
42. Ortega, J. (1990). Corrosión industrial. Recuperado de: https://books.google.com.ec/books?id=x8HntTZQ3RwC&printsec=frontcover&dq=Corrosi%C3%B3n+industrial&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj_raiWy_UAhUBRyYKHbneDsgQ6AEIIDA#v=onepage&q=Corrosi%C3%B3n%20industrial&f=false. (Julio, 2017)
43. Pancorbo, F. (2011). Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación. (1 era. ed.). España: Marcombo.
44. Robinson, B. (2010). Química. (1era. ed.). España: Reverté.
45. Rodríguez, J., Castro, L., del Real, J. (2012). Procesos industriales para materiales no metálicos. (2da ed.). Madrid, España: Visión Net.
46. Rubinos, D. (2007). Utilización de lodos rojos de bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligrosos (Disertación doctoral). Recuperada de la base de datos de Tesis Doctorales en Red. (id. 978-84-9887-152-4).
47. Silva, A. y Cevallos, V. (2012). Manual para recubrimientos utilizados en mantenimiento industrial y de edificios sus características y aplicaciones. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero

- industrial, Mención Mantenimiento publicado). Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador. (Septiembre, 2016).
48. Smith, W y Hashemi, J. (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. (4ta. ed.). México, D. F.: McGraw-Hill.
 49. Stanga, M. (2010). Sanitation: cleaning and disinfection in the food industry. Recuperado de: <https://books.google.com.ec/books?id=ftXqJBjO2Q8C&pg=PA50&dq=Aluminum+etching+with+soda+process&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiaz-uQle7UAhVL5iYKHQcmB5MQ6AEINTAD#v=onepage&q&f=false>. (Julio, 2017).
 50. Totten, G. y Scott, D. (2003). Handbook of aluminum: Alloy production and materials manufacturing. (1era. ed.). New York: Marcel Dekker.
 51. Treybal, R. (1980). Operaciones de Transferencia de Masa (2 da. ed.). USA: McGraw-Hill
 52. Vergara, A. (2010). Influencia de las variables de operación del proceso de anodizado del aluminio sobre el comportamiento anticorrosivo de la película de óxido de aluminio. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Máster en Ingeniería de procesos). Perú. (Febrero, 2017)
 53. Vielhaber, L. (2002). Tecnología de los esmaltes. (1era. ed.). España: Reverté
 54. Yáñez, E. (2014). Estudio de la dosificación de los óxidos de litio y boro en función de la temperatura de maduración de un esmalte porcelánico elaborado para recubrir piezas de aluminio; (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química). Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7302/1/CD-5396.pdf>. (Marzo, 2015).

ANEXOS

ANEXO I

DETERMINACIÓN DE LA CAPTACIÓN Y EL ESPESOR DEL ESMALTE SOBRE LA PIEZA DE ALUMINIO

Ejemplo de cálculo de la captación del esmalte

Para determinar el la captación de esmalte y su espesor, se utilizaron las Ecuaciones All.1 y All.2 respectivamente (Yáñez, 2014, p. 110)

$$\text{Captación} = \frac{\text{Peso retenido (g)}}{\text{Área cubierta (cm}^2\text{)}} \quad [\text{All. 1}]$$

$$\text{Peso retenido} = \text{Peso}_{\text{placa+esmalte}} - \text{Peso}_{\text{placa}} \quad [\text{All. 2}]$$

$$\text{Peso}_{\text{placa+esmalte}} = 2,2990 \text{ g}$$

$$\text{Peso}_{\text{placa}} = 1,6385 \text{ g}$$

$$\text{Área cubierta} = 1,2465 \text{ dm}^2$$

$$\text{Peso retenido} = 2,2990 \text{ g} - 1,6385 \text{ g} = 0,6605 \text{ g}$$

$$\text{Captación} = \frac{0,6605 \text{ g}}{1,2465 \text{ dm}^2} = 0,5299 \frac{\text{g}}{\text{dm}^2}$$

Ejemplo de cálculo del espesor del esmalte

Se utilizó la Ecuación All.3 para determinar el espesor de la capa de esmalte (Yáñez, 2014, p. 105)

$$\text{Espesor} = \text{Espesor}_{\text{placa+esmalte}} - \text{Espesor}_{\text{placa}} \quad [\text{All. 3}]$$

$$\text{Espesor}_{\text{placa+esmalte}} = 0,7720 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor}_{\text{placa}} = 0,7112 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor} = 0,0608 \text{ mm}$$

ANEXO II

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LOS PROCESOS DE DECAPADO Y ANODIZADO SOBRE LA ADHERENCIA DEL ESMALTE PORCELÁNICO

Para la evaluación se utilizó el programa STATGRAPHIC con el cual se realizó un análisis estadístico de la varianza para determinar las variables que tuvieron mayor influencia sobre la adherencia del esmalte.

