

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**FORMULACIÓN DE ESMALTES PORCELÁNICOS PARA
ALUMINIO UTILIZANDO VIDRIO DE DESECHO**

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

DIANA ESTEFANÍA YÁNEZ SEVILLA
diana.yanez@est.epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. LUIS FERNANDO MERA SILVA
luis.mera@epn.edu.ec

Quito, febrero 2014

© Escuela Politécnica Nacional (2014)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Diana Estefanía Yánez Sevilla, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal; 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 normativa institucional vigente.

Diana Estefanía Yánez Sevilla

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diana Estefanía Yáñez Sevilla, bajo mi supervisión.

Ing. Luis Mera Silva
DIRECTOR DEL PROYECTO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	xiv
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Obtención y acabado de piezas de aluminio para uso de cocina	1
1.1.1 Proceso de obtención de aluminio a escala industrial	1
1.1.1.1 Proceso Bayer	1
1.1.1.2 Proceso Hall Héroult	5
1.1.2 Valores de producción mundial del aluminio	7
1.1.3 Métodos de procesamiento	9
1.1.3.1. Fundición	9
1.1.3.2. Laminación	10
1.1.3.3. Extrusión	10
1.1.4 Tipos de acabado superficial	11
1.1.4.1. Tratamiento superficial mecánico	11
1.1.4.2. Tratamiento superficial químico	12
1.2 Reciclaje de vidrio	15
1.2.1 Características del vidrio	16
1.2.2 Importancia del reciclaje	18
1.2.3 Proceso de reciclaje	19
1.3 Recubrimientos porcelánicos de bajo punto de fusión	21
1.3.1. Características de los esmaltes	21
1.3.1.1 Influencia de las materias primas en las propiedades del esmalte	22
1.3.1.2 Fórmula molecular	26
1.3.2 Esmaltes porcelánicos para recubrir aluminio	27
1.3.2.1 Esmaltes plúmbicos	27
1.3.2.2 Esmaltes aplúmbicos	28
1.3.3 Proceso de esmaltado	30
1.3.3.1 Preparación de la superficie	30
1.3.3.2 Obtención del esmalte	30
1.3.3.3 Aplicación del esmalte	31
1.3.3.4 Cocción del esmalte	31
2. PARTE EXPERIMENTAL	33
2.1 Estudio del efecto de la relación del vidrio de desecho con el fluoruro de sodio en la temperatura de fusión de la mezcla de materias primas	33
2.1.1 Preparación de pastillas con la mezcla de materias primas	33

2.1.1.1	Formulación de la mezcla de materias primas	33
2.1.1.2	Preparación de las materias primas	34
2.1.1.3	Prensado	36
2.1.2	Cocción de las pastillas	36
2.1.3	Evaluación del porcentaje de fase vítrea	37
2.2	Determinación de la temperatura de maduración y el tiempo de maduración del esmalte como recubrimiento de piezas de aluminio	38
2.2.1	Preparación de las piezas de aluminio	38
2.2.2	Obtención del esmalte	40
2.2.3	Aplicación y cocción del esmalte	41
2.3	Evaluación del efecto de la relación molar entre el carbonato de litio y el fluoruro de sodio en la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio	43
2.3.1	Preparación de los esmaltes	44
2.3.1.1	Formulación de los esmaltes	44
2.3.1.2	Obtención de los esmaltes	44
2.3.2	Aplicación y cocción de los esmaltes	44
2.3.3	Evaluación de la adherencia del esmalte sobre la superficie	44
2.4	Diseño del proceso de obtención del esmalte porcelánico para recubrir piezas de aluminio	45
2.4.1	Molienda de materias primas	46
2.4.2	Dosificación y mezcla de materias primas	47
2.4.3	Fusión de mezcla de materias primas	47
2.4.4	Atronado del esmalte	48
2.4.5	Lavado y secado del esmalte	49
2.4.6	Molienda del producto final	49
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
3.1	Estudio del efecto de la relación del vidrio de desecho con el fluoruro de sodio en la temperatura de fusión de la mezcla de materias primas	50
3.1.1	Formulación y dosificación de las mezclas de materias primas	50
3.1.1.1	Formulación	50
3.1.1.2	Dosificación de las materias primas	51
3.1.1.3	Tratamiento térmico	52
3.1.2	Evaluación de la cocción de las pastillas	53
3.2	Determinación de la temperatura de maduración y el tiempo de maduración del esmalte como recubrimiento de piezas de aluminio	64
3.2.1	Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E-III	66
3.2.2	Determinación del tiempo de maduración para el esmalte E-III	70
3.3	Evaluación del efecto de la relación molar entre el carbonato de litio y el fluoruro de sodio en la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio	73

3.3.1	Formulación de los esmaltes	74
3.3.2	Dosificación de las materias primas	75
3.3.3	Evaluación de la adherencia del esmalte con la superficie	76
3.4	Diseño del proceso de obtención del esmalte porcelánico para recubrir piezas de aluminio	86
3.4.1	Molienda de las materias primas	86
3.4.2	Dosificación y mezclado de las materias primas	91
3.4.3	Fusión de las materias primas	92
3.4.4	Atronado del esmalte	93
3.4.5	Descarga y secado del esmalte	93
3.4.6	Molienda final del esmalte	94
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
4.1	Conclusiones	100
4.2	Recomendaciones	101
	BIBLIOGRAFÍA	102
	ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Composición del baño electrolítico	6
Tabla 1.2.	Producción total de Aluminio	8
Tabla 1.3.	Operaciones para el tratamiento superficial mecánico del aluminio	11
Tabla 1.4.	Propiedades físico-químicas del vidrio	17
Tabla 1.5.	Clasificación de las materias primas	23
Tabla 1.6.	Tipos de feldespatos	23
Tabla 1.7.	Fórmula molecular del esmalte según Seger	26
Tabla 1.8.	Composición de esmaltes para aluminio	29
Tabla 2.1.	Composición base de la mezcla de materias primas	34
Tabla 2.2.	Lista de mezclas y temperaturas de los experimentos realizados en la cocción de las pastillas	37
Tabla 2.3.	Ciclo de cocción aplicado al esmalte	42
Tabla 2.4.	Resumen de experimentos realizados a diferentes temperaturas de maduración	43
Tabla 2.5.	Resumen de experimentos realizados a diferentes tiempos de maduración	43
Tabla 3.1.	Mezclas con diferente relación VidrioNaF	50
Tabla 3.2.	Composiciones de las mezclas con diferente relación entre el vidrio de desecho y el fluoruro de sodio	51
Tabla 3.3.	Dosificación de las materias primas utilizadas en las mezclas vitrificables	51
Tabla 3.4.	Tratamiento térmico aplicado a las pastillas	52
Tabla 3.5.	Mezcla C-I luego de los diferentes tratamientos térmicos	53
Tabla 3.6.	Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-I con diferentes tratamientos térmicos	54
Tabla 3.7.	Mezcla C-II luego de los diferentes tratamientos térmicos	55

Tabla 3.8.	Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-II con diferentes tratamientos térmicos	56
Tabla 3.9.	Mezcla C-III luego de los diferentes tratamientos térmicos	57
Tabla 3.10.	Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-III con diferentes tratamientos térmicos	58
Tabla 3.11.	Mezcla C-IV luego de los diferentes tratamientos térmicos	59
Tabla 3.12.	Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-IV con diferentes tratamientos térmicos	60
Tabla 3.13.	Mezcla C-V luego de los diferentes tratamientos térmicos	60
Tabla 3.14.	Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-V con diferentes tratamientos térmicos	61
Tabla 3.15.	Mezcla C-VI luego de los diferentes tratamientos	62
Tabla 3.16.	Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-VI con diferentes tratamientos térmicos	63
Tabla 3.17.	Rampa de temperatura del ciclo de cocción	64
Tabla 3.18.	Resultados de las pruebas de esmaltado con E-III a diferentes temperaturas de maduración y tiempo de maduración 10 min	67
Tabla 3.19.	Consideraciones para asignación de calificación de parámetros del esmalte	69
Tabla 3.20.	Resultados de la evaluación de las placas esmaltadas con diferentes temperaturas de maduración	70
Tabla 3.21.	Resultados de las pruebas de esmaltado con E-III con temperatura de maduración de 600 °C a diferentes tiempos de maduración	71
Tabla 3.22.	Resultados de la evaluación de las placas esmaltadas con diferentes tiempos de maduración	72
Tabla 3.23.	Fórmula molecular del esmalte E-III	74
Tabla 3.24.	Esmaltes formulados con diferentes relaciones molares entre Li_2CO_3 y NaF	75
Tabla 3.25.	Dosificación de las materias primas para obtener 40 g de esmalte	75
Tabla 3.26.	Resultados de las placas recubiertas con esmalte E-IIIa	76

Tabla 3.27.	Resultados de las placas recubiertas con esmalte E-IIIb	77
Tabla 3.28.	Resultados de las placas recubiertas con esmalte E-IIIc	78
Tabla 3.29.	Energías aplicadas en la determinación de la resistencia al impacto	79
Tabla 3.30.	Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIa	79
Tabla 3.31.	Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIb	82
Tabla 3.32.	Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIc	84
Tabla 3.33.	Características del molino de martillos requerido para la molienda del vidrio	87
Tabla 3.34.	Granulometría inicial de las materias primas para producción de esmalte	87
Tabla 3.35.	Especificaciones del tamiz vibratorio a la salida del molino de martillos para el vidrio de desecho	88
Tabla 3.36.	Pérdida de masa durante la fusión de la mezcla de materias primas	88
Tabla 3.37.	Índice de Bond y cantidades de materias prima a tratar para la obtención de 100 kg/día de esmalte	89
Tabla 3.38.	Potencia mínima necesaria para la molienda de las materias primas	90
Tabla 3.39.	Características del molino de bolas requerido para el proceso	90
Tabla 3.40.	Tiempos de molienda necesarios para cada materia prima	90
Tabla 3.41.	Especificaciones del tamiz vibratorio a la salida del molino de bolas	91
Tabla 3.42.	Cálculo del volumen necesario para el mezclador de sólidos	91
Tabla 3.43.	Cálculo de la potencia del horno	92
Tabla 3.44.	Características del horno de fusión	93
Tabla 3.45.	Requerimientos para el atronado del esmalte	93
Tabla 3.46.	Características del secador de bandejas horizontales	94

Tabla 3.47.	Determinación de la potencia del molino para el producto final	94
Tabla 3.48.	Especificaciones del tamiz vibratorio para la molienda final del esmalte	95
Tabla 3.49.	Lista de Equipos para el proceso de obtención de esmalte	97
Tabla 3.50.	Balance de materia del proceso de obtención del esmalte	98
Tabla AI. 1.	Propiedades de las soluciones utilizadas para preparar las soluciones de limpieza	109
Tabla AI. 2.	Concentración de la solución para el mordentado	109
Tabla AI. 3.	Dosificación de materias primas del E-III	110
Tabla AII. 1.	Ciclos de cocción aplicados al esmalte con tiempo de maduración constante	111
Tabla AII. 2.	Ciclos de cocción aplicados al esmalte con temperatura de maduración constante	111
Tabla AIII. 1.	Composición química del vidrio de desecho	112
Tabla AIII. 2.	Fórmula Molecular del vidrio de desecho	112
Tabla AIII. 3.	Composición química del esmalte E-III	113
Tabla AIII. 4.	Cantidad total en moles de cada óxido	115
Tabla AIII. 5.	Fórmula molecular del esmalte E-III	115
Tabla AV. 1.	Fórmula molecular del esmalte E-III	117
Tabla AV. 2.	Cantidad de moles que aporta el vidrio	118
Tabla AV. 3.	Cantidad en moles que aportan las materias primas de cada óxido	119
Tabla AV. 4.	Dosificación de las materias primas para obtener 40 g de esmalte E-IIIa	119
Tabla AV. 5.	Peso molecular del esmalte E-IIIa	120
Tabla AV. 6.	Dosificación de las materias primas para obtener 40 g de esmalte E-IIIb	120
Tabla AV. 7.	Dosificación de las materias primas para obtener 40 g de esmalte E-IIIc	121

Tabla AVI. 1.	Dosificación de las materias primas para obtener 100 kg de esmalte E-IIIc	122
Tabla AVII. 1.	Tabla de especificaciones del molino de martillos	123
Tabla AVII. 2.	Tabla de especificaciones del molino de bolas	125

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Proceso Bayer para la obtención de alúmina	4
Figura 1.2.	Diagrama de la celda reductora	5
Figura 1.3.	Datos de producción anual de aluminio en toneladas métricas	8
Figura 1.4.	Proceso de anodizado del aluminio	14
Figura 1.5.	Piezas de aluminio anodizado con diferente coloración	14
Figura 1.6.	Difractograma del vidrio	17
Figura 1.7.	Proceso de reciclaje de vidrio de desecho	20
Figura 1.8.	Esquema de obtención de una pieza de aluminio esmaltada	32
Figura 2.1.	Diagrama de limpieza de las placas	400
Figura 2.2.	Ciclo de cocción CC-1	42
Figura 2.3.	Impactómetro	465
Figura 2.4.	Diagrama de bloque del proceso de obtención del esmalte	466
Figura 3.1.	Tratamientos térmicos aplicados a las pastillas	522
Figura 3.2.	Ciclo de cocción CC-6	655
Figura 3.3.	Placa recubierta con esmalte E-III a 600 °C y limpieza convencional	665
Figura 3.4.	Placa recubierta con esmalte E-III a 600 °C, con limpieza convencional y precalentamiento	66
Figura 3.5.	Ciclo de cocción CC-6d aplicado al esmalte E-III	733
Figura 3.6.	Molienda de botellas de vidrio recicladas	866
Figura 3.7.	Diagrama de flujo de la plata de producción de esmalte para aluminio	966
Figura 3.8.	Molienda de botellas de vidrio recicladas	99

Figura AIV. 1.	Morfologías de adherencia por impacto de un cuerpo esférico sobre esmalte porcelánico	1166
Figura AVII. 1.	Esquema de funcionamiento del molino de martillos	1244
Figura AVII. 2.	Catálogo del mezclador en “V”	1266
Figura AVII. 3.	Especificaciones del mezclador en “V”	1266
Figura AVII. 4.	Especificaciones del horno de fusión	1277
Figura AVII. 5.	Especificaciones del secador	1277

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Cálculos para la preparación de las soluciones de limpieza	109
ANEXO II Ciclos de cocción aplicados al esmalte E-III	111
ANEXO III Cálculo de la formula molecular del esmalte E-III	112
ANEXO IV Norma ASTM B219	116
ANEXO V Dosificación de las materias primas para los esmaltes con relaciones molares 1:1, 1:2 y 1:3	117
ANEXO VI Cálculos de la dosificación de materias primas para la producción de 100 kg de esmalte	122
ANEXO VII Catálogos de los equipos seleccionados	123
ANEXO VIII Cálculos para el dimensionamiento de los equipos	128

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo formular esmaltes porcelánicos para aluminio utilizando vidrio de desecho, para lo cual se utilizó vidrio transparente proveniente de botellas utilizadas para envasar licor.

Se estudió el efecto de la relación en peso entre el vidrio de desecho y el fluoruro de sodio en la temperatura de fusión de la mezcla de materias primas, para lo cual se formularon seis muestras variando la relación $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$ entre $\frac{20}{5}$ a $\frac{25}{0}$, la composición del vidrio de desecho va desde 20 % hasta 25 % y la del fluoruro de sodio desde 5 % hasta 0 % del total, las muestras se sometieron a un proceso térmico con temperaturas máximas de 500°C, 550 °C, 600°C, 650 °C y 700°C, se evaluó la formación de la fase vítrea mediante microscopía petrográfica y se determinó que la cantidad de fluoruro de sodio presente en la mezcla de materias primas debe ser superior al 3 % para que esta funda a 600 °C y que la fase vítrea sea mayor al 90 %.

Con base en la mezcla de materias primas que presentó la mayor formación de fase vítrea, que corresponde a la composición C-III, se preparó el esmalte E-III y se aplicó sobre piezas de aluminio 1 100 previamente preparadas mediante una limpieza química con una solución de hidróxido de sodio al 10 % w/v para el desengrasado, solución de ácido sulfúrico al 6 % w/w para el primer mordentado y, finalmente, una solución de sales de cromo de composición: 231 g/L de la solución de hidróxido de sodio, 46,5 g/L de cromato de potasio y 2,4 g/L de sulfato de cromo (III) para el segundo mordentado. Se precalentó las placas a 538 °C durante 5 min, se determinó que la temperatura de maduración del esmalte es de 600 °C y el tiempo de maduración 25 min, la superficie esmaltada obtenida con este ciclo de cocción presentó los mejores resultados al evaluar las características de superficie recubierta, homogeneidad en el color, espesor de la capa y presencia de fallas.

Se formularon tres esmaltes variando la relación molar entre el carbonato de litio y

el fluoruro de sodio equivalentes a 1:1, 1:2 y 1:3, respectivamente, para evaluar el efecto en la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio. El incremento en la concentración de fluoruro de sodio mejoró las características del esmalte obtenido. Los mejores resultados se lograron con el esmalte de relación molar 1:3 que contiene 0,153 de carbonato de litio y 0,459 moles de fluoruro de sodio ya que se obtuvo cierta adherencia al soportar un impacto con una esfera de 66,8 g a una altura de 0,5 m.

Se realizó el diseño del proceso de obtención del esmalte porcelánico para recubrir piezas de aluminio con una producción de 100 kg/día de esmalte con un tamaño de partícula de 75 μm .

INTRODUCCIÓN

El aluminio es un metal que presenta un buen acabado superficial para decoración, moderada resistencia mecánica y excelentes características para soldadura. Entre sus aplicaciones se lo encuentra en la industria automotriz, electrónica, elementos arquitectónicos, utensilios domésticos, intercambiadores de calor, partes de electrodomésticos, etc.

Quarantha, Caligaris, Mansilla y Palmieri (2004) mencionan que un recubrimiento le otorga a la superficie propiedades diferentes a las del metal; las principales aplicaciones de los recubrimientos son protección al desgaste, disminución de la fricción y mejora de las propiedades térmicas (p. 2). Es importante considerar que el recubrimiento más utilizado en la actualidad para la preparación de alimentos es el teflón por sus propiedades antiadherentes e inertes al contacto con alimentos; sin embargo, existe controversia sobre su utilización, por cuanto, determinados estudios muestran el uso marcado de ácido perfluorooctánico en la obtención de la capa de recubrimiento de utensilios de cocina. En ciertas comunidades de los Estados Unidos se ha detectado su presencia mediante estudios realizados en animales y su efecto nocivo en la salud de las personas (Gómez, 2012, p. 3; Olsen et al, 2004, p. 1 599).

Quarantha et al. (2004) señaló que los recubrimientos porcelánicos sobre metales tienen una amplia gama de aplicaciones debido a que ayudan a que la resistencia al desgaste aumente y que las superficies recubiertas sean químicamente inertes en ambientes agresivos (p. 3).

En el Laboratorio de Producción de vidrio del Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional, se han formulado y preparado esmaltes porcelánicos para el recubrimiento de acero. El presente proyecto pretende utilizar el vidrio de desecho en la formulación de esmaltes porcelánicos para aluminio debido a que el vidrio es 100 % reciclable y a que presenta ventajas en el proceso de fusión pues no existe pérdida del material y permite disminuir la cantidad de materia prima virgen que se utiliza en la preparación del esmalte.

Desde el punto de vista ambiental y económico, el reciclaje es una alternativa excelente en el diario vivir de la industria. Si bien se recicla todo, desde papel y cartón hasta plásticos, los tiempos que tardan en descomponerse los distintos materiales son muy diferentes, de forma particular para el caso del vidrio, este puede empezar a descomponerse a los 1 000 años, por lo cual la reutilización de envases de vidrio es una prioridad ambiental.

El presente proyecto entrega los primeros resultados sobre formulación de esmaltes porcelánicos para aluminio utilizando vidrio de desecho, que aunque no se logró superficies con óptimas características, constituye un aporte fundamental para una futura industria de artículos de aluminio recubiertas con esmaltes porcelánicos.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 OBTENCIÓN Y ACABADO DE PIEZAS DE ALUMINIO PARA USO DE COCINA

El aluminio es un metal que tiene gran utilidad a nivel industrial debido a su bajo peso, resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica y bajo punto de fusión. Es fácilmente reciclable, en su estado puro es dúctil, maleable y posee baja dureza por lo cual es necesario combinarlo con otros metales para mejorar sus características de resistencia y dureza dependiendo del uso para el que sea destinado (Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 157).

1.1.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DE ALUMINIO A ESCALA INDUSTRIAL

El ciclo de vida del aluminio consta de las siguientes fases: extracción de la bauxita, producción de la alúmina a partir del proceso Bayer, producción de aluminio primario mediante el método Hall Héroult, semi-fabricación a través de laminado, fundición y extrusión, producto manufacturado, fase de utilización donde los principales usos están en el sector del transporte, construcción, envase, embalaje e ingeniería y el reciclado del aluminio, que permite disminuir la cantidad de energía que se consume en un 90% con respecto a la necesaria para obtener aluminio a partir de la bauxita (Nesse, Garbossa, Pérez, Vittori y Pregi, 2003, p. 11; Castells, 2012a, p. 68).

1.1.1.1 Proceso Bayer

Permite separar la alúmina de otros minerales e impurezas que constituyen la bauxita como son: gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, boehmita $\text{Al}(\text{OH})$, diáspora HAIO_2 , sílice, óxido de hierro y óxido de titanio. El proceso consiste en reducir la bauxita a un polvo fino, se mezcla con una solución de sosa cáustica y se calienta a

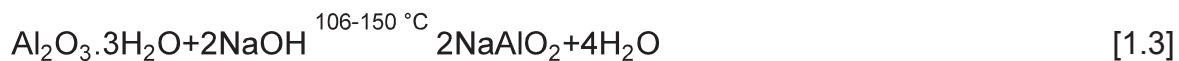
temperaturas que están en el rango de 200 °C a 240 °C y presiones alrededor de 30 atm. La alúmina se disuelve como solución de aluminato de sodio, después el hidrato de aluminio se separa mediante una precipitación cristalina en la solución cáustica y se convierte en óxido de aluminio por calcinación a 1 100 °C (Castells, 2012a, p. 364; Rai, Wasewar, Mukhopadhyay, Yoo y Uslu, 2012, p. 14).

El proceso Bayer consta de las siguientes fases: molienda de la bauxita virgen hasta obtener un grano fino menor que 150 µm, digestión de la bauxita con una solución de hidróxido de sodio 2 M, clarificación del licor la cual se realiza mediante el proceso de decantación, precipitación del hidrato de aluminio y calcinación de la alúmina a 1 100 °C. En la fase de molienda ingresa la bauxita con un tamaño de partícula de 20 mm a molinos de bolas o rodamientos; reducir la granulometría de la partícula ayuda a mejorar el contacto sólido-liquido en la fase de digestión (Rai et al., 2012, p. 15).

En la digestión se añade una solución de sosa cáustica con un pH en un rango de 10,5 a 12,5 para acondicionar el lodo, la adición de este álcali ataca los componentes de silicio de la bauxita y lo descompone. Rai et al. (2012) proponen un esquema de reacciones que se muestran en las ecuaciones [1.1] y [1.2] (p. 16):



El sistema formado de óxido de aluminio, óxido de silicio y agua es transportado mediante bombas de alta presión a los digestores en los cuales la alúmina de la bauxita forma una disolución de aluminato de sodio. Las condiciones de operación dependen de las características del material alimentado, pero en general, se trabaja a temperaturas que oscilan desde 200 °C a 240 °C. Bajo estas condiciones se realizan las reacciones mostradas en las ecuaciones [1.3] para la gibbsita, [1.4] para boehmita y [1.5] para la diáspora (Rai et al., 2012, p. 15).



Los lodos formados en la digestión pasan al proceso de clarificación, por sedimentación, lavado y filtración con el fin de purificar el producto.

La siguiente fase es la precipitación del hidrato de aluminio u óxido de aluminio hidratado, según la ecuación [1.6] (Rai et al., 2012, p. 16):



Finalmente se calcina el licor rico en alúmina a una temperatura de 1 100 °C en un horno rotatorio obteniéndose la alúmina con una pureza del 99 %. El proceso descrito se presenta a la figura 1.1 (Castells, 2012a, p. 365).

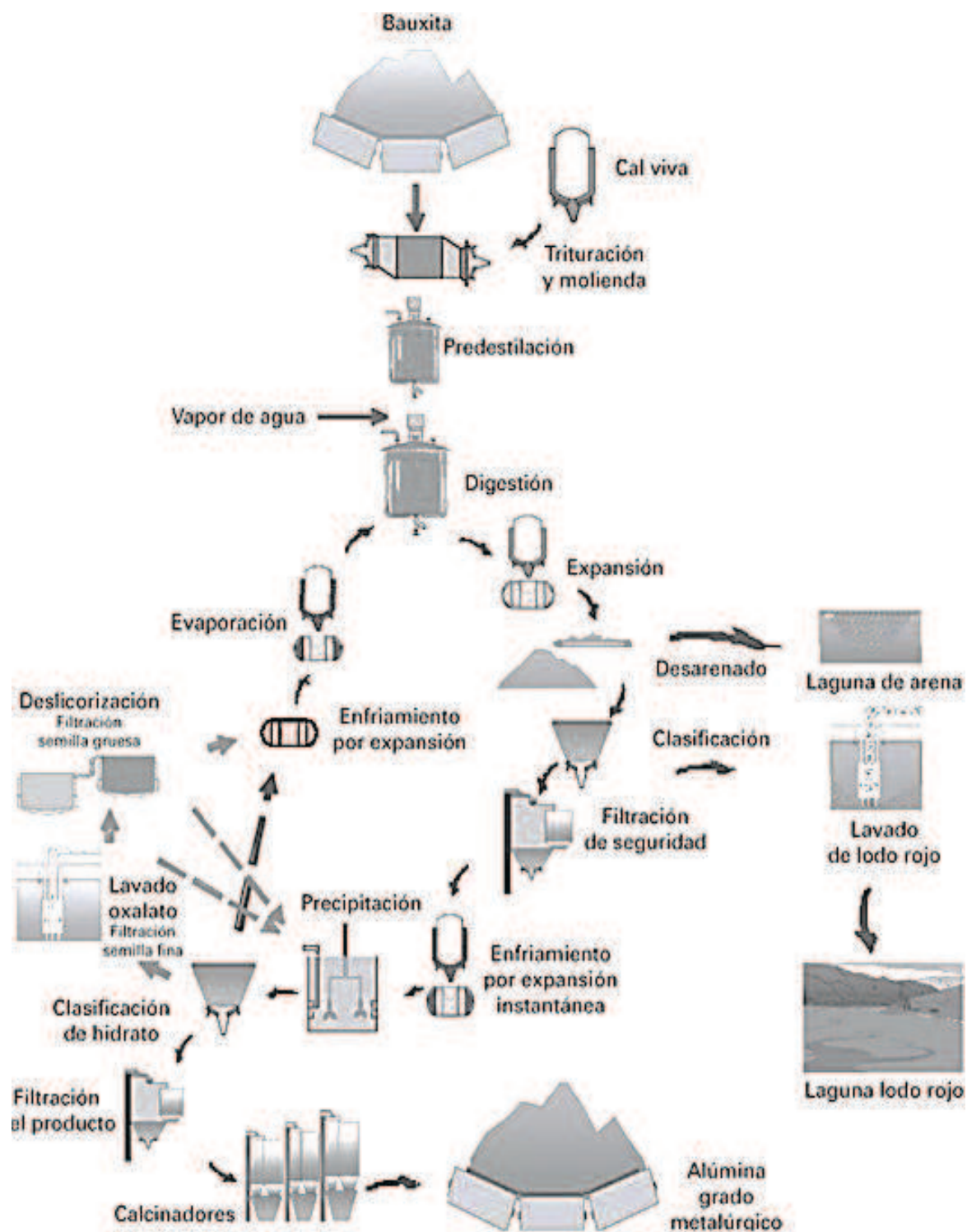


Figura 1.1. Proceso Bayer para la obtención de alúmina
(Castells, 2012a, p. 365)

1.1.1.2 Proceso Hall Hérault

El proceso Hall Hérault es el más utilizado industrialmente para producir aluminio y consiste en la electrólisis de la alúmina de alta pureza que se obtuvo previamente por medio del proceso Bayer (Green, 2007, p.38).

Se disuelve la alúmina en una celda electrolítica, también conocida como celda reductora, construida de acero inoxidable recubierta de material refractario y en la parte interior contiene carbón, el mismo que actúa como cátodo. El baño electrolítico está constituido de criolita (Na_3AlF_6), un ánodo de carbón se introduce en la celda para completar el circuito, la corriente eléctrica circula través del electrolito, con intensidad entre 60 000 A y 300 000 A con una caída de voltaje de 4,2 a 5,0 V (Green, 2007, p.39). En la figura 1.2 se muestra un esquema de la celda electrolítica utilizada en el proceso Hall Hérault.



Figura 1.2. Diagrama de la celda reductora
(Whitten, Davis, Peck y Stanley, 2008, p. 849)

Este proceso descompone la alúmina en aluminio y oxígeno puro a una temperatura de 965°C , mientras ocurre la electrólisis se produce oxígeno, el que origina la combustión del ánodo con desprendimiento de CO y CO_2 . El aluminio fundido se deposita en el fondo debido a que su densidad es mayor que la de la criolita (Mukhlis, Rhamdhani y Brooks, 2010, p. 883; Green, 2007, p. 39).

La reacción química que se lleva a cabo, se la presenta en la ecuación [1.7].



Rai et. al. (2012) mencionan un dato importante sobre la eficiencia total del proceso, para obtener 1 t de aluminio se requieren 3 t de bauxita, la cual mediante el proceso Bayer se transforman en 2 t de alúmina y finalmente, mediante el proceso Hall Héroult, se obtiene aluminio al 99,7% (p. 16).

En el siglo pasado la cantidad de energía que se requería en la electrólisis de la alúmina se encontraba alrededor de 30 Kwh/kg de aluminio, lo que significaba altos costos energéticos; se han realizado investigaciones para disminuir el consumo de energía, en el 2007 se redujo a 13 Kwh/kg de aluminio. La industria del aluminio pretende reducir el consumo de energía a 11 Kwh/kg para el año 2020 mediante el análisis de las variables del proceso (Mukhlis et al, 2010, p.883; Choate, 2007, p. 164).

Con el fin de mejorar la eficiencia energética del proceso Coursol, Dufour, Coté, Chartrand, y Mackey (2012) realizaron modelos termodinámicos en el proceso Hall Héroult para modificar la composición típica del baño electrolítico que se usa en las industrias, la cual se muestra en la tabla 1.1 (p. 1326).

Tabla 1.1. Composición del baño electrolítico

Componentes del Baño	Porcentaje en peso (%)
Na ₃ AlF ₆	80,0
AlF ₃	11,0
CaF ₂	5,6
Al ₂ O ₃	2,5
LiF	0,9

(Coursol et al., 2012, p. 1327)

Los resultados obtenidos mediante el estudio termodinámico del proceso Hall Héroult, realizado por Coursol et al., hacen referencia a que una concentración

de fluoruro de aluminio menor que 10% ocasiona un aumento en la temperatura del baño, y disminuye la eficiencia del proceso; sin embargo, la concentración de este fluoruro no debe exceder el 15 % debido a que perturba la disolución de la alúmina, reduce el tiempo de vida útil del ánodo y la productividad del proceso. La concentración ideal es del 12% (p. 1331).

Con respecto a la concentración de alúmina debe ser menor que 3,5% ya que permite un buen funcionamiento de la celda evitando la saturación del líquido. La tasa de alimentación de alúmina es otro parámetro importante, ésta debe permanecer en un rango del 2 al 3,5%, ya que en este intervalo se asegura un incremento de temperatura máximo de 12 °C. El óxido de calcio es una impureza presente en la alúmina que se alimenta al proceso y en el transcurso de la fundición se convierte en fluoruro de calcio, una elevada concentración del mismo afecta a la solubilidad del óxido de aluminio (Coursol et al., 2012, p. 1330). Los resultados mencionados permiten mejorar la eficiencia energética del proceso, aumentando la producción de aluminio y disminuyendo la temperatura del baño.

1.1.2 VALORES DE PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL ALUMINIO

La producción mundial de aluminio ha aumentado considerablemente, actualmente es el segundo metal más empleado debido a la variedad de sus aplicaciones. En la figura 1.3 se presentan datos estadísticos de la producción anual de este metal (World Aluminium, 2013).

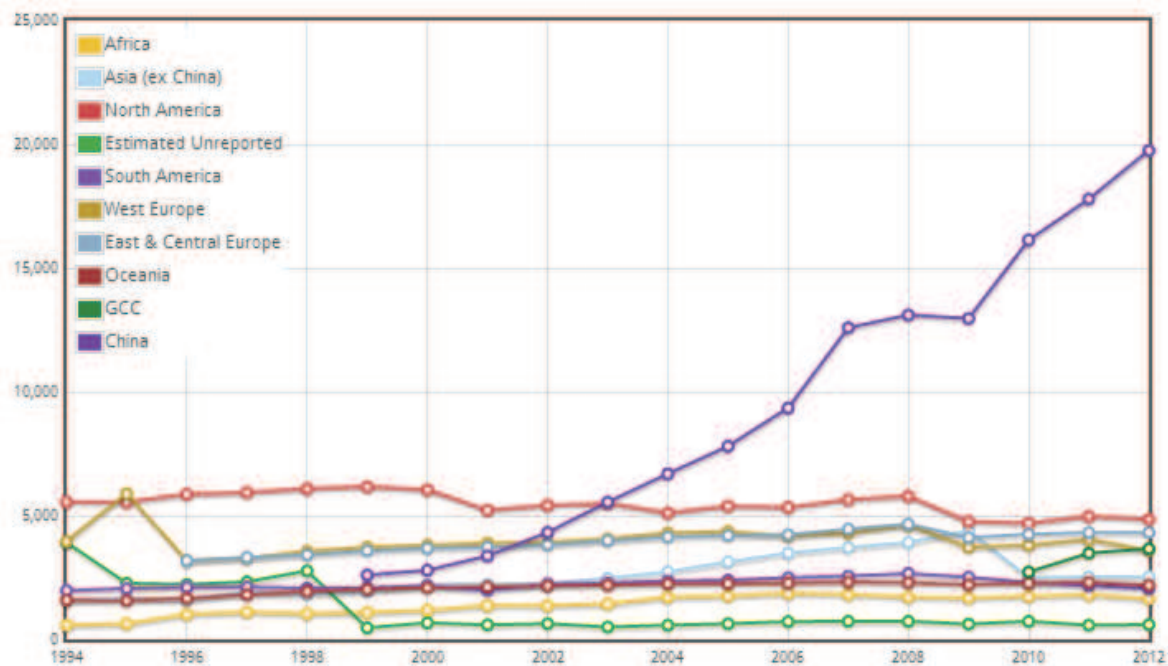


Figura 1.3. Datos de producción anual de aluminio en toneladas métricas, para diferentes regiones del mundo
(World Aluminium, 2013)

En la tabla 1.2 se muestran datos bibliográficos de la producción total de aluminio desde 1994 hasta el 2012.

Tabla 1.2. Producción total de Aluminio mundial

Año	Producción Total (t)	Promedio por día (t)	Año	Producción Total (t)	Promedio por día (t)
1994	19 147	52,5	2004	29 857	81,6
1995	19 610	53,7	2005	31 905	87,4
1996	20 859	57,0	2006	33 938	93,0
1997	21 807	59,7	2007	38 132	104,5
1998	22 721	62,2	2008	39 491	107,9
1999	23 721	65,0	2009	36 986	101,3
2000	24 657	67,4	2010	41 153	112,7
2001	24 510	67,2	2011	43 989	120,5
2002	26 156	71,7	2012	45 207	123,5
2003	27 986	76,7			

(World Aluminium, 2013)

La cantidad de aluminio que se destina para el envase ya sea como utensilios domésticos o para contener alimentos es del 14% de la producción mundial; sin embargo, al sector del transporte se destina más del 25% de la producción y el resto se lo utiliza para el sector de la construcción e ingeniería (Nesse, et. al, 2003, p. 10).

1.1.3 MÉTODOS DE PROCESAMIENTO

El aluminio fundido que se obtiene mediante el proceso Hall Héroult, es transferido a las unidades de fundición en donde se combina con otros materiales para obtener las propiedades necesarias según sea su aplicación. Para la transformación a lingotes, el metal se enfría en forma de lingotes de 20 kg. Cuando se realiza la fundición continua por vaciamiento vertical, el metal se enfría en forma de tarugos y en el caso de la fundición continua por vaciamiento horizontal, el aluminio se enfría en forma de placas y barras (Batista, 2001, p. 223).

1.1.3.1 Fundición

El aluminio fundido a 650 °C se combina con magnesio, silicio, cobre, zinc, manganeso y otros elementos para mejorar sus propiedades físicas. Se forman aleaciones dependiendo de su aplicación, las más conocidas son: Al-Fe, Al-Fe-Mn-Si, Al-Si-Ca, Al-Cr-Fe, Al-Zr-Fe y finalmente se obtienen lingotes, tarugos o placas, que posteriormente pasan a procesos de laminación, extrusión o moldeo, se homogeneizan las placas o lingotes en un horno (Gasik y Mazur, 2003, p. 70; Kalpakjian et al., 2002, p. 157).

Los fundidos se usan principalmente en la manufactura de cajas de cambio de vehículos, carrocerías de motores y ruedas de automóviles. Los componentes del proceso de fusión son el metal base, elementos de aleación, fundentes y

formadores de escorias. Para el proceso de fusión del aluminio se utiliza los hornos de tipo crisol basculantes (Rodríguez, Castro y Del Real, 2006, p. 155).

1.1.3.2 Laminación

Mediante el proceso de laminación se obtienen chapas, láminas y hojas, el metal pasa a través de cilindros a distancias regulables y de diferentes espesores. Las ventajas de los laminados son la reducción de peso y aumento de la resistencia mecánica, se utilizan en las áreas del transporte, señalización, embalajes y para utensilios de cocina (Batista, 2001, p. 224).

1.1.3.3 Extrusión

Esta transformación del metal se lleva a cabo en una prensa de extrusión, se utiliza el aluminio en forma de tarugos o lingotes cilíndricos precalentados, luego se comprime en la matriz que posee el diseño y las características que requiere su determinado uso. Las aplicaciones principales de los materiales extrudados son en perfiles para puertas y ventanas (Batista, 2001, p.224).

En el Ecuador, la empresa UMCO S.A. se dedica a la fabricación de utensilios de cocina con aluminio. Pozo y Rogel (2011) mencionan que el proceso de producción inicia con el aluminio en forma de lingotes que se importa desde Brasil, Venezuela, México, etc.; después se funden en un horno basculante del cual se obtienen planchetas que posteriormente pasan a la prensa laminadora en la que se especifica el espesor deseado para cada producto. Las láminas obtenidas se transforman a discos de aluminio en la prensa hidráulica de embutición profunda, posteriormente, pasan al proceso de pulido con el fin de dar brillo a los artefactos y de esta manera quedan listos para incorporar accesorios finales tales como asas, mangos (p. 19).

1.1.4 TIPOS DE ACABADO SUPERFICIAL

El aluminio al reaccionar con el oxígeno del ambiente forma una capa de óxido que lo autoprotege principalmente de la corrosión. Sin embargo, esta capa superficial no garantiza resistencia al desgaste y a la abrasión, que son propiedades críticas en la fabricación de utensilios de cocina. Los tratamientos superficiales que se aplican son mecánicos y químicos, este último abarca también los electroquímicos, mismos que aseguran mayor durabilidad y resistencia al desgaste (Hyland, 2003, p. 473).

1.1.4.1 Tratamiento superficial mecánico

Este tipo de tratamiento se usa generalmente para depurar defectos en las piezas como falta de planitud e imperfecciones locales como superficies rugosas; este tratamiento se realiza habitualmente previo al acabado químico. En la tabla 1.3 se presenta un cuadro con el resumen de las diferentes operaciones que se realizan en el tratamiento superficial mecánico del aluminio (Hufnagel, 1992, p. 713).