En la Figura AII.1 se muestra un ejemplo de los atributos para la creación del diseño experimental al azar. Para este caso se evaluó el efecto de la concentración de hidróxido de sodio sobre la adherencia del esmalte.

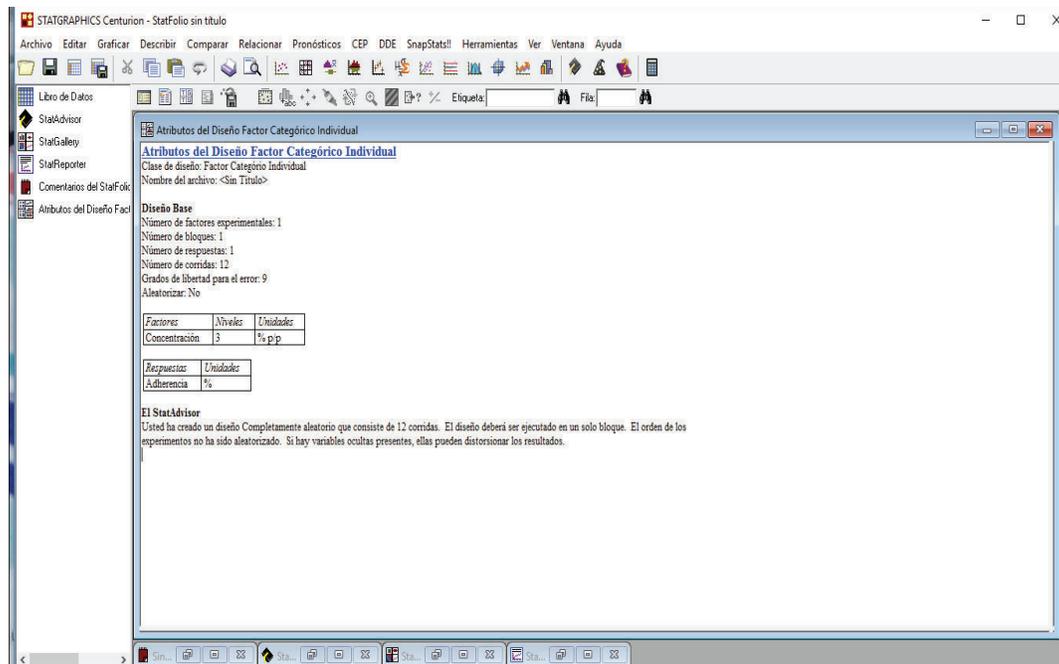


Figura AII.1. Atributos de diseño experimental al azar

ANEXO III

CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE PARETO

Para realizar el diagrama de Pareto se deben identificar las causas que afectan la variable de estudio que en este caso es el porcentaje de adherencia del esmalte. En la Tabla AIII.1 se muestran los eventos que afectaron la adherencia del esmalte con sus respectivos valores de frecuencia, ordenados en forma descendente.

Tabla AIII.1. Eventos que afecta la adherencia del esmalte

Eventos	Adherencia del esmalte (frecuencia)
Concentración de hidróxido de sodio 3,0 %	86,34
Tiempo de anodizado 35 min	84,23
Tiempo de anodizado 39 min	77,76
Concentración del ácido crómico 7,5 %	77,36
Concentración de hidróxido de sodio 10,0 %	67,06
Tiempo de decapado 2 min	66,8
Temperatura de decapado 50 °C	66,17
Concentración del ácido crómico 10,0 %	61,23
Concentración de hidróxido de sodio 12,5 %	59,37
Tiempo de decapado 5 min	55,51
Concentración de hidróxido de sodio 15,0 %	53,25
Temperatura de decapado 60 °C	53,02

Se determina el valor total de las frecuencias con la Ecuación AIII.1

$$V_t = \sum_{i=1}^n f_i ; i = 1,2,3, \dots, n$$

[AIII. 1]

Donde:

V_t = valor total

f = frecuencias

n = número total de eventos

Luego se calcula el porcentaje de cada frecuencia con la Ecuación AIII.2

$$P_i = \frac{f_i}{V_t} \times 100\% ; i = 1,2,3, \dots, n \quad [\text{AIII. 2}]$$

Donde:

P_i = valor porcentual de cada frecuencia

V_t = valor total

f = frecuencias

n = número total de eventos

Después se determina el porcentaje acumulado con la Ecuación AIII.3

$$F_i = F_{i-1} + P_i ; i = 1,2,3, \dots, n ; F_0 = 0 \quad [\text{AIII. 3}]$$

Donde:

F_i = porcentaje acumulado

P_i = valor porcentual de cada frecuencia

n = número total de eventos

Al final se realizan en la misma área de la imagen: una gráfica de barras para las frecuencias en función del número de eventos y otro gráfico de dispersión X-Y para el porcentaje acumulado versus número de eventos como se indica en la Figura 3.14.