Tabla 1.3. Operaciones para el tratamiento superficial mecánico del aluminio

Operación	Herramientas	Aplicación
Limpieza	Discos de carburo de silicio, cinceles y limas	En piezas forjadas y fundidas, costuras de soldadura y previo a cualquier tratamiento superficial.
Esmerilado	Discos de esmeril o bandas	Para defectos en planitud, estrías, daños superficiales, piezas abombadas.
Satinado	Cepillos giratorios de alambre de acero	Se utiliza principalmente en chapas y bandas anchas; se requiere un desengrasado o decapa previo de la superficie.
Jaspeado	Cepillos giratorios	Piezas y superestructuras de camiones pesados.
Pulido	Discos de algodón o lana	Tubos y perfiles extrusionados, chapas y utensilios de cocina previo a un esmerilado y desengrasado.
Dibujado	Cilindros estampadores	Superficie de chapas y bandas con el fin de obtener superficies decoradas.
Chorroado	Con partículas nodulares de aluminio, con perlas de vidrio	Para eliminar la cascarilla de colada y conseguir un aspecto superficial uniforme, desengrasado previo a esta operación

(Hufnagel, 1992, p. 714)

1.1.4.2 Tratamiento superficial químico

El tratamiento superficial químico se divide en tres categorías: el desengrasado, tratamiento de ataque superficial que se conoce como decapado, abrillantado, el de protección contra la corrosión, mediante tratamientos electroquímicos como el anodizado, el cromatado, fosfatado y el de protección con capas vítreas como el esmaltado de aluminio que se utiliza en utensilios domésticos (Hufnagel, 1992, p. 732).

Desengrasado

Es el tratamiento previo a la aplicación de un recubrimiento sobre la superficie, se realizada con tricloroetileno o hidróxido de sodio en concentraciones del 10 al 20 % w/v. Su función principal es eliminar impurezas y grasas contaminantes que se encuentran en la superficie del aluminio que influyen directamente en la disminución de la resistencia a la corrosión cuando el metal se ha sometido a un tratamiento térmico (Hyland, 2003, p. 474).

Decapado

Operación empleada para obtener la superficie libre de óxidos superficiales, generalmente se usan soluciones diluidas de ácido crómico, sulfúrico o una mezcla de ácido crómico y fosfórico. El objetivo es preparar a la superficie para los tratamientos posteriores y eliminar las cascarillas de óxido de aluminio que se forma espontáneamente en el metal y causan inconvenientes en la adherencia del recubrimiento (Hyland, 2003, p. 474; Rodríguez et al., 2006, p. 197).

Fosfatado y cromatado

Los tratamientos de conversión del aluminio permiten que el metal forme parte de la capa de protección, es la primera etapa de un proceso de lacado o pintado, su finalidad es aumentar la adherencia y la resistencia a la corrosión. Su costo es menor que el de los procesos electroquímicos (Hufnagel, 1992, p. 735).

El fosfatado de aluminio se realiza mediante un baño químico de fosfatos solubles; el cromatado, a su vez, se realiza por inmersión de la pieza en una solución de cromatos y dicromatos. Debido a la reacción que se produce con el metal precipitan los óxidos y cromatos insolubles que provocan diferentes tonalidades en el metal desde incoloras hasta amarillentas y verdosas (Rodríguez et al., 2006, p. 200).

Anodizado

El anodizado es un proceso electroquímico que forma una capa de protección de óxido superficial, el aluminio actúa como ánodo y una plancha de plomo o níquel como cátodo. El electrolito comúnmente utilizado es el ácido sulfúrico del 12 al 25 % w/w, también se puede usar el ácido crómico del 3 al 10% w/w, ácido fosfórico, ácido oxálico, ácido bórico, citratos o ácidos orgánicos sulfonatos, que son encargados de suministrar O_2 el cual reacciona con el metal y se produce el óxido deseado, que además, contiene el ión sulfato divalente y agua, por lo que es muy resistente contra agentes químicos y posee mayor durabilidad frente a la abrasión y corrosión; sin embargo, depende del espesor de la capa de óxido la cual varía con el tiempo de paso de la corriente (Hyland, 2003, p. 478; Gómez, Águeda, García y Navarro, 2011, p. 90). En la Figura 1.4 se presenta un esquema del proceso de anodizado del aluminio.

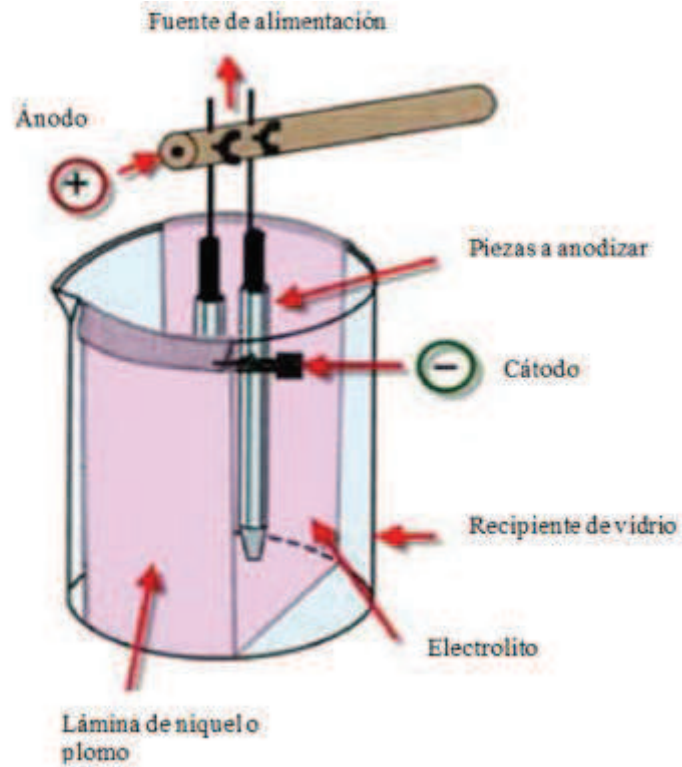


Figura 1.4. Proceso de anodizado del aluminio
(Gómez et al., 2011, p. 90)

Piezas de aluminio anodizadas de diferentes colores, como oro, bronce, negro y rojo, se pueden obtener mediante la utilización de sales. Otras técnicas recientes se basan en procesos de interferencia óptica, que modifican el poro del óxido de aluminio formado y se consiguen tonalidades azul, gris y verde como se muestra en la figura 1.5.



Figura 1.5. Piezas de aluminio anodizado con diferente coloración
(Gómez et al., 2011, p. 90)

Esmaltado

El esmaltado porcelánico para aluminio es un proceso poco común y complicado debido al bajo punto de fusión del metal frente al del esmalte o fritada. Funatani, Yoshida y Tsunekawa (2003) recomiendan recubrir aleaciones Al-Mg-Si con esmaltes porcelánicos ya que poseen una mejor adherencia con la superficie (p. 554).

Existen tres tipos de esmaltes para aluminio: con plomo, libres de plomo y compuestos de fósforo los cuales no contienen óxido de silicio; la superficie a ser recubierta debe ser pretratada con un proceso de desengrasado y decapado con sales de cromo, que permiten mejorar la adherencia. Además se recomienda un precalentamiento de la aleación de aluminio de 400 a 550 °C en superficies rugosas (Funatani et al, 2003, p. 555).

El punto de reblandecimiento de los esmaltes para aluminio debe ser máximo 600 °C para evitar deformaciones del mismo, las principales aplicaciones del aluminio esmaltado son: para utensilios de cocina, recubrimiento de las paredes o marcos de ventanas de aluminio, anuncios y rótulos (Vielhaber, 2002, p. 57).

Quarantha, Caligaris, Mansilla y Palmieri (2004) mencionan que el esmaltado de metales ayuda a mejorar la resistencia al desgaste y a que las superficies recubiertas sean químicamente inertes en ambientes agresivos (p. 3).

1.2 RECICLAJE DE VIDRIO

El incremento de residuos sólidos a nivel mundial genera la necesidad de desarrollar nuevos métodos para su tratamiento tales como la reutilización y el reciclaje. La reutilización es el uso repetido de los productos desechados, proceso que no ayuda totalmente ya que involucra impactos medioambientales en sus diferentes fases: recolección, transporte y limpieza; el reciclaje es una operación compleja que implica la recuperación, transformación y elaboración de un nuevo

material a través del uso de los residuos al introducirlos nuevamente en el ciclo productivo como materia prima. Los materiales que comúnmente se reciclan son: papeles, vidrios, cartones, plásticos, metales y fibras textiles (Lombardero, 2008, p. 317).

1.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL VIDRIO

La ASTM (*American Society for Testing and Materials*) en su Norma C 162-97, define al vidrio como “un material inorgánico fundido que se ha enfriado hasta un estado rígido sin experimentar cristalización” (ASTM Standard C 162, 1997, p. 2).

Se obtiene vidrio mediante la fusión a alta temperatura de una mezcla de materiales inorgánicos hasta obtener una masa homogénea y un enfriamiento rápido hasta temperatura ambiente sin llegar a la cristalización. En este proceso las variables termodinámicas que varían en mayor grado son la entropía, el volumen específico y la entalpía, todas ellas disminuyen su valor al enfriarse (Fernández, 2003, pp. 52-53).

El vidrio parece un sólido, pero es un líquido subenfriado cuyo volumen disminuye de manera ininterrumpida al enfriarse rápidamente hasta que sus moléculas pierden su propiedad de traslación y adquieren altas viscosidades comprendidas entre 10^{13} a $10^{13,5}$ dPa.s que hacen que el vidrio tenga propiedades similares a un sólido como dureza y resistencia al rayado; sin embargo, es frágil y tiene baja resistencia a la fractura. El vidrio es amorfo, mientras que los sólidos en su mayoría son cristalinos. Por esta razón, los análisis por difracción de rayos X en vidrios generan solamente una banda difusa como se ilustra en el difractograma de la figura 1.6; además, el vidrio carece de un punto de fusión definido (Fernández, 2003, pp. 49-51, 373).

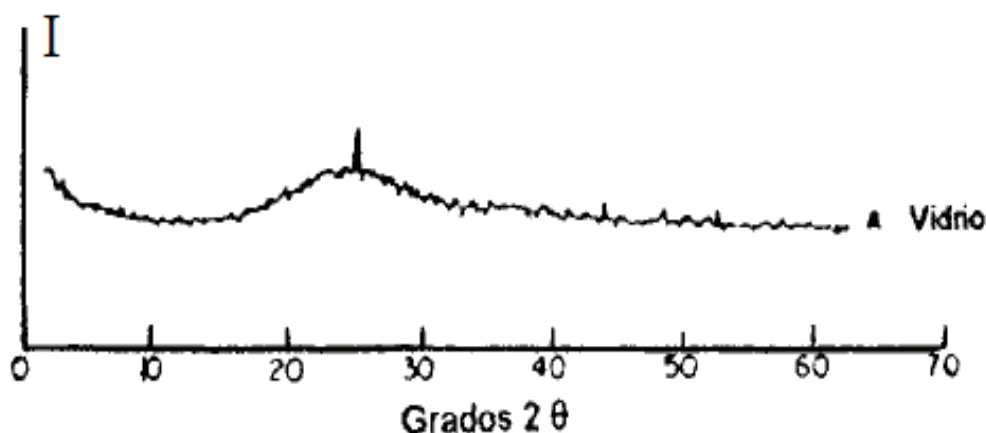


Figura 1.6. Difractograma del vidrio
(Pascual, 1996, p. 361)

El vidrio presenta mayor ordenamiento estructural que la mayoría de sustancias amorfas, lo que le permite mantener sus propiedades físico químicas intrínsecas durante su uso, y al ser reprocesado, posee un rango amplio de composiciones químicas y además, sus componentes no se encuentran determinados por relaciones estequiométricas. El vidrio experimenta poca contracción y dilatación frente a cambios de temperatura por lo que es resistente al choque térmico y se lo emplea como material de laboratorio, también presenta características de aislante térmico y eléctrico (Fernández, 2003, pp. 50-54). Debido a su alta resistencia química, a que es inerte e inocuo, y a su impermeabilidad a los gases y los olores se lo utiliza como contenedor de sustancias alimenticias y de productos químicos. La tabla 1.4 presenta las propiedades físico-químicas del vidrio doméstico.

Tabla 1.4. Propiedades físico-químicas del vidrio

Propiedad	Valor
Calor específico (C_p) J/kg-K	668,80-836,00
Gravedad específica (s)	2,40 – 2,80
Coefficiente de expansión volumétrica (γ) $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$0,276 \times 10^{-4}$
Coefficiente de expansión lineal (α) $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$5,80 \times 10^{-6}$
Coefficiente de conductividad térmica (K) $\text{W/m}^2\text{C}$	1,87

(Green y Perry, 2008, pp. 2-124, 2-135, 2-185)

Clasificación del vidrio

Se puede clasificar al vidrio en función de diferentes parámetros (Cabildo et al., 2010, p. 327):

- Por su aplicación: se divide en industrial y doméstico. El vidrio industrial comprende el uso en ventanas, cristales blindados, fibra óptica, bombillas, etc.; es decir toda aplicación excepto para envases de productos alimenticios como conservas, vinos, yogures, etc., que corresponde al vidrio doméstico, aproximadamente 42% del vidrio reciclado pertenece a esta clasificación.
- Por su color: el más utilizado es el vidrio verde que se ocupa principalmente en botellas de licores; el vidrio blanco que se utiliza en bebidas gaseosas y jugos naturales; el extraclaro para aguas minerales y botellas para decoración y el vidrio opaco que se utiliza en botellas de cerveza y material de laboratorio color ámbar.
- Por su composición química se clasifica en: sódico cálcico el cual se utiliza en la producción de botellas, cristalería, focos, vidrios de ventana y laminados; el de plomo, también conocido como cristal, es el resultado de la combinación de silicato de potasio con óxido de plomo se utiliza para fabricación de lentes y para bisutería; el de boro silicato contiene bórax y sílice, es muy durable y resistente al ataque químico así como al choque térmico, se emplea en utensilios de cocina y material de laboratorio; el de sílice, que normalmente funde a los 1 200°C, como su nombre lo indica está constituido por sílice procedente del cuarzo.

1.2.2 IMPORTANCIA DEL RECICLAJE

El vidrio es un material que no pierde sus características fisicoquímicas durante su reprocesamiento, por lo que el proceso de reciclaje es 100 % factible (Lombardero, 2008, p. 318). La importancia de reciclar el vidrio redunda en beneficios medioambientales e industriales, ya que disminuye la cantidad de energía necesaria para la producción de vidrio hasta en un 30%, para obtener 1

kg de vidrio primario se requieren 4 200 kcal, esta cantidad se reduce a 3 108 kcal aproximadamente cuando el vidrio es reprocesado minimizando la contaminación atmosférica en un 20%. Debido a que el vidrio reciclado funde a menor temperatura, ayuda a preservar los recursos naturales porque evita la destrucción de terrenos en las fases de explotación y extracción de las materias primas. Además, minimiza la cantidad de agua que se utiliza en aproximadamente un 50% (Lombardero, 2008, p. 318; Cabildo et al., 2010, p.326; Cervera, 2013, p. 143).

Otros beneficios que se pueden mencionar son que aumenta la vida útil de los rellenos sanitarios, porque el reciclaje conlleva una disminución de la cantidad de basura, cabe destacar que la industria de reciclaje de vidrio no produce residuos, todo material defectuoso es triturado e incorporado al horno de fusión (Castells, 2012a, p. 355).

Usos del vidrio reciclado

En la fabricación de asfalto se puede usar vidrio con un tamaño de partícula medio de 150 μm a 300 μm , al cual se lo denomina glasfalto y es utilizado en Reino Unido. También se lo utiliza en pinturas de señalización horizontal para aumentar el poder reflectante en la noche mediante microesferas. Al añadir vidrio reciclado en la composición de tejas, ladrillos y cemento, se incrementa la durabilidad y resistencia. Además, se lo emplea en productos cerámicos de sanitarios y en sistemas de filtración de agua (Castells, 2012a, p. 355).

1.2.3 PROCESO DE RECICLAJE

En esta sección se detalla el proceso de reciclaje que se lleva a cabo para obtener “calcín” de vidrio o “cullet” a partir de botellas de vidrio. Como cullet se conoce al vidrio triturado que presenta un tamaño de partícula promedio menor que 2 cm y que está apto para ser sometido al proceso de manufactura de un nuevo producto. El proceso inicia con la recolección de los envases desde los

gestores ambientales autorizados para este fin, de tal forma que el vidrio presente una mínima contaminación. Una vez que ingresa el material a la planta de reciclaje, la operación principal es la clasificación manual por colores debido a que, cada tipo presenta una composición química diferente que afecta a la uniformidad y a la calidad del cullet. En esta etapa se eliminan mediante un lavado los contaminantes orgánicos que presenta el residuo de vidrio, como plásticos, papel, etc. A continuación, el material pasa a un tambor giratorio donde se realiza un proceso de limpieza de impurezas metálicas mediante la acción de imanes que con la ayuda de aire comprimido permiten la extracción de residuos de piezas metálicas (Castells, 2012a, p. 357).

En la siguiente etapa se debe reducir el tamaño de las piezas de vidrio mediante la trituración primaria con un sistema de martillos, con la finalidad de asegurar la calidad del cullet en este proceso de molienda, se continúa con la limpieza de los residuos metálicos restantes mediante la acción conjunta de aire comprimido e imanes. El vidrio molido y limpio está listo para ser incorporado como materia prima para la fabricación de nuevos envases de vidrio, un esquema explicativo del proceso descrito se presenta en la figura 1.7 (Castells, 2012a, p. 358).

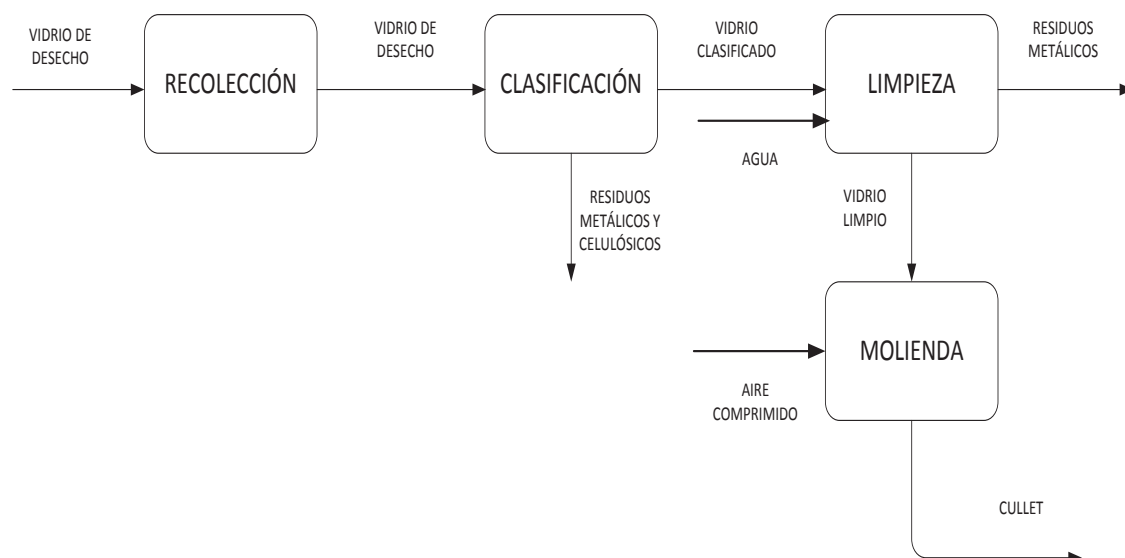


Figura 1.7. Proceso de reciclaje de vidrio de desecho

1.3 RECUBRIMIENTOS PORCELÁNICOS DE BAJO PUNTO DE FUSIÓN

Se define como recubrimiento porcelánico o esmalte porcelánico al vidrio fundido sobre un metal base, el esmalte se obtiene mediante la fusión o el sinterizado de sustancias inorgánicas, principalmente óxidos alcalinos y alcalinos térreos, seguido de un enfriamiento súbito que permite la formación de una estructura amorfa (Baldwin y Feldman, 2007, p. 1).

Los recubrimientos de bajo punto de fusión presentan temperaturas de cocción en un rango entre 500 a 734 °C, se aplican principalmente para metales que funden a temperaturas bajas como el aluminio que lo hace a 659° C. Es recomendable que el punto de reblandecimiento del esmalte se encuentre por lo menos 100 °C por debajo del punto de fusión del metal para evitar la deformación de las piezas (Vielhaber, 2002, p. 55).

La preparación de estos esmaltes requiere el uso de materias primas especiales, por lo que son más costosos debido a que requieren un mayor cuidado en su aplicación, ya que tienden a la formación de burbujas debido a la presencia de fluoruros y vapor de agua. Lo que es menos probable para esmaltes que presentan temperaturas de cocción en un intervalo de 800 a 950°C (Vielhaber, 2002, pp. 57, 120).

1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS ESMALTES

El recubrimiento porcelánico es un vidrio, por lo que las propiedades de este material permiten evaluar el comportamiento de este tipo de acabado superficial sobre una pieza de metal. Sin embargo, el tipo de sustrato metálico y el diseño de la pieza deben considerarse de manera especial cuando el recubrimiento es muy delgado como en los sistemas monocapa, en los que se debe considerar como un todo al sistema metal-esmalte. El metal otorga al conjunto la flexibilidad y brinda resistencia contra la fragilidad y la abrasión; el esmalte, por su parte,

provee resistencia al desgaste y a la abrasión (Andrews, Pagliuca y Faust, 2011, p.53).

La dureza del esmalte depende de su composición química y varía en un rango de 3,5 a 6 en la escala de Mohs, su valor es determinado mediante la misma prueba aplicada al vidrio, un esmalte típico para acero tiene la misma dureza que una plancha de vidrio (Andrews et al., 2011, p.62).

Los esmaltes porcelánicos presentan una excelente resistencia a la abrasión y al desgaste, muy superior a la de los recubrimientos orgánicos y a la de los metales solos debido a su estructura; con respecto a la lubricidad, el recubrimiento porcelánico presenta bajo coeficiente de fricción, que lo hace muy útil para aplicaciones como el procesamiento de alimentos y en rampas transportadoras (Andrews et al., 2011, p. 61).

Otro aspecto muy importante del esmalte es su buena adherencia al sustrato, lo cual implica que sea resistente al daño por impacto y al choque térmico, esta característica se obtiene por la fusión a temperaturas que van desde los 500 hasta los 900 °C. Debido a la rugosidad de la superficie metálica y al bajo coeficiente de expansión térmica que presenta el esmalte ($8-14E-6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), la unión entre el recubrimiento y el sustrato tiene características similares a la de un enlace químico. En general, el esmalte no se separa del sustrato en condiciones de uso normales y hasta es posible que pueda flexionarse con el metal, algo imposible de obtener con el vidrio (Andrews et al., 2011, pp. 61-63).

1.3.1.1 Influencia de las materias primas en las propiedades del esmalte

Las materias primas que se han empleado con mayor regularidad para obtener esmaltes son: bórax, feldespato y cuarzo. La elección de estas depende del uso que se dará a la pieza esmaltada; además, es importante considerar el costo y la cantidad que se puede obtener en el mercado. Vielhaber (2002) propuso una

clasificación de las materias primas, en la tabla 1.5 se presenta un resumen de cada tipo con su principal función en el esmalte (p. 7).

Tabla 1.5. Clasificación de las materias primas

Tipo de materia prima	Función en el esmalte
Sustancias refractarias	Presentan temperaturas de fusión elevadas, por lo que dificultan la disolución de la fase fundida y aumentan la viscosidad del esmalte.
Fundentes	Disminuyen la temperatura de reblandecimiento del esmalte, disminuyen la viscosidad de la fase fundida.
Agentes opacificantes	Otorgan al esmalte la característica de opacidad.
Sustancias auxiliares	En general cumplen funciones secundarias, tales como colorear el esmalte, otorgarle mayor adherencia, etc.

(Vielhaber, 2002, p. 7)

Sustancias refractarias

El cuarzo o ácido silícico constituye aproximadamente un 50 % e incluso llega hasta un 80 % para esmaltes de primera capa debido a que es el formador de la red vítrea, provee al esmalte de buena resistencia a los ácidos, mecánica, al choque térmico, favorece la elasticidad, provoca una disminución del coeficiente de dilatación térmica y eleva la temperatura de fusión (Vielhaber, 2002, p. 7; Fernández, 2003, p. 131). Dentro de este grupo se encuentran los feldespatos, de los tres tipos, los cuales deben su nombre al álcali que predomina en su composición química. En la tabla 1.6 se anota el mineral donde se encuentra el feldespato, su nombre y su respectiva fórmula molecular.

Tabla 1.6. Tipos de feldespatos

Mineral	Nombre	Fórmula molecular
Ortoclasa	feldespato potásico	$K_2O-Al_2O_3-6SiO_2$
Albita	feldespato sódico	$Na_2O-Al_2O_3-6SiO_2$
Anortita	feldespato cálcico	$CaO-Al_2O_3-2SiO_2$

(Vielhaber, 2002, p. 8)

El óxido de aluminio o alúmina mejora la resistencia de los esmaltes al ataque químico, aumenta su viscosidad, reduce la elasticidad, disminuye el coeficiente de dilatación térmica por lo que mejora la resistencia al choque térmico, impide la desvitrificación y lo endurece mejorando su resistencia al rayado (Vielhaber, 2002, p. 11; Fernández, 2003, p. 145).

Fundentes

El principal fundente que se usa en la preparación de esmaltes es el bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), el cual baja el punto de fusión de la mezcla vitrificable y aporta ácido bórico (H_3BO_3), este componente permite disminuir el coeficiente de dilatación térmica del esmalte pero provoca un efecto negativo al disminuir la resistencia al ataque de ácidos. El trióxido de boro es un formador de la red vítrea, fortalece la estructura del esmalte y mejora su resistencia mecánica y dureza (Vielhaber, 2002, pp. 11; Fernández, 2003, p. 135).

Al carbonato de potasio (K_2CO_3) se lo emplea muy poco en la fabricación de esmaltes debido a su costo elevado. Ayuda a reducir el punto de reblandecimiento y el coeficiente de dilatación del esmalte (Vielhaber, 2002, pp. 12-13). El carbonato de sodio (Na_2CO_3) es muy empleado como fundente y para introducir óxido de sodio en la mezcla. Aumenta el coeficiente de dilatación térmica, lo que limita su uso en grandes cantidades (Vielhaber, 2002, p.12).

La calcita (CaCO_3) es un estabilizante químico y estructural, ya que su objetivo es compensar la pérdida de cohesión y el aumento del coeficiente de expansión térmica que provocan los óxidos alcalinos usados como fundentes. Provee de óxido de calcio a la mezcla y es recomendable utilizar un 5 %; actúa como óxido modificador de la red, provoca una disminución de la conductividad eléctrica y aumenta la resistencia a los ácidos debido a que su doble carga permite una unión directa con la red vítrea (Fernández, 2003, p. 141).

El carbonato de litio, es fuente del óxido de litio, su punto de fusión es $618\text{ }^\circ\text{C}$, disminuye el tiempo de fusión, la viscosidad y la tensión superficial del fundido a

alta temperatura, por lo que es un fundente excelente, su uso principal es para obtener esmaltes con baja temperatura de transición vítrea y mejora el color y brillo de los esmaltes (Vielhaber, 2002, pp. 14; Fernández, 2003, p. 140).

Agentes opacificantes

La criolita o fluoruro de aluminio y sodio (Na_3AlF_6) posee 40 % de (AlF_3), 60% de (NaF) y pequeñas impurezas de óxido de silicio y aluminio, se utiliza en esmaltes de color claro cuando se aplican vía húmeda; si se aplica por vía seca se emplea cantidades pequeñas, máximo el 2 %, debido a que aumenta el coeficiente de dilatación y forma burbujas. El fluoruro de sodio que contiene este mineral actúa como sustancia opacificante y fundente; y contribuye a la formación de la red vítrea (Vielhaber, 2002, p. 15).

El mineral fluorita actúa como fundente si se aplica en cantidades menores al 10%, en una concentración del 4 al 5 % se obtiene su acción máxima; sin embargo contiene impurezas como carbonato de calcio, ácido silícico, sulfato de bario, óxidos de hierros y aluminio, este mineral provoca una disminución de la elasticidad del esmalte (Vielhaber, 2002, pp. 15).

Las sustancias opacificantes más empleadas en la tecnología de los esmaltes porcelánicos son los óxidos de estaño y de circonio debido a que poseen un elevado índice de refracción. El silicato de circonio ha reemplazado el uso del óxido de estaño debido a que su costo es menor, se utiliza cuando se requiere obtener un esmalte resistente a la abrasión, opaco y brillante con bajo coeficiente de dilatación, la concentración recomendada por Cantavella (2010) es en un intervalo del 8 al 15 % (p. 30).

Sustancias auxiliares

Óxidos colorantes como el de cobalto le confiere una pigmentación azul al esmalte y además ayuda a mejorar la adherencia al sustrato. Si se requiere obtener una tonalidad verde se utiliza óxido crómico mezclado con el de cobalto.

El “calcín” o “cullet” se puede agregar a la composición del esmalte porque ayuda a disminuir la temperatura de fusión y mejora la homogeneidad del mismo. Permite la introducción de varios óxidos presentes en el vidrio como: Na_2O , K_2O , CaO , Al_2O_3 y fundamentalmente, SiO_2 ; así, contribuye al ahorro de materias primas (Fernández, 2003, p. 148).

1.3.1.2 Fórmula Molecular

El químico alemán Herman Seger estableció una clasificación de los óxidos que constituyen el esmalte y en la cual se debe respetar el siguiente orden establecido. En la primera columna de la izquierda se colocan los óxidos modificadores de la red, en la segunda columna los óxidos intermedios y en la columna de la derecha los formadores de la red, es lo que se conoce como la fórmula molecular del esmalte que se reporta en la tabla 1.7 (Morales, 2005, p. 21).

Tabla 1.7. Fórmula molecular del esmalte según Seger

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios	Óxidos Formadores
Na_2O	ZrO_2	Al_2O_3	SiO_2
K_2O	Li_2O		B_2O_3
MgO	PbO		
CaO			

(Morales, 2005, p. 21)

Los óxidos modificadores de la red son los encargos de debilitar los enlaces de la red vítrea por lo que disminuyen el punto de fusión y aportan fusibilidad al sistema, en este tipo se encuentran los óxidos alcalinos y alcalinotérreos. En la fórmula de Seger, el número de moles debe sumar uno para que permita una comparación (Morales, 2005, p.21).

Los óxidos intermedios o estabilizadores de la red le confieren estabilidad a la estructura amorfa, aquí se encuentran los que pertenecen al grupo R_2O_3 como el

óxido de aluminio; cabe mencionar que el óxido de circonio puede actuar como intermedio o modificador. En la clasificación que se presenta en la tabla 1.7 se lo considera como modificador de la red (Morales, 2005, p.21).

Los óxidos formadores de la red vítrea son aquellos compuestos capaces de formar vidrio por sí solos, los cuales deben cumplir ciertas condiciones geométricas, como por ejemplo los poliedros que forma el oxígeno, deben tener vértices en común mas nunca aristas y mínimo tres vértices de cada poliedro debe pertenecer a otro a la vez. Los grupos que cumplen con estas características son los de tipo RO_2 , R_2O_5 , R_2O_3 ; el óxido de silicio es el más empleado para este fin, también el óxido bórico y el óxido fosfórico (Castells, 2012b, pp. 267-269).

1.3.2 ESMALTES PORCELÁNICOS PARA RECUBRIR ALUMINIO

La obtención de aluminio esmaltado empezó después de la II Guerra Mundial, su desarrollo tuvo dificultad debido a la necesidad de obtener esmaltes con bajo punto de fusión y alta dilatación. Estrada y Jimenez (1974) propusieron una clasificación de los esmaltes para aluminio en dos grupos: con óxido de plomo y sin óxido de plomo (p. 125).

1.3.2.1 Esmaltes plúmbicos

Los esmaltes plúmbicos contienen el fundente más utilizado, el óxido de plomo en su composición, el mineral que provee de este óxido es el minio; sin embargo, se debe considerar que si bien este componente ayuda a disminuir el punto de reblandecimiento del esmalte a una temperatura entre 450 °C y 500 °C, aumenta el brillo, no se lo puede utilizar para recubrir piezas de aluminio destinadas al uso en utensilios de cocina debido a su toxicidad. (Vielhaber, 2002, p. 58).

1.3.2.2 Esmaltes aplúmbicos

Los esmaltes exentos de óxido de plomo se desarrollaron con el fin de disminuir la problemática del plomo su uso. Estos esmaltes a su vez se clasifican en:

1. de tipo fluoruros
2. aluminofosfatos alcalinos
3. de bario
4. los silicotitanatos alcalinos

En la tabla 1.8 se presenta diferentes composiciones de esmaltes para aluminio

Tabla 1.8. Composición de esmaltes para aluminio

Composiciones		Esmaltes plúmbicos			Esmaltes aplúmbicos			
		Dupont (%)	Aluglas (%)	(1)	(2)	(3)	(4)	
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	-	1-3 2-4	20,70	23,90	-	-	-
Óxido de antimonio (III)	Sb ₂ O ₃	-	-	-	-	-	1,7	-
Óxido de bario	BaO	-	-	-	-	25,60	10,9	-
Óxido bórico	B ₂ O ₃	-	10-15 8-10	7,10	11,20	3,90	1,7	-
Óxido de calcio	CaO	-	-	-	-	16,2	-	-
Óxido de fósforo	P ₂ O ₅	-	-	40,20	32,70	-	-	-
Óxido de litio	Li ₂ O	5-12	0-3	3,7	-	-	1,70	-
Óxido de plomo	PbO	10-18	25-35 10-20	-	-	-	-	-
Óxido de potasio	K ₂ O	0-21	9-12 12-16	-	3,60	11,3	10,20	-
Óxido de silicio	SiO ₂	38-56	30-40 40-50	-	-	23,60	24,4	-
Óxido de sodio	Na ₂ O	0-21	9-12 12-16	18,1	17,4	5,80	22,0	-
Óxido de titanio	TiO ₂	0-11	-	-	8,2	9,70	27,4	-
Fluoruro de sodio	NaF	-	-	10,2	3,00	-	-	-

(Estrada et al, 1974, pp. 125-126; Vielhaber, 2002, p. 55)

1.3.3 PROCESO DE ESMALTADO

El proceso de esmaltado involucra las etapas de preparación de la superficie, obtención, aplicación y cocción del esmalte.

1.3.3.1 Preparación de la superficie

La preparación de la pieza a esmaltar influye directamente en la calidad de la superficie lograda. Algunos defectos como grietas, baja adherencia y escamado, se deben principalmente a una limpieza insuficiente. El primer paso consiste en un desengrasado de la pieza en un baño al 10 % w/v de sosa cáustica seguido de un lavado con agua destilada, después se realiza el primer mordentado durante 3 a 5 min en ácido sulfúrico al 6 % w/w, a temperaturas entre 45 y 50 °C y su posterior enjuague. Finalmente, las piezas se someten a un segundo mordentado en un baño con la siguiente composición: 231 g/L de una disolución de hidróxido de sodio, 46,5 g/L de cromato de potasio y 2,4 g/L de sulfato de cromo, este tratamiento tendrá una duración de 5 min a 50 °C y seguido de un lavado con agua para eliminar las sales de cromo (Vielhaber, 2002, p. 55).

Funatani et al. (2003) señaló que se debe realizar un precalentamiento de las piezas a esmaltar en un rango de temperatura de 400 a 550 °C durante cinco minutos y que el proceso con sales de cromo se recomienda para aleaciones de aluminio con magnesio (p. 555).

1.3.3.2 Obtención del esmalte

El esmalte se obtiene mediante la fusión de la mezcla de materias primas y un enfriamiento rápido. La primera etapa es la dosificación de los compuestos según la fórmula molecular y la composición química de las materias primas, se asegura en esta etapa una mezcla física homogénea de estos componentes que se realiza

en máquinas mezcladoras conformadas por un tambor giratorio y un agitador mecánico. La segunda etapa del proceso es el fundido de esta mezcla a temperaturas que oscilan entre los 550 °C y 800 °C, se debe conseguir un enfriamiento rápido mediante la acción del agua a temperatura ambiente sobre la mezcla fundida (Vielhaber, 2002, p. 65).

Finalmente, se somete a un proceso de molienda en un molino de bolas que reduce el tamaño de las partículas hasta conseguir el deseado.

1.3.3.3 Aplicación del esmalte

La aplicación del esmalte se realiza por vía seca o vía húmeda, en el procedimiento por vía seca se recubre la pieza con una primera capa delgada de esmalte con el fin de evitar la oxidación del sustrato; además, se debe asegurar una distribución uniforme del esmalte sobre el mismo. La aplicación por vía húmeda requiere de un proceso de mojado de la pieza a esmaltar con el objetivo de evitar la formación de burbujas de aire que se pueden formar en el proceso de cocción.

1.3.3.4 Cocción del esmalte

El esmalte colocado en la pieza se somete a un proceso de cocción, cuyas principales variables son la temperatura y el tiempo de maduración. La temperatura depende de la composición del esmalte, para recubrir aluminio Yatsenko, Shkurakova, y Kuprikova, (2004) recomiendan un rango de temperatura de maduración de 550 °C a 600 °C y el tiempo necesario para este proceso depende de la cantidad de esmalte colocado sobre la pieza generalmente de 10 a 20 minutos (p. 186).

En la figura 1.8 se presenta un esquema básico del proceso de obtención de piezas de aluminio esmaltadas.

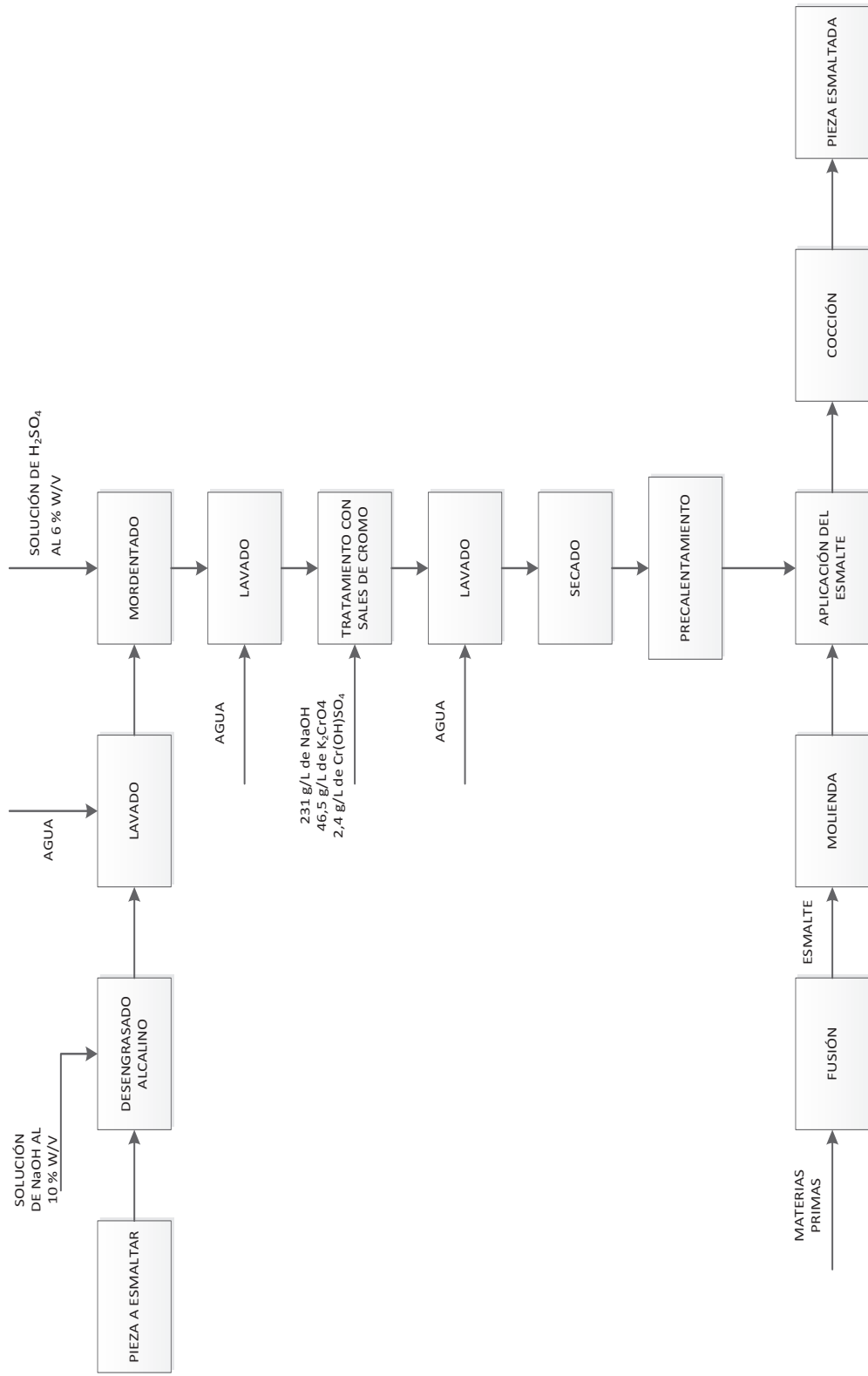


Figura 1.8. Esquema de obtención de una pieza de aluminio esmaltada (Madumjar y Sunirmal, 2001, p. 73)

2. PARTE EXPERIMENTAL

El objetivo general de este proyecto consistió en formular esmaltes porcelánicos para aluminio utilizando vidrio de desecho, para lo cual se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el efecto de la relación del vidrio de desecho con el fluoruro de sodio en la temperatura de fusión de la mezcla de materias primas.
- Determinar la temperatura y el tiempo de maduración del esmalte como recubrimiento de piezas de aluminio.
- Evaluar el efecto de la relación molar entre el carbonato de litio y el fluoruro de sodio en la adherencia del esmalte sobre la superficie de aluminio.
- Diseñar el proceso de obtención del esmalte porcelánico para recubrir piezas de aluminio.