ANEXO IV

CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA DEL ESMALTE PORCELÁNICO SOBRE LA SUPERFICIE DE ALUMINIO SEGÚN LA NORMA ASTM B 219

En la Figura AIV.1 se presentan los tipos de círculos concéntricos que se forman sobre las superficies recubiertas, estos permiten determinar la adherencia al compararlos con los patrones de la norma ASTM B219 (Yáñez, 2014, p. 103)

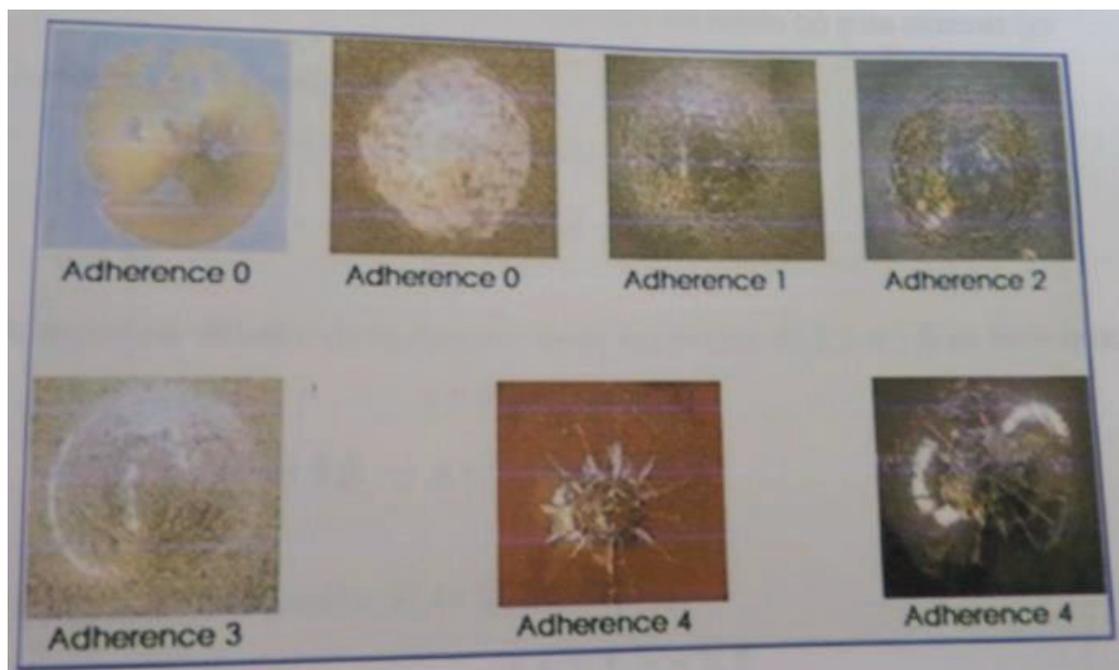


Figura AIV.0.1. Tipos de círculos concéntricos formados en las pruebas de resistencia al impacto (Yáñez, 2014, p. 103)

En la Tabla AIV.1 se presentan los criterios utilizados para la evaluación de la adherencia del esmalte para las pruebas de impacto bajo la norma ASTM B219 (Yáñez, 2014, p. 103)

Tabla AIV.1. Criterios para la evaluación de la adherencia del esmalte porcelánico en la prueba de resistencia al impacto

Valoracion	Criterio
Adherencia mala = 0	El esmalte porcelánico se desprende de la placa
Adherencia media = 1	El impacto tiene forma de círculos concéntricos acentuados
Adherencia media = 2	El impacto tiene forma de círculos concéntricos medianamente acentuados
Adherencia buena = 3	El impacto no presenta círculos
Adherencia excelente = 4	El impacto producido sobre la placa esmaltada es una ligera cuarteadura en forma de una estrella

(Mera, Vásquez, Bolaños y Oscullo, 2008, p. 91)