2.1 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RELACIÓN DEL VIDRIO DE DESECHO CON EL FLUORURO DE SODIO EN LA TEMPERATURA DE FUSIÓN DE LA MEZCLA DE MATERIAS PRIMAS

Se utilizó como materia prima fuente de los óxidos de sodio, potasio, calcio, aluminio y silicio, al vidrio transparente y sin color producto de la trituración de envases utilizados para almacenar sustancias líquidas.

2.1.1 PREPARACIÓN DE PASTILLAS CON LA MEZCLA DE MATERIAS PRIMAS

2.1.1.1 Formulación de la mezcla de materias primas

El objetivo fue formular seis mezclas de materias primas con diferentes

cantidades de vidrio de desecho y fluoruro de sodio para someterlas a diferentes temperaturas y evaluar el proceso de fusión.

La revisión bibliográfica llevada a cabo permitió formular la mezcla de materias primas que se reporta en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición base de la mezcla de materias primas

Materias primas	Porcentaje (% w/w)
Ácido Bórico	35,0
Alúmina	0,5
Bórax	12,0
Carbonato de potasio	4,0
Carbonato de litio	3,0
Cuarzo	9,0
Fluoruro de sodio	5,0
Vidrio	20,0
Zircosil	12,0

Sobre la composición base de la mezcla de materias primas reportada en la tabla 2.1 se formularon seis composiciones, se varió el porcentaje de vidrio desde el 20 % hasta el 25 % con rangos de 1 % y se varió la cantidad de fluoruro de entre 0 % y 5% con rangos de 1 %.

2.1.1.2 Preparación de las materias primas

El objetivo fue reducir el tamaño de partícula de las materias primas a valores menores que 75 μm . Los equipos que se utilizaron para este apartado se describen a continuación:

- Balanza analítica marca ADAM, capacidad máxima 120 g, y sensibilidad de 0,0001 g.
- Estufa eléctrica marca Memmert Edelstahl, temperatura máxima 220°C.
- Pulverizador Bleuler – Mill NAEF, 0,18 Kw/1000 min y 60 Hz.

Los materiales empleados fueron:

- Desecador
- Bolsas plásticas
- Espátula de acero inoxidable
- Mortero y pistilo
- Tamiz de acero de 20 cm de diámetro, malla # 200 (75 μ m) y pincel de cerda # 12

Los reactivos empleados fueron:

- Óxido de aluminio, > 99 %, BDH Chemicals
- Carbonato de potasio, > 99 %, BDH Chemicals
- Carbonato de litio, > 99 %, Merck
- Fluoruro de sodio, 99 %, Fisher Scientific
- Silicato de circonio, grado industrial, Goldesun
- Ácido bórico, grado técnico 99,9 %, Laquim
- Tetraborato de sodio, grado técnico 99,9 %, Laquim

El procedimiento utilizado se detalla a continuación:

a) Preparación del vidrio de desecho

- Se recolectaron 3 botellas de vidrio transparente e incoloro, se las desinfectó con agua y jabón y se las secó.
- Se las calentó a 400 °C y se las sometió a choque térmico arrojándolas a un recipiente con agua a temperatura ambiente.
- Se trituró el vidrio con un martillo para conseguir pequeños fragmentos de aproximadamente 0,5 cm.
- Se pulverizó el vidrio en el pulverizador Bleuler – Mill NAEF a razón de 100 g/min
- Se tamizó a través de la malla # 200 ASTM y se almacenó la cantidad obtenida en envases herméticos.

b) Preparación del cuarzo, alúmina y ácido bórico

- El cuarzo, alúmina y ácido bórico se pulverizaron en el pulverizador Bleuler – Mill NAEF a razón de 100 g/min.

- Se tamizó las materias primas pulverizadas anteriormente a través de la malla # 200 ASTM y se almacenaron las cantidades obtenidas en envases herméticos.
- c) Preparación del bórax
- Se molió manualmente en un mortero con pistilo.
 - Se tamizó a través de la malla # 200 ASTM.
 - Se almacenó la cantidad obtenida en un envase hermético
- d) Preparación del carbonato de potasio, carbonato de litio y fluoruro de sodio
- Estas materias primas presentan un tamaño de partícula menor a la malla # 200 ASTM, por lo que no fue necesario moler ni tamizar.
 - El carbonato de potasio se secó a 120° C durante 1 hora en la estufa, debido a que es un compuesto higroscópico y se almacenó en un desecador.

2.1.1.3 Prensado

El objetivo fue obtener pastillas de las diferentes composiciones, los equipos utilizados para este apartado fueron:

- Balanza analítica marca ADAM, capacidad máxima 120 g, y sensibilidad de 0,0001 g.
- Prensa hidráulica marca CARVER LABORATORY PRESS, capacidad máxima 24 000 psi.

El procedimiento realizado se detalla a continuación:

- Se pesaron las materias primas.
- Se las mezcló en una bolsa plástica.
- Se pesó 1 g de cada mezcla y se compactó a 5000 psi en la prensa hidráulica.

2.1.2 COCCIÓN DE LAS PASTILLAS

El objetivo de cocer las pastillas fue someterlas a diferentes temperaturas para

evaluar la formación de fase vítrea. El equipo que se empleó fue:

- Horno mufla programable marca WiseTherm con temperatura máxima de 1200°C.

Los materiales que se utilizaron fueron:

- Pastillas de materias primas
- Pinza para crisoles

Las pastillas preparadas con cada una de las mezclas de materias primas fueron sometidas a tratamientos térmicos con temperaturas máximas de 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C y 700 °C.

En la tabla 2.2 se presentan las listas de mezclas preparadas, las temperaturas a las que fueron sometidas y la nomenclatura usada.

Tabla 2.2. Lista de mezclas y temperaturas de los experimentos realizados en la cocción de las pastillas

VIDRIO: FLUORURO DE SODIO (%)	TEMPERATURA (° C)				
	500	550	600	650	700
25:0	C-I / T1	C-I / T2	C-I / T3	C-I / T4	C-I / T5
24:1	C-II / T1	C-II / T2	C-II / T3	C-II / T4	C-II / T5
23:2	C-III / T1	C-III / T2	C-III / T3	C-III / T4	C-III / T5
22:3	C-IV / T1	C-IV / T2	C-IV / T3	C-IV / T4	C-IV / T5
21:4	C-V / T1	C-V / T2	C-V / T3	C-V / T4	C-V / T5
20:5	C-VI / T1	C-VI / T2	C-VI / T3	C-VI / T4	C-VI / T5

2.1.3 EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE FASE VÍTREA

El objetivo fue determinar el porcentaje de fase vítrea presente en las pastillas cocidas a diferentes temperaturas. El equipo empleado fue:

- Microscopio petrográfico, marca ZEISS ser No. 990433, Axiolab pol 450910

Los materiales que se utilizaron fueron:

- Portaobjetos
- Cubreobjetos
- Lija N° 220

- Aceite de pino

El procedimiento consistió en pulir con una lija la superficie a observar, luego se colocó en el portaobjetos una gota de aceite de pino y sobre esta la muestra. Se colocó el cubreobjetos y se evaluó en el microscopio petrográfico con un aumento de 10x y utilizando nicoles cruzados, se tomó fotografías de las muestras y se determinó el porcentaje de fase vítrea presente.

La técnica utilizada fue la microscopía óptica de polarización por luz transmitida, donde las partículas vítreas son isótropas es decir, tienen el mismo índice de refracción en todas las direcciones y al observar en la modalidad nicoles (polarizadores) cruzados, aparecen de color negro; en cambio, las partículas cristalinas son anisótropas y al ser observadas entre nicoles cruzados presentan colores de interferencia que permiten diferenciarlas fácilmente de las vítreas (Rodríguez, Suárez, Calleja y Ruiz, 1997, p. 47).

2.2 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE MADURACIÓN Y EL TIEMPO DE MADURACIÓN DEL ESMALTE COMO RECUBRIMIENTO DE PIEZAS DE ALUMINIO

Se prepararon esmaltes y se aplicaron en piezas de aluminio tipo 1 100 y se las sometió a diferentes ciclos de cocción.

2.2.1 PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS DE ALUMINIO

El objetivo fue obtener las piezas de aluminio libres de óxidos, grasas y otros tipos de contaminantes. El equipo empleado en esta fase fue:

- Estufa eléctrica marca Memmert Edelstahl, con temperatura máxima 220°C

Los materiales empleados fueron:

- 3 matraces aforados de 1000 mL

- 4 cajas Petri
- 1 caja de fundas ziploc
- 1 rollo de papel absorbente
- Placas de aluminio 1100 de 3x3 cm
- 1 pipeta serológica de 10 mL
- 1 pipeta serológica de 1 mL
- 1 probeta de 250 mL
- 2 vasos de precipitación de 100 mL

Los reactivos utilizados fueron:

- Ácido sulfúrico, 98,08 % w/w, J.T. Baker
- Cromato de potasio, 99 % w/w, Fisher Scientific Company
- Hidróxido de sodio, 99 % w/w, Riedel-de Haën
- Sulfato de cromo, 24-26 % w/w Cr_2O_3 , Induquim Gonveg

El procedimiento realizado se detalla a continuación:

- Se recortaron piezas de aluminio 1 100 de 3 x 3 cm.
- Se preparó 1 L de una solución de hidróxido de sodio al 10 % w/v.
- Se preparó 1 L de solución de ácido sulfúrico 6% w/w.
- Se preparó 1 L de disolución para el mordentado de las placas con la siguiente composición: 231 g/L de la solución de hidróxido de sodio, 46,5 g/L de cromato de potasio y 2,4 g/L de sulfato de cromo (III). El ejemplo de cálculo se reporta en el Anexo I.

Para la limpieza química de las placas se realizó el siguiente procedimiento:

- Se sumergieron las placas en la caja Petri con la solución al 10 % w/v de hidróxido de sodio durante 5 min y se lavaron con agua destilada.
- Se sumergieron en la solución de H_2SO_4 6 % w/w a 50 °C durante 5 min y se las lavó con agua destilada.
- Se introdujeron las placas en la solución para el mordentado antes preparada y luego en la estufa durante 5 min a 50 °C; después, se las enjuagó con agua destilada. La figura 2.1 muestra un diagrama del proceso de limpieza de las placas.
- Se las secó y se envolvieron en papel absorbente, finalmente se guardó en fundas ziploc.



Figura 2.1. Diagrama de limpieza de las placas

2.2.2 OBTENCIÓN DEL ESMALTE

El objetivo fue obtener un esmalte porcelánico opaco con temperatura de fusión de 600 °C aproximadamente a partir de la mezcla de materias primas que presentó el mayor porcentaje de fase vítrea. Los equipos que se utilizaron fueron:

- Estufa eléctrica marca Memmert Edelstahl, temperatura máxima 220°C
- Balanza analítica marca ADAM, capacidad máxima 120 g, y sensibilidad de 0,0001 g.
- Horno de fusión y atronado de la fritta, temperatura máxima de 1200°C.

Los materiales empleados fueron:

- Bolsas plásticas ziploc
- Crisol de porcelana roja
- Espátula
- Mortero y pistilo

El procedimiento realizado se detalla a continuación:

- a) Obtención de la mezcla de materias primas
 - Se prepararon 40 g de la mezcla de materias primas con la composición C-III, que contiene 22 % de vidrio de desecho y 3 % de fluoruro de sodio.
 - Se mezclaron en una bolsa plástica ziploc.
- b) Obtención del esmalte
 - Se realizó un orificio en el fondo del crisol de cerámica roja de 5 mm de diámetro y se lo tapó con papel higiénico.

- Se encendió el horno de fusión y se reguló el flujo de gas y aire para obtener una llama de color azul.
- Se colocaron los 40 g de mezcla de materias primas en un crisol, y se introdujo éste en la cámara del horno.
- Se fundió la mezcla de materias primas aproximadamente a 1100 °C en 1 hora con 30 min.
- Se recogió el esmalte atronado y se lavó con agua destilada.
- Se molió el esmalte obtenido con el mortero, y se lo secó en la estufa a 100 °C durante 2 h.
- Se tamizó el esmalte seco a través de la malla # 325 ASTM.
- Se guardó en fundas plásticas ziploc.

2.2.3 APLICACIÓN Y COCCIÓN DEL ESMALTE

El objetivo fue obtener las placas de aluminio tipo 1 100 recubiertas con el esmalte y determinar el mejor ciclo de cocción. El equipo utilizado fue:

- Horno mufla programable marca WiseTherm, temperatura máxima de 1200°C.

Los materiales empleados fueron:

- Base refractaria
- Espátula
- Tamiz de acero de 20 cm de diámetro, malla # 325 (45 µm) y pincel de cerda # 12.
- Placas de aluminio 1100 de 3 x 3 cm

El procedimiento realizado se detalla a continuación:

a) Aplicación del esmalte

- Se pesó 0,6 g de esmalte crudo.
- Se aplicó el esmalte por vía seca, se recubrió la placa de aluminio con el esmalte crudo.
- Se la depositó sobre la base refractaria y se la introdujo en el horno mufla.

b) Determinación de la temperatura de maduración

Se aplicó el ciclo de cocción que se muestra en la tabla 2.3 y se varió la

temperatura de maduración entre 550 °C y 600°C, con rangos de 10 °C.

Tabla 2.3 Ciclo de cocción aplicado al esmalte

Etapa	Temperatura (° C)	Tiempo (min)
Calentamiento	$T_a^* - 300$	15
	300 – 300	5
	300 – T_m	10
Maduración	$T_m - T_m$	10
Enfriamiento	$T_m - 400$	45
	400 – T_a	1200

* T_a : Temperatura ambiente

En la figura 2.2 se ilustra el ciclo de cocción aplicado al esmalte con temperatura de maduración de 550 °C.

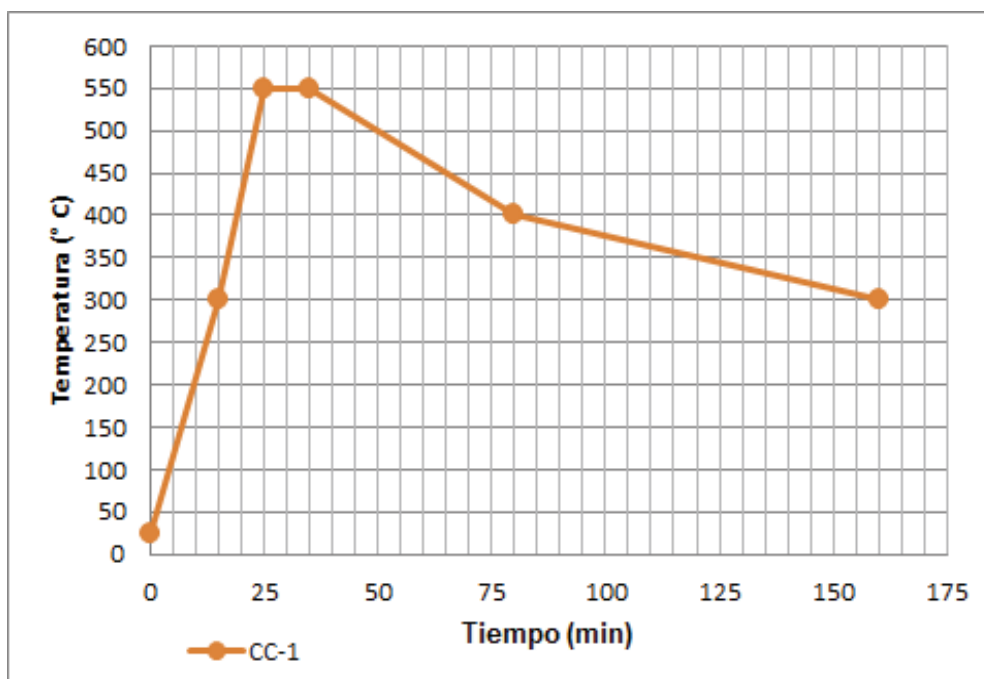


Figura 2.2. Ciclo de cocción CC-1

Los ciclos de cocción que se aplicaron al esmalte se detallan en el Anexo II y el resumen de experimentos realizados se presenta en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Resumen de experimentos realizados a diferentes temperaturas de maduración

Temperatura de maduración (°C)	550	560	570	580	590	600
Experimento	ETm ₁	ETm ₂	ETm ₃	ETm ₄	ETm ₅	ETm ₆

Una vez realizado cada experimento se evaluó la superficie de las placas recubiertas con el esmalte y se consideró las siguientes características: superficie recubierta, homogeneidad en el color, espesor de la capa de esmalte y presencia de fallas.

c) Determinación del tiempo de maduración

Se aplicó el ciclo de cocción reportado en la tabla 2.3, se mantuvo constante la temperatura de maduración e igual a 600 °C y se varió el tiempo de maduración entre 10 min y 25 min con rangos de 5 min; se evaluaron los resultados bajo los mismos parámetros utilizados en la determinación de la temperatura de maduración. En la tabla 2.5 se presenta el resumen de experimentos, los ciclos aplicados de cocción se detallan en el Anexo II.

Tabla 2.5. Resumen de experimentos realizados a diferentes tiempos de maduración

Tiempo de maduración (min)	10	15	20	25
Experimento	ETm _{6t_a}	ETm _{6t_b}	ETm _{6t_c}	ETm _{6t_d}

2.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA RELACIÓN MOLAR ENTRE EL CARBONATO DE LITIO Y EL FLUORURO DE SODIO EN LA ADHERENCIA DEL ESMALTE CON LA SUPERFICIE DE ALUMINIO

Se formularon esmaltes con diferentes relaciones molares entre el carbonato de litio y el fluoruro de sodio para determinar el efecto en la adherencia del esmalte con la superficie de aluminio.

2.3.1 PREPARACIÓN DE LOS ESMALTES

2.3.1.1 Formulación de los esmaltes

El objetivo fue formular esmaltes porcelánicos con diferentes relaciones molares entre el carbonato de litio y el fluoruro de sodio.

Se calculó la fórmula molecular del esmalte de composición C-III, que contiene 22 % de vidrio de desecho y 3 % de fluoruro de sodio y se lo denomina E-III. El ejemplo de cálculo se reporta en el Anexo III, a partir de su composición, se formularon tres esmaltes con relaciones molares entre el carbonato de litio y el fluoruro de sodio equivalentes a 1:1, 1:2 y 1:3.

2.3.1.2 Obtención de los esmaltes

Se aplicó el procedimiento seguido en el numeral 2.2.2.

2.3.2 APLICACIÓN Y COCCIÓN DE LOS ESMALTES

Se aplicó el procedimiento seguido en la sección 2.2.3.

2.3.3 EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA DEL ESMALTE SOBRE LA SUPERFICIE

El objetivo fue evaluar la adherencia de los esmaltes con diferentes relaciones molares de 1:1, 1:2 y 1:3 que corresponden a E-IIIa, E-IIIb y E-IIIc respectivamente, sobre la superficie de aluminio mediante la determinación de la resistencia al impacto. El equipo utilizado en este apartado fue:

- Impactómetro, este equipo fue diseñado y construido en el laboratorio de producción de vidrio del Departamento de Ingeniería Química. En la figura 2.3 se presenta una fotografía del equipo.



Figura 2.3. Impactómetro

Los materiales empleados fueron:

- Esferas de acero de 66,8 g y 95,0 g
- Placas de aluminio recubiertas con los esmaltes

El procedimiento utilizado se detalla a continuación:

- Se colocó la placa de aluminio esmaltada en la base del equipo.
- Se introdujo la esfera de acero de 66,8 g en el tubo guía y se liberó la esfera a una altura de 0,5 m, 1,0 m y 1,5 m.
- Se repitió el mismo procedimiento con la esfera de 95,0 g.
- Se evaluó la adherencia a través de los parámetros de adherencia por impacto según la Norma ASTM B219 que se muestra en el Anexo IV.

2.4 DISEÑO DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ESMALTE PORCELÁNICO PARA RECUBRIR PIEZAS DE ALUMINIO

En la figura 2.4 se muestra el diagrama de bloque del proceso.

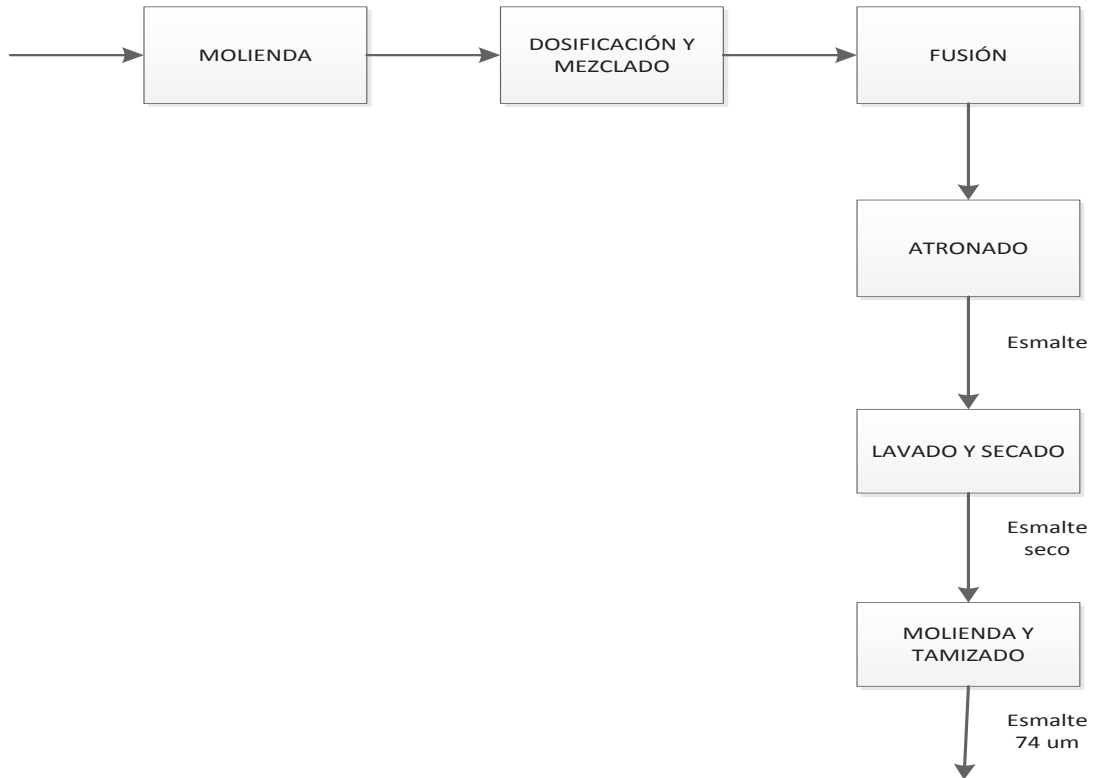


Figura 2.4. Diagrama de bloque del proceso de obtención del esmalte

2.4.1 Molienda de materias primas

Las materias primas deben ingresar al proceso de dosificación y mezcla con un tamaño de partícula menor que 74 μm . La potencia absorbida por los molinos de bolas según el método de Bond se utilizará como el parámetro para la elección del equipo requerido, el valor de esta variable se calculará con la ecuación 2.1 (Green et al, 2008, p. 21-47).

$$Pa = 10 \times w_i \left(\frac{1}{0.907} - \frac{1}{d_{80}} - \frac{1}{D_{80}} \right) \times C \quad [2.1]$$

Donde:

- Pa : Potencia absorbida (kW)
 w_i : Índice de Bond (kWh/t)
 d_{80} : Abertura de la malla por la que pasa el 80 % del producto (μm)

- D_{80} : Abertura de la malla por la que pasa el 80 % de la alimentación (μm)
 C : Capacidad del molino de bolas (t/h)

2.4.2 Dosificación y mezcla de materias primas

Para asegurar una mezcla homogénea se utiliza un mezclador, cuya capacidad se calcula a partir de la ecuación 2.2.

$$V = \frac{m}{\delta_a} \quad [2.2]$$

Donde:

- m : Masa de la mezcla (kg)
 V : Volumen del mezclador (m^3)
 δ_a : Densidad aparente de la mezcla (kg/m^3)

2.4.3 Fusión de mezcla de materias primas

La cantidad de calor necesaria para la fusión del esmalte se calculó con la ecuación 2.3.

$$Q = m \times C_p \times (T_f - T_a) \quad [2.3]$$

Donde:

- Q : Flujo de calor requerido (W)
 m : Flujo másico (kg/s)
 C_p : Capacidad calorífica de la mezcla a presión constante (J/g K)
 T_f : Temperatura máxima de fusión ($^{\circ}\text{C}$)
 T_a : Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

2.4.4 Atronado del esmalte

Después de la fusión de la mezcla de materias se realiza el atronado del esmalte dejándolo caer a un tanque cilíndrico con agua, para la determinación del volumen necesario de la piscina de enfriamiento súbito se consideró una transferencia de calor completa entre el esmalte fundido y el medio de enfriamiento, que consiste en una mezcla de agua y hielo. La cantidad de agua y hielo requerida para el enfriamiento, se calcularon con la ecuación 2.4.

$$m_e \times C_{p_e} \times T_i - T_f = m_w \times C_{p_w} \times T_f - T_i + m_c \times \lambda_c \quad [2.4]$$

Donde:

m_e	:	Masa fundida de esmalte (kg)
C_{p_e}	:	Calor específico del esmalte fundido (kJ/kg-K)
T_i	:	Temperatura inicial (°C)
T_f	:	Temperatura final (°C)
m_w	:	Masa de agua de enfriamiento (kg)
C_{p_w}	:	Calor específico del agua (kJ/kg-K)
m_c	:	Masa de hielo (kg)
λ_c	:	Calor latente del hielo (kJ/kg)

El dimensionamiento de la piscina se lo hizo mediante la ecuación 2.5.

$$V = \frac{m_w}{\delta} \quad [2.5]$$

Donde:

V	:	Volumen de la piscina (m ³)
δ	:	Densidad del agua (kg/m ³)

2.4.5 Lavado y secado del esmalte

El esmalte obtenido contiene un porcentaje de agua residual el cual se requiere retirar del esmalte. Para determinar el área del secador, se utilizó la ecuación 2.6.

$$A = \frac{m}{r} \times t \quad [2.6]$$

Donde:

- m : Masa de agua (kg)
- r : Tasa de evaporación (kg/m²s)
- t : Tiempo de secado

2.4.6 Molienda del producto final

Se sometió a un proceso de molienda con el fin de garantizar una granulometría final menor que 74 µm (malla ASTM # 200), las consideraciones para la selección del equipo y el cálculo de la potencia absorbida se calculan de igual manera que para la molienda de materias primas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RELACIÓN DEL VIDRIO DE DESECHO CON EL FLUORURO DE SODIO EN LA TEMPERATURA DE FUSIÓN DE LA MEZCLA DE MATERIAS PRIMAS

En esta sección se analizan los resultados obtenidos en las pruebas de tratamientos térmicos aplicadas a cada una de las mezclas de materias primas con diferentes relaciones en peso entre el vidrio de desecho y el fluoruro de sodio.

3.1.1 FORMULACIÓN Y DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE MATERIAS PRIMAS

3.1.1.1 Formulación

Se formularon 6 mezclas vitrificables con diferente relación entre los pesos del vidrio de desecho y del fluoruro de sodio $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$ como se puede observar en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Mezclas con diferente relación $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$

Mezcla	C-I	C-II	C-III	C-IV	C-V	C-VI
Relación $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$	$\frac{20}{5}$	$\frac{21}{4}$	$\frac{22}{3}$	$\frac{23}{2}$	$\frac{24}{1}$	$\frac{25}{0}$

La composición en peso de las 6 mezclas formuladas se presenta en la tabla 3.2.

3.1.1.3 Tratamiento térmico

Las pastillas obtenidas con las diferentes composiciones fueron sometidas a un tratamiento térmico con temperaturas máximas de 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C y 700 °C. En la tabla 3.4 se presentan las etapas del ciclo de cocción aplicado.

Tabla 3.4. Tratamiento térmico aplicado a las pastillas

Etapa	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	$T_a^* - T$	25
Maduración	T	10
Enfriamiento	$T - T_a$	1200

* T_a : Temperatura ambiente

En la figura 3.1 se ilustran los tratamientos térmicos que se aplicaron a las pastillas obtenidas de cada composición.

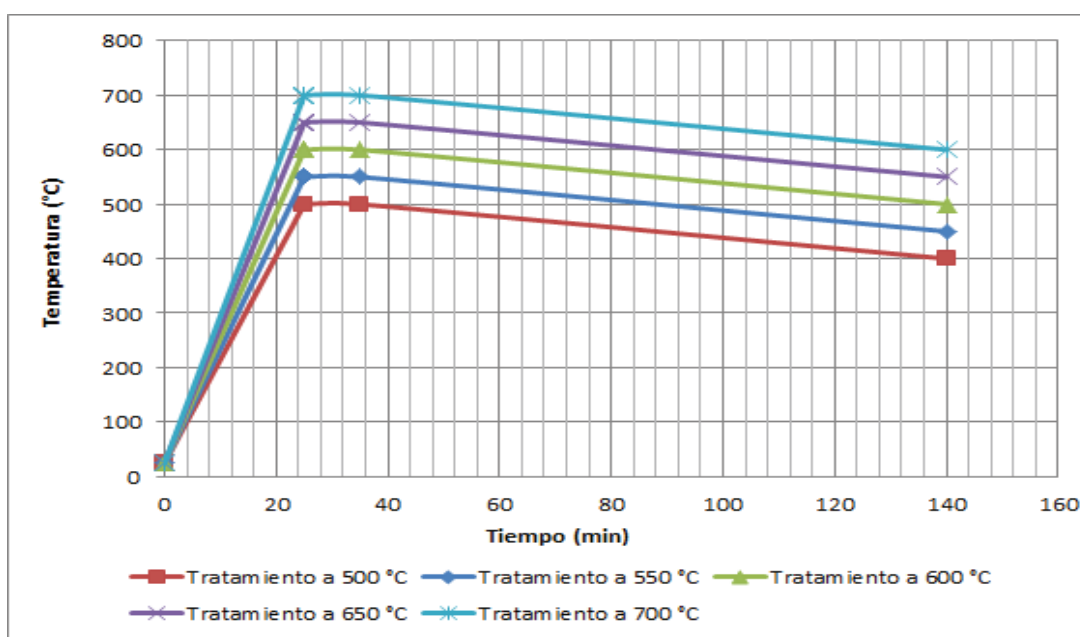


Figura 3.1. Tratamientos térmicos aplicados a las pastillas

3.1.2 EVALUACIÓN DE LA COCCIÓN DE LAS PASTILLAS

Para determinar el porcentaje de fase vítrea que presentó cada muestra luego del tratamiento térmico, se realizó un análisis nodal de las fotografías obtenidas con el microscopio petrográfico. Para lo cual primero se dibujó una cuadrícula en cada imagen y en las zonas con total transmisión de la luz se colocó una cruz para facilitar el conteo de la fase cristalina que corresponde a la fase que no fundió. Después, se realizó el conteo de cada cruz y se determinó el porcentaje de fase cristalina; la fase vítrea presente se obtuvo por diferencia de porcentajes. En la tabla 3.5 se presentan las fotografías de la mezcla de composición C-I, que fueron sometidas a los diferentes tratamientos térmicos y su respectivo análisis nodal.

Tabla 3.5. Mezcla C-I luego de los diferentes tratamientos térmicos

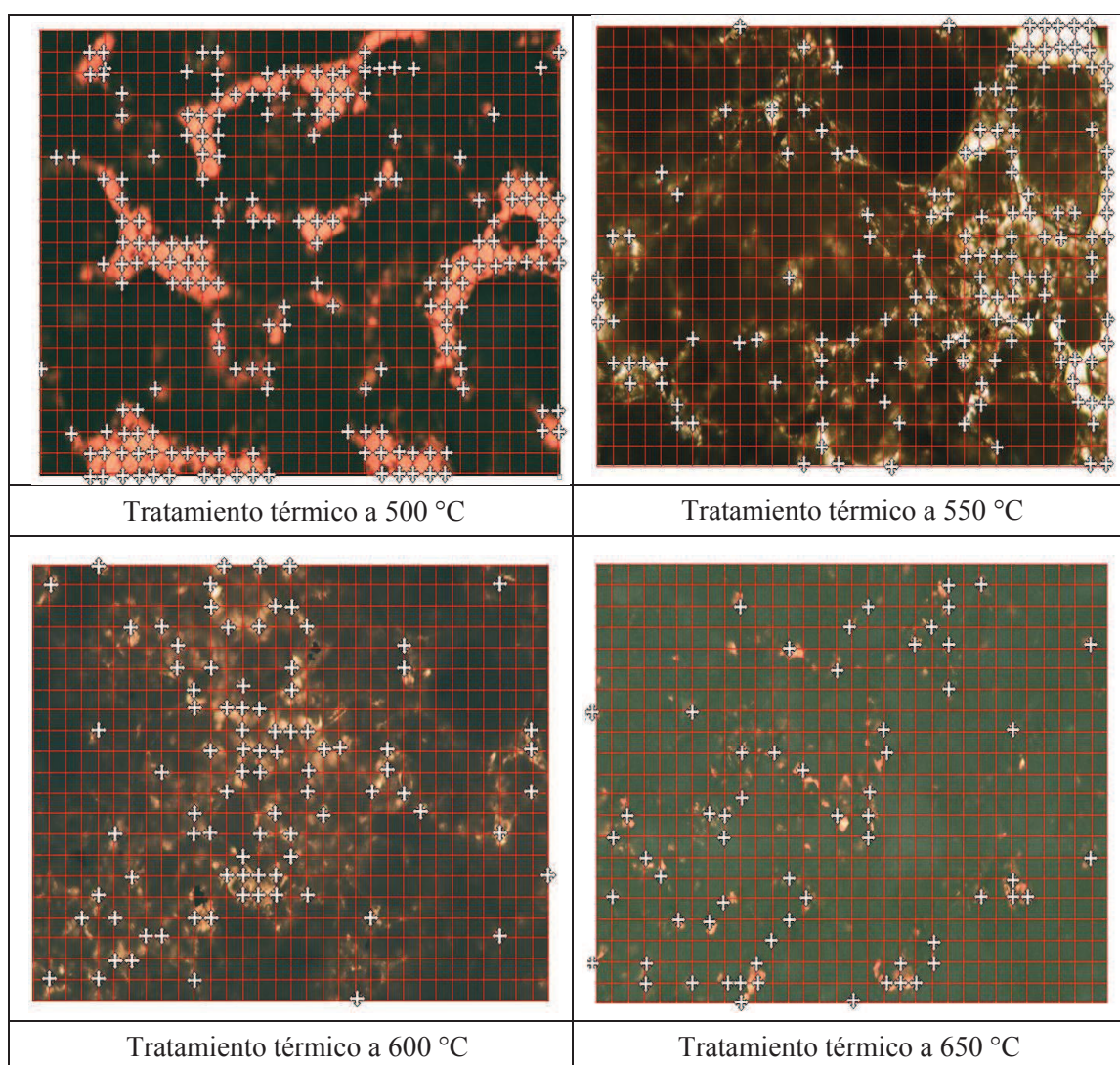
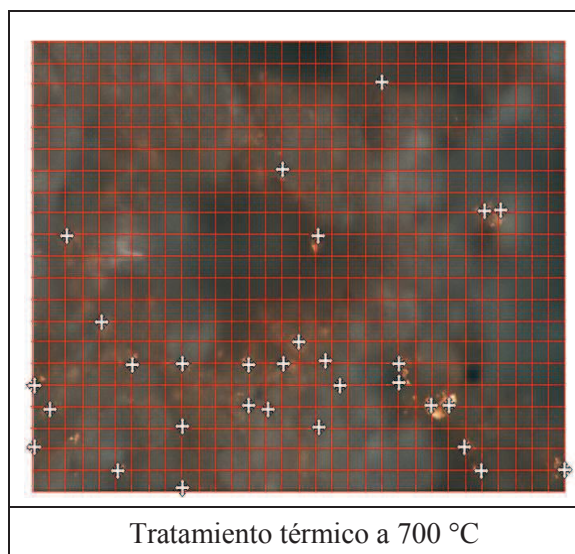


Tabla 3.5. Mezcla C-I luego de los diferentes tratamientos térmicos (**continuación...**)

El análisis nodal aplicado a las fotografías de la mezcla C-I, deja ver el resultado que se reporta en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-I con diferentes tratamientos térmicos

Temperatura (°C)	% de fase vítrea
500	74,66
550	80,30
600	87,88
650	91,6
700	96,01

Como se esperaba, el aumento de la temperatura permitió lograr una mayor formación de vidrio en la mezcla de composición C-I que tiene una relación $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$ de 20 % vidrio de desecho y 5 % de fluoruro de sodio. Cuando la mezcla de materias primas se sometió a tratamientos térmicos con temperaturas de maduración superiores a 600 °C y luego se enfrió, se obtuvieron porcentajes de fase vítrea mayores que 90 %. Del análisis nodal presentado en la tabla 3.6 se observa que la mezcla de materias primas de composición C-I sometida a un tratamiento térmico con temperatura máxima de 500 °C, presentó la menor

formación de fase amorfa, aproximadamente 74,66 %, mientras que los resultados obtenidos en el caso de C-I / T2 que fue tratada a 550 °C, donde el porcentaje de fase vítrea alcanza el 80,30 %. Esto se explica debido a que el aumento de la temperatura en estudio permitió una mayor vitrificación de la mezcla, por lo que las fotografías de esta composición evaluadas a temperaturas superiores muestran una mayor formación de fase vítrea como se observa en el ensayo C-I / T5 que fue sometido a 700 °C, ya que presentó un porcentaje de 96,01.

En la tabla 3.7 se presentan las fotografías de la mezcla de composición C-II sometidas a los diferentes tratamientos térmicos y su respectivo análisis nodal.

Tabla 3.7. Mezcla C-II luego de los diferentes tratamientos térmicos

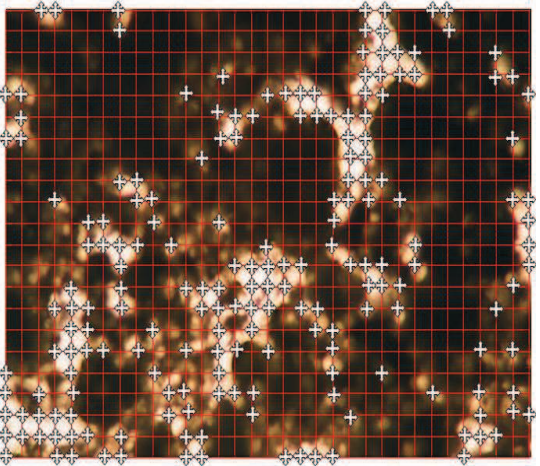
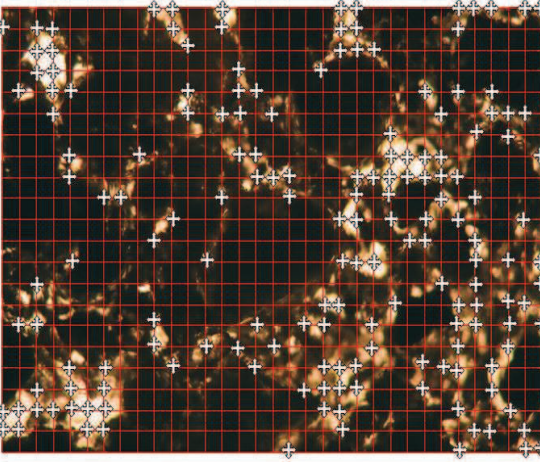
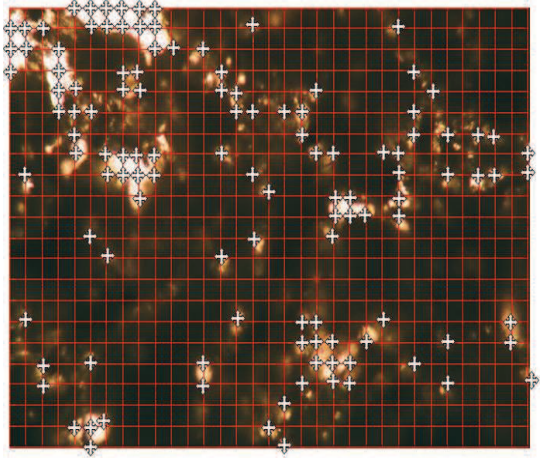
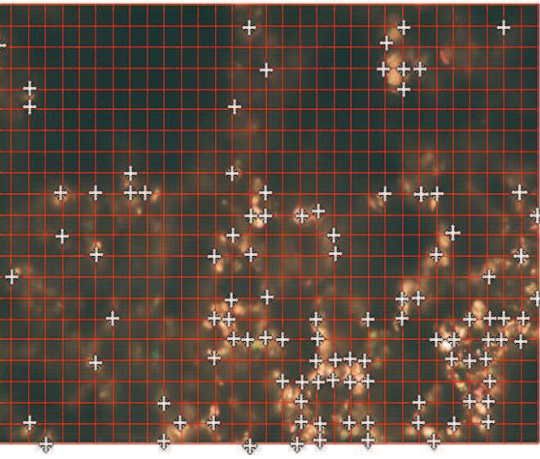
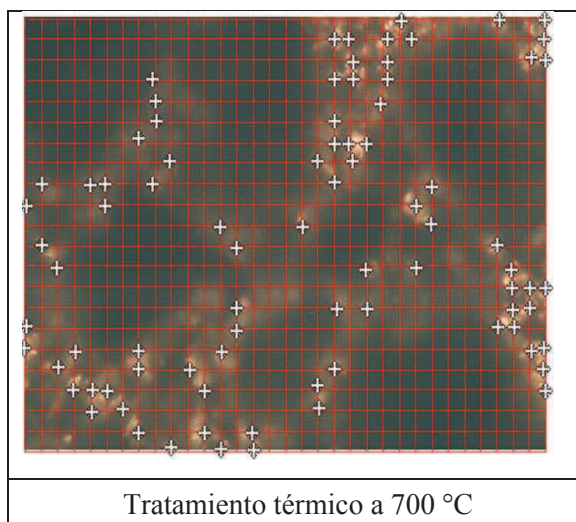
	
<p>Tratamiento térmico a 500 °C</p>	<p>Tratamiento térmico a 550 °C</p>
	
<p>Tratamiento térmico a 600 °C</p>	<p>Tratamiento térmico a 650 °C</p>

Tabla 3.7. Mezcla C-II luego de los diferentes tratamientos térmicos (**continuación...**)

En la tabla 3.8 se presenta el resultado del análisis nodal correspondiente a la mezcla de composición C-II.

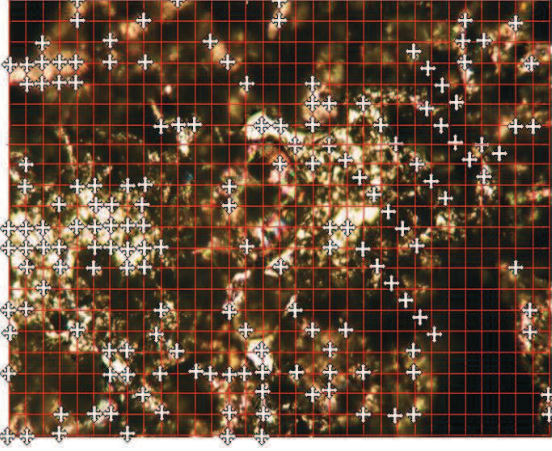
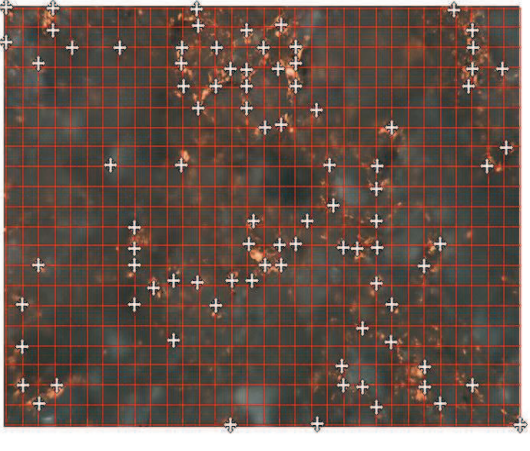
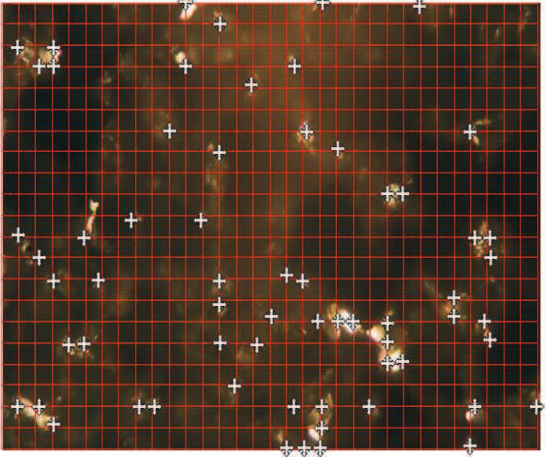
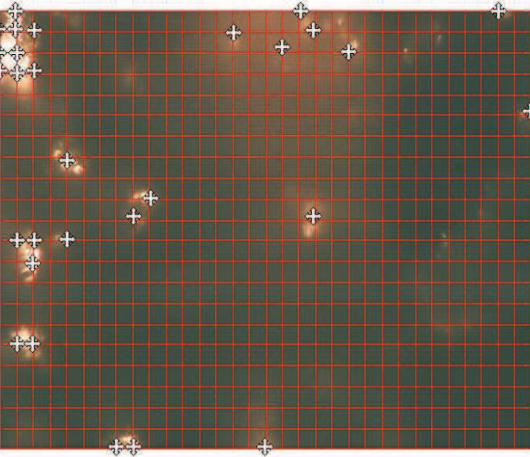
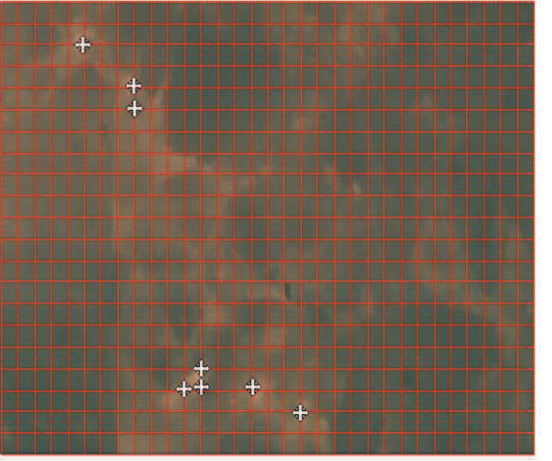
Tabla 3.8. Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-II con diferentes tratamientos térmicos

Temperatura (°C)	% de fase vítrea
500	74,52
550	76,36
600	83,61
650	85,67
700	88,43

Como se observa en la tabla 3.8, la composición C-II que tiene una relación $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$ de 21 % vidrio de desecho y 4 % de fluoruro de sodio presentó porcentajes de fase vítrea menores a las que se obtuvo con la mezcla C-I en cada tratamiento térmico.

La tabla 3.9 presenta las fotografías de la mezcla de composición C-III sometidas a los diferentes tratamientos térmicos y su respectivo análisis nodal.

Tabla 3.9. Mezcla C-III luego de los diferentes tratamientos térmicos

	
Tratamiento térmico a 500 °C	Tratamiento térmico a 550 °C
	
Tratamiento térmico a 600 °C	Tratamiento térmico a 650 °C
	
Tratamiento térmico a 700 °C	

En la tabla 3.10 se presenta el resultado del análisis nodal correspondiente a la mezcla de composición C-III.

Tabla 3.10. Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-III con diferentes tratamientos térmicos

Temperatura (°C)	% de fase vítrea
500	75,62
550	87,74
600	91,18
650	96,69
700	98,90

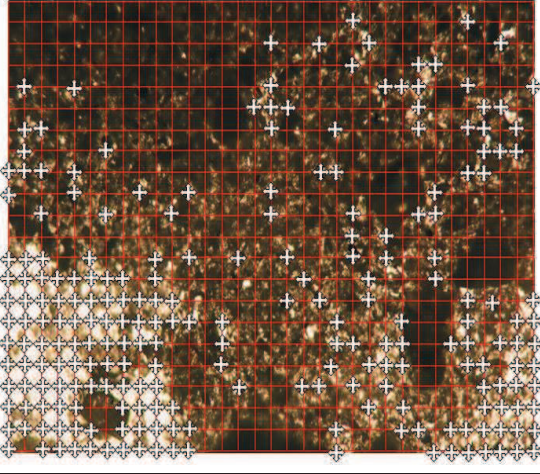
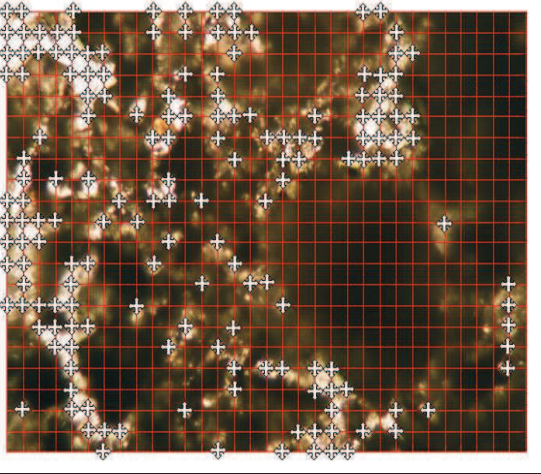
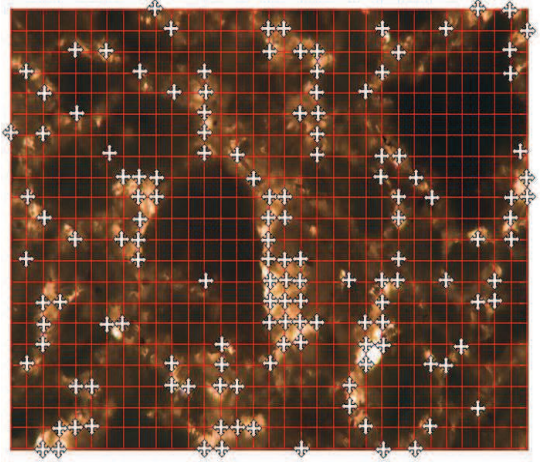
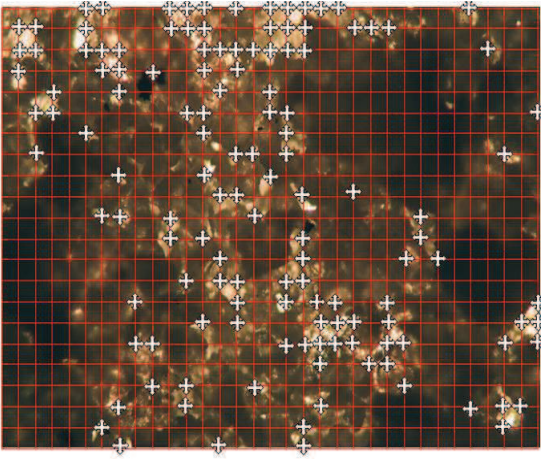
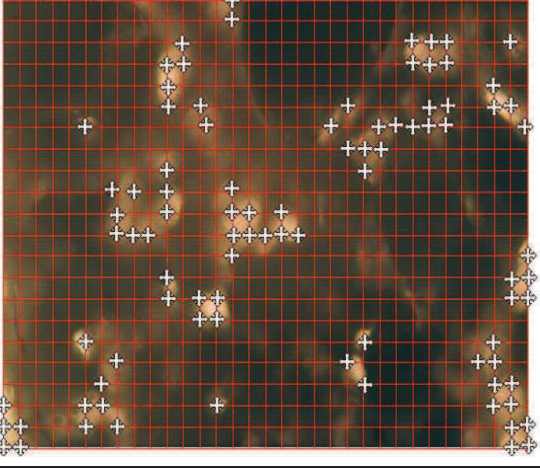
De igual manera, el aumento de la temperatura permitió lograr una mayor formación de fase vítrea en la mezcla de composición C-III que tiene una relación $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$ de 22 % vidrio de desecho y 3 % de fluoruro de sodio; además, se observa que el porcentaje de fase vítrea presente en este caso es mayor en relación a las que se obtuvieron con la composición C-I y C-II.

Del análisis de los resultados reportados en la tabla 3.10, se observa que la composición C-III presentó el mayor porcentaje de fase vítrea en todas las temperaturas estudiadas.

Además, cuando la mezcla de materias primas se sometió a tratamientos térmicos con temperaturas superiores que 600 °C, se obtuvieron porcentajes de fase vítrea mayores al 90 % como es el caso de las composiciones C-I, C-II y C-III. Se pudo concluir que, en los ensayos realizados a temperaturas sobre los 600 °C existió una vitrificación parcialmente completa de la mezcla.

La tabla 3.11 presenta las fotografías de la mezcla de composición C-IV sometidas a los diferentes tratamientos térmicos y su respectivo análisis nodal.

Tabla 3.11. Mezcla C-IV luego de los diferentes tratamientos térmicos

	
Tratamiento térmico a 500 °C	Tratamiento térmico a 550 °C
	
Tratamiento térmico a 600 °C	Tratamiento térmico a 650 °C
	
Tratamiento térmico a 700 °C	

En la tabla 3.12 se presenta el resultado del análisis nodal correspondiente a la mezcla de composición C-IV.

Tabla 3.12. Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-IV con diferentes tratamientos térmicos

Temperatura (°C)	% de fase vítrea
500	68,6
550	76,17
600	81,54
650	82,09
700	87,6

Los porcentajes de fase vítrea que se obtuvieron de la mezcla de composición C-IV que tiene una relación $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$ de 23 % vidrio de desecho y 2 % de fluoruro de sodio son menores a los que se obtuvo con las mezclas anteriores y la tendencia de aumento con la temperatura se mantiene.

La tabla 3.13 presenta las fotografías de la mezcla de composición C-V sometidas a los diferentes tratamientos térmicos y su respectivo análisis nodal.

Tabla 3.13. Mezcla C-V luego de los diferentes tratamientos térmicos

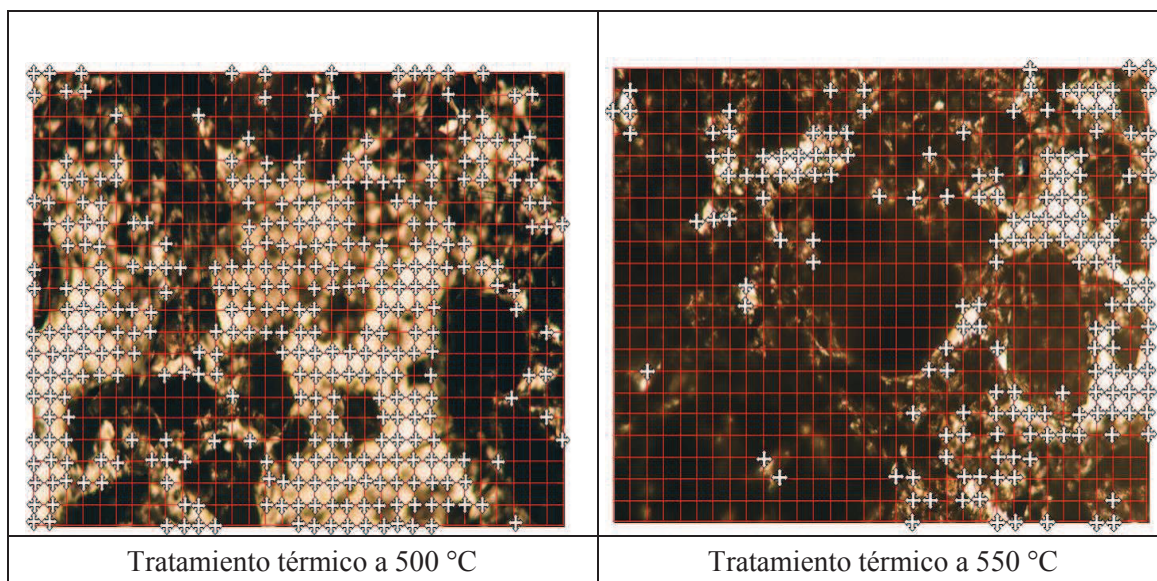
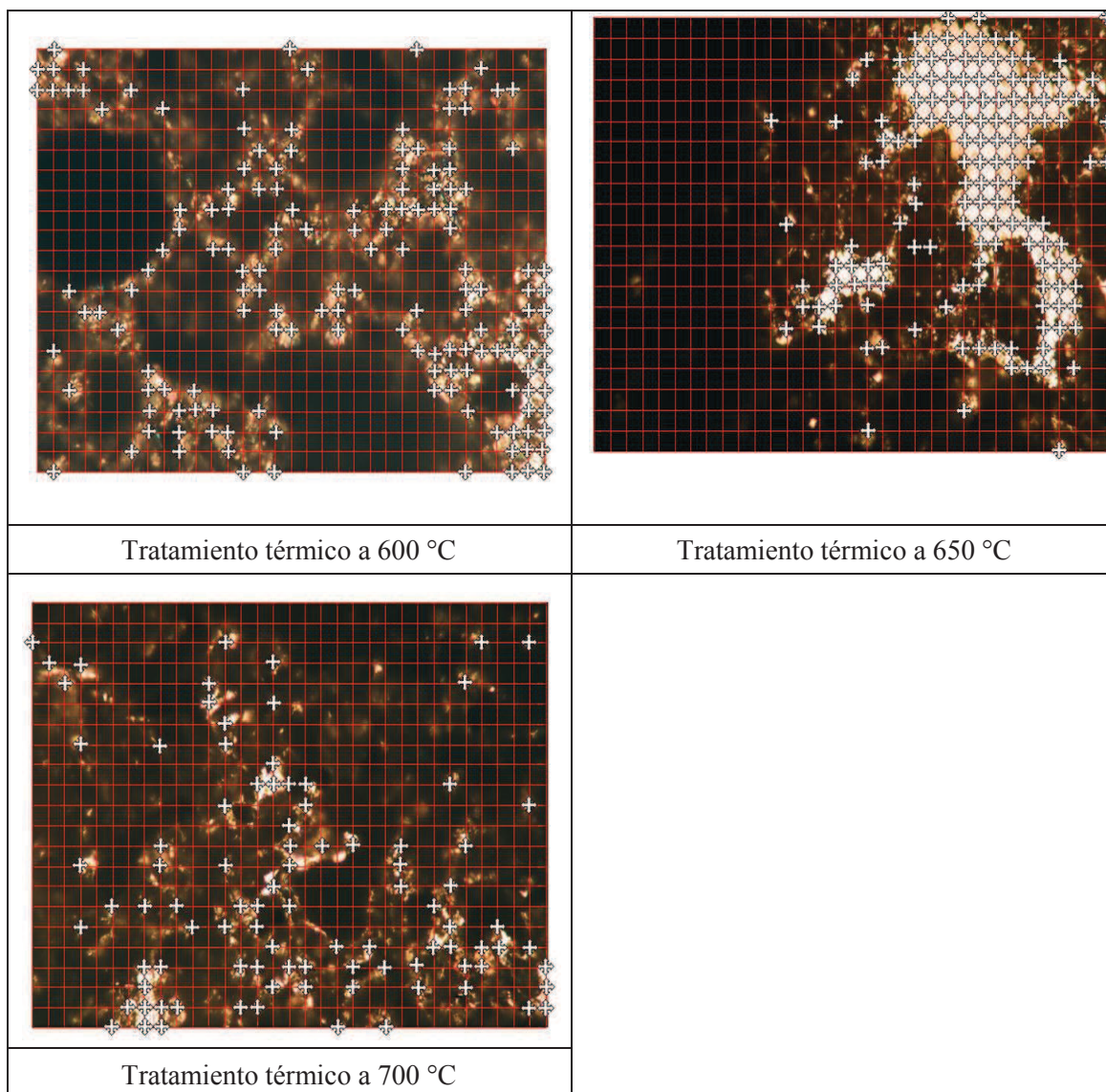


Tabla 3.13. Mezcla C-V luego de los diferentes tratamientos térmicos

En la tabla 3.14 se presenta el resultado del análisis nodal correspondiente a la mezcla de composición C-V

Tabla 3.14. Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-V con diferentes tratamientos térmicos

Temperatura (°C)	% de fase vítrea	Temperatura (°C)	% de fase vítrea
52,34	52,34	79,48	79,48
77,00	77,00	87,19	87,19
79,06	79,06		

Se puede observar que, el aumento de la temperatura permitió lograr una mayor formación de fase vítrea en la mezcla de composición C-V que tiene una relación $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$ de 21 % vidrio de desecho y 4 % de fluoruro de sodio; sin embargo, los porcentajes son menores que en los casos anteriores.

La tabla 3.15 presenta las fotografías de la mezcla de composición C-VI sometidas a los diferentes tratamientos térmicos y su respectivo análisis nodal.

Tabla 3.15. Mezcla C-VI luego de los diferentes tratamientos térmicos

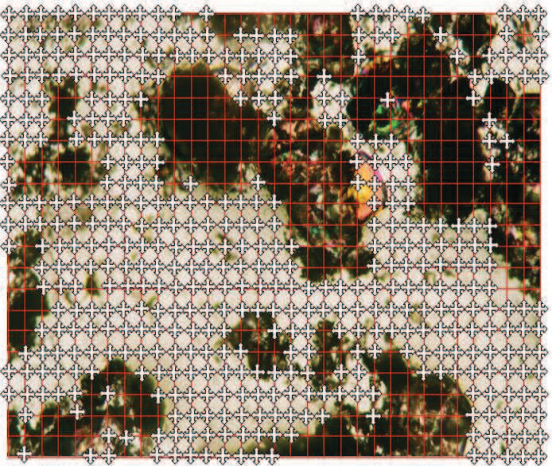
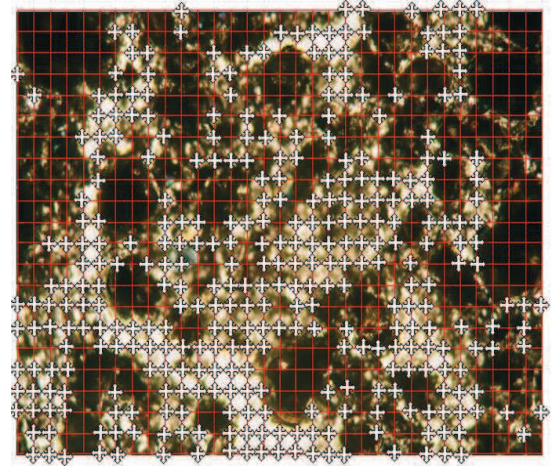
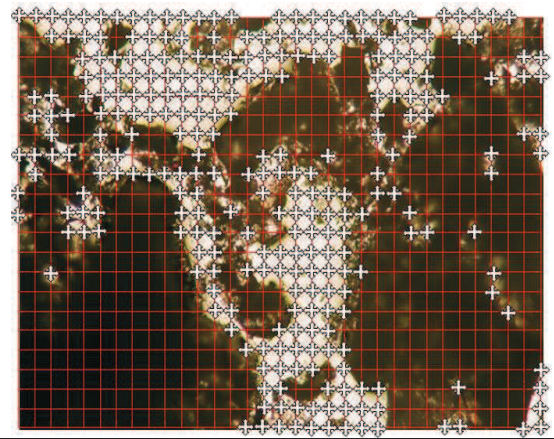
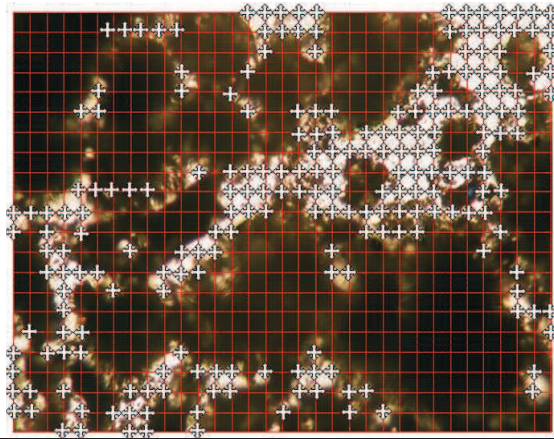
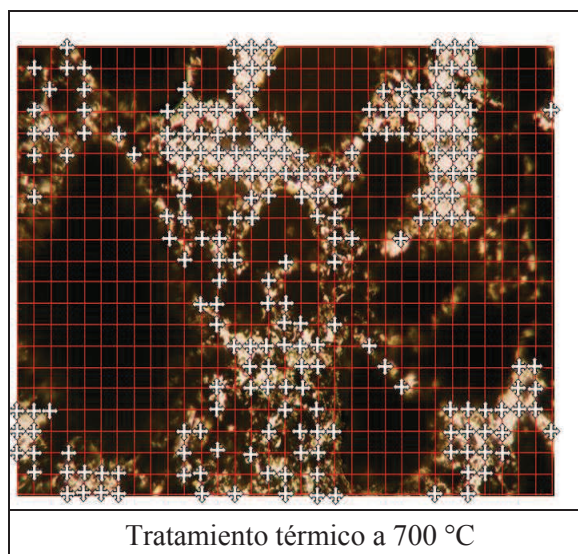
	
<p>Tratamiento térmico a 500 °C</p>	<p>Tratamiento térmico a 550 °C</p>
	
<p>Tratamiento térmico a 600 °C</p>	<p>Tratamiento térmico a 650 °C</p>

Tabla 3.15. Mezcla C-VI luego de los diferentes tratamientos térmicos (**continuación...**)

En la tabla 3.16 se presenta el resultado del análisis nodal correspondiente a la mezcla de composición C-VI.

Tabla 3.16. Porcentajes de fase vítrea presentes en la mezcla C-VI con diferentes tratamientos térmicos

Temperatura (°C)	% de fase vítrea
500	36,91
550	54,68
600	60,61
650	69,56
700	70,39

El aumento de la temperatura permitió lograr una mayor formación de vidrio en la mezcla de composición C-VI que tiene una relación $\frac{\text{Vidrio}}{\text{NaF}}$ de 25 % vidrio de desecho y 0 % de fluoruro de sodio; sin embargo, con esta mezcla se obtuvo la menor formación de fase vítrea que en todos los casos anteriores, esto se debió a que esta composición no contiene fluoruro de sodio el cual ayuda a disminuir la temperatura de fusión. Las composiciones C-IV, C-V y C-VI presentaron una menor formación de fase vítrea como se observa en las tablas 3.12, 3.14 y 3.16, se presume que la tendencia disminuyó debido a que en su formulación el

contenido de material fundente fue menor también, ya que contenían 2 %, 1 % y 0 % de fluoruro de sodio, respectivamente.

Se concluyó que la mezcla de materias primas de composición C-III con un tratamiento térmico a 600 °C presentó una formación parcialmente completa de fase amorfa, aproximadamente el 91,18 %, la cual contiene 22 % de vidrio de desecho y 3 % de fluoruro de sodio. Se tomó como referencia la temperatura de 600 °C puesto que fue de interés obtener un esmalte que presente una temperatura de fusión en un intervalo de temperaturas de 550 °C a 600 °C para evitar deformaciones de la superficie de aluminio al cual se aplicará al esmalte.

3.2 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE MADURACIÓN Y EL TIEMPO DE MADURACIÓN DEL ESMALTE COMO RECUBRIMIENTO DE PIEZAS DE ALUMINIO

El diseño del ciclo de cocción de un esmalte porcelánico requiere de los valores de la temperatura y el tiempo de maduración. En la sección 3.1 se determinó que la mezcla de materias primas de composición C-III presentó el mayor porcentaje de fase vítrea, y se concluyó que la temperatura de fusión del esmalte es superior a 600 °C. Por lo cual se procesó el esmalte E-III, se lo aplicó a la superficie de aluminio preparada como se describe en la sección 2.2.1 y se sometió al proceso de cocción que se presenta en la tabla 3.17.

Tabla 3.17. Rampa de temperatura del ciclo de cocción

Ciclo de cocción			
Temperatura (° C)	Tiempo (min)	Temperatura (° C)	Tiempo (min)
Ta – 300	15	600 – 600	10
300 – 300	5	600 – 400	45
300 – 600	10	400 – Ta	1200

En la figura 3.2 se ilustra el ciclo de cocción CC-6 aplicado al esmalte.

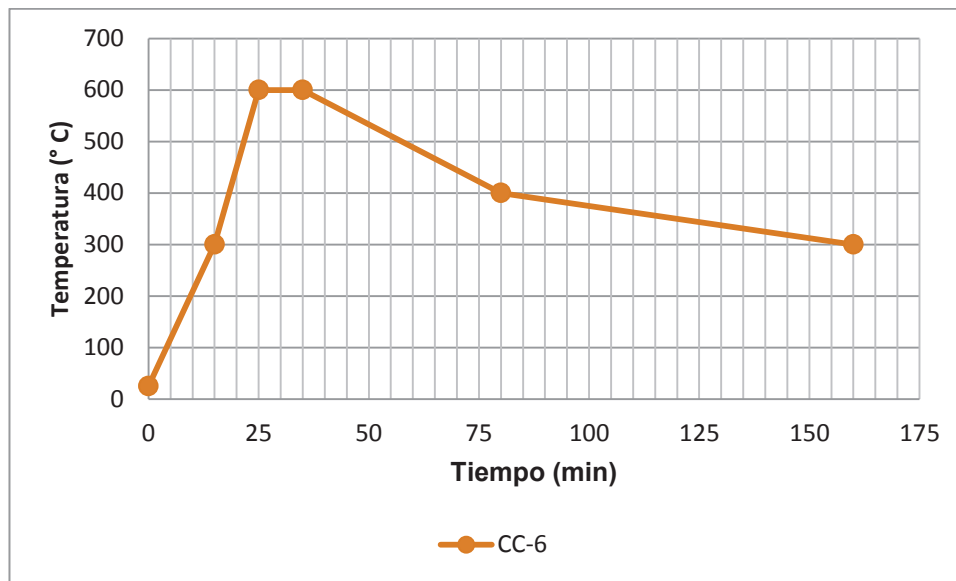


Figura 3.2. Ciclo de cocción CC-6 aplicado al esmalte E-III

La placa obtenida de este ensayo se ilustra en la figura 3.3.

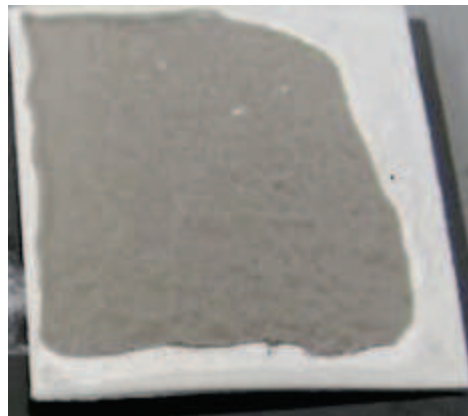


Figura 3.3. Placa recubierta con esmalte E-III a 600 °C y limpieza convencional

El coeficiente de expansión térmica lineal del esmalte se consideró muy similar al del vidrio doméstico, cuyo valor es $5,80E-06 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; el del aluminio es $28,50 E-06 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, por lo que se tuvo una diferencia superior al 80 %, lo que provocó áreas de la pieza sin esmalte debido a que el sustrato metálico se expande con mayor rapidez que la capa de recubrimiento como se puede observar en la figura 3.3 (Hufnagel, 1992, p. 103).

Con el objetivo de disminuir estas zonas sin esmalte se realizó un precalentamiento del sustrato a 538 °C durante 5 min, este pretratamiento adicional permitió que la placa se expanda y por lo tanto el esmalte cubre un área mayor de la pieza, con lo cual se consiguió una placa recubierta en la que no se observó los bordes sin recubrimiento. En la figura 3.4 se muestra la placa recubierta con el esmalte porcelánico cuando se ha realizado un precalentamiento previo a la aplicación del recubrimiento.



Figura 3.4. Placa recubierta con esmalte E-III a 600 °C, con limpieza convencional y precalentamiento

De la comparación de la textura de la placa esmaltada únicamente con limpieza convencional que se presenta en la figura 3.3 y de la placa esmaltada con limpieza convencional y precalentamiento de la figura 3.4 se dedujo que el precalentamiento del sustrato es una fase indispensable en la preparación del mismo.

3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE MADURACIÓN PARA EL ESMALTE E-III

Para la determinación de la temperatura de maduración se realizó la preparación del sustrato con la limpieza convencional y el tratamiento térmico previo requerido de 538 °C como se recomienda en la revisión bibliográfica (Funatani et al., 2003, p. 555) y se comprobó que permite mejorar la calidad de la superficie recubierta.

Las placas esmaltadas correspondientes a los ensayos con diferentes temperaturas de maduración se reportan en la tabla 3.18., se indica el ciclo térmico al que fue sometido cada placa, la fotografía correspondiente a cada experimento y se evaluaron los siguientes parámetros:

- porcentaje de superficie recubierta
- homogeneidad del color del esmalte
- presencia de brillo en el recubrimiento porcelánico
- adherencia del recubrimiento con el sustrato
- fallas en la superficie recubierta

Tabla 3.18. Resultados de las pruebas de esmaltado con esmalte E-III a diferentes temperaturas de maduración y tiempo de maduración 10 min


CICLO	PLACA ESMALTADA	CARÁCTERÍSTICAS
CC-1 T _m = 550 °C t _m = 10 min		<ul style="list-style-type: none"> ▪ La superficie de la placa ésta recubierta pero no está adherida al sustrato ▪ Color homogéneo ▪ Espesor uniforme ▪ Presenta ondulaciones
CC-2 T _m = 560 °C t _m = 10 min		<ul style="list-style-type: none"> ▪ La superficie de la placa ésta recubierta pero no está adherida al sustrato ▪ Color homogéneo ▪ Espesor uniforme ▪ Presenta ondulaciones

Tabla 3.18. Resultados de las pruebas de esmaltado con esmalte E-III a diferentes temperaturas de maduración y tiempo de maduración 10 min (**continuación...**)





CICLO	PLACA ESMALTADA	CARÁCTERÍSTICAS
<p>CC-3 T_m= 570 °C t_m= 10 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ La superficie de la placa ésta recubierta y se observa adherencia al sustrato ▪ Color homogéneo ▪ Espesor uniforme ▪ Presenta buena adherencia a la superficie
<p>CC-4 T_m= 580 °C t_m= 10 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ La superficie de la placa ésta recubierta y se observa que está adherida al sustrato ▪ Color homogéneo ▪ Espesor uniforme ▪ Presenta buena adherencia a la superficie
<p>CC-5 T_m= 590 °C t_m= 10 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 % de la superficie de la placa recubierta ▪ Color homogéneo ▪ Espesor uniforme ▪ Presenta buena adherencia a la superficie

Tabla 3.18. Resultados de las pruebas de esmaltado con esmalte E-III a diferentes temperaturas de maduración y tiempo de maduración 10 min (**continuación...**)

CICLO	PLACA ESMALTADA	CARÁCTERÍSTICAS
CC-6 T _m = 600 °C t _m = 10 min		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 % de la superficie de la placa recubierta ▪ Color homogéneo ▪ Espesor poco uniforme ▪ Presenta buena adherencia a la superficie

Las placas obtenidas de cada ensayo se evaluaron mediante el método cuantitativo de sumatoria por puntos, las consideraciones de evaluación se presentan en la tabla 3.19.

Tabla 3.19. Consideraciones para asignación de calificación de parámetros del esmalte

Parámetro evaluado	Calificación asignada				
	1	2	3	4	5
Superficie recubierta	La placa ésta recubierta pero no tiene adherencia	La adherencia del esmalte al sustrato es mayor al 30 %	La adherencia del esmalte al sustrato es mayor al 60 %	La adherencia del esmalte al sustrato es mayor al 90 %	La adherencia del esmalte al sustrato es 100 %
Homogeneidad del color	Presencia de puntos negros en 100 %	Presencia de puntos negros en 70 %	Presencia de puntos negros en 50 %	Presencia de puntos negros en 30 %	Presencia de puntos negros en 0 %
Presencia de brillo	El esmalte no presenta brillo	El esmalte presenta brillo escaso	El esmalte presenta poco brillo	El esmalte presenta brillo moderado	El esmalte presenta brillo
Presencia de fallas	La superficie presenta formación de burbujas y ondulaciones	La superficie presenta formación de burbujas y ondulaciones en nivel medio-alto	La superficie presenta moderada formación de burbujas y ondulaciones	La superficie presenta poca formación de burbujas y ondulaciones	La superficie no presenta formación de burbujas ni ondulaciones

En la tabla 3.20, se reporta el resultado de la evaluación de las placas esmaltadas mediante el método de selección por puntos.

Tabla 3.20. Resultados de la evaluación de las placas esmaltadas con diferentes temperaturas de maduración

Factor Relevante	Ponderación de cada ciclo					
	CC-1	CC-2	CC-3	CC-4	CC-5	CC-6
Superficie recubierta	1	1	4	4	4	5
Homogeneidad del color	5	5	5	5	5	5
Presencia de brillo	1	1	1	2	2	4
Presencia de fallas	3	3	3	3	3	3
Suma	10	10	13	14	14	17

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 3.20 para la determinación de la temperatura de maduración, se nota que el CC-6 presenta una sumatoria mayor lo que significa que a la temperatura de 600 °C se obtuvo la placa esmaltada con los mejores resultados.

3.2.2 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MADURACIÓN PARA EL ESMALTE E-III

Una vez determinada la temperatura de maduración, se varió el tiempo de maduración entre 10 min y 25 min con rango de 5 min con el objetivo de mejorar la calidad de la superficie esmaltada, ya que el ciclo de cocción CC-6 se realizó con un tiempo de maduración de 10 min y se presumió que al aumentar este intervalo se podría conseguir mejores resultados.

Los resultados del estudio para la determinación del tiempo de maduración del esmalte E-III, se reportan en la tabla 3.21.

Tabla 3.21. Resultados de las pruebas de esmaltado con E-III con temperatura de maduración de 600 °C a diferentes tiempos de maduración





CICLO	PLACA ESMALTADA	CARÁCTERÍSTICAS
<p>CC-6a T_m= 600 °C t_m= 10 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 % de la superficie de la placa recubierta ▪ Color homogéneo ▪ Espesor poco uniforme ▪ Presenta buena adherencia a la superficie ▪ La superficie presenta brillo
<p>CC-6b T_m= 600 °C t_m= 15 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 90 % de la superficie de la placa recubierta ▪ Color homogéneo ▪ Espesor uniforme ▪ Presenta buena adherencia a la superficie ▪ La superficie presenta brillo
<p>CC-6c T_m= 600 °C t_m= 20 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 % de la superficie de la placa recubierta ▪ Color homogéneo ▪ Espesor poco uniforme ▪ Presenta buena adherencia a la superficie ▪ La superficie presenta brillo

Tabla 3.21. Resultados de las pruebas de esmaltado con esmalte E-III con temperatura de maduración de 600 °C a diferentes tiempos de maduración (**continuación...**)

CICLO	PLACA ESMALTADA	CARÁCTERÍSTICAS
CC-6d T _m = 600 °C t _m = 25 min		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 90 % de la superficie de la placa recubierta ▪ Color homogéneo ▪ Espesor moderadamente uniforme ▪ Presenta buena adherencia a la superficie ▪ La superficie presenta brillo

De la misma forma que para la determinación de la temperatura de maduración, se evaluaron las placas obtenidas de cada ensayo mediante el método cuantitativo de selección por puntos, las consideraciones que se hicieron para este análisis son las reportadas en la tabla 3.19.

En la tabla 3.22 se reportan los resultados de análisis cuantitativo de las placas esmaltadas con diferentes tiempos de maduración.

Tabla 3.22. Resultados de la evaluación de las placas esmaltadas con diferentes tiempos de maduración

Factor Relevante	Ponderación de cada ciclo			
	CC-6a	CC-6b	CC-6c	CC-6d
Superficie recubierta	5	4	4	4
Homogeneidad del color	5	5	5	5
Presencia de brillo	4	4	4	5
Presencia de fallas	3	4	4	4
Suma	17	17	17	18

De los resultados presentados en la tabla 3.22 para la determinación del tiempo de maduración, se observa que el ciclo de cocción CC-6d alcanza una sumatoria mayor, lo que significa que al mantener 25 min la placa a 600 °C se consigue los

mejores resultados por lo que se concluye que la aparición de fallas en la superficie se debe a un corto tiempo de cocción; sin embargo, no se puede aumentar el tiempo ya que el sustrato se deforma.

En la figura 3.5 se presenta el ciclo de cocción CC-6d aplicado al esmalte E-III con el que se obtuvieron los mejores resultados en la textura de la superficie recubierta.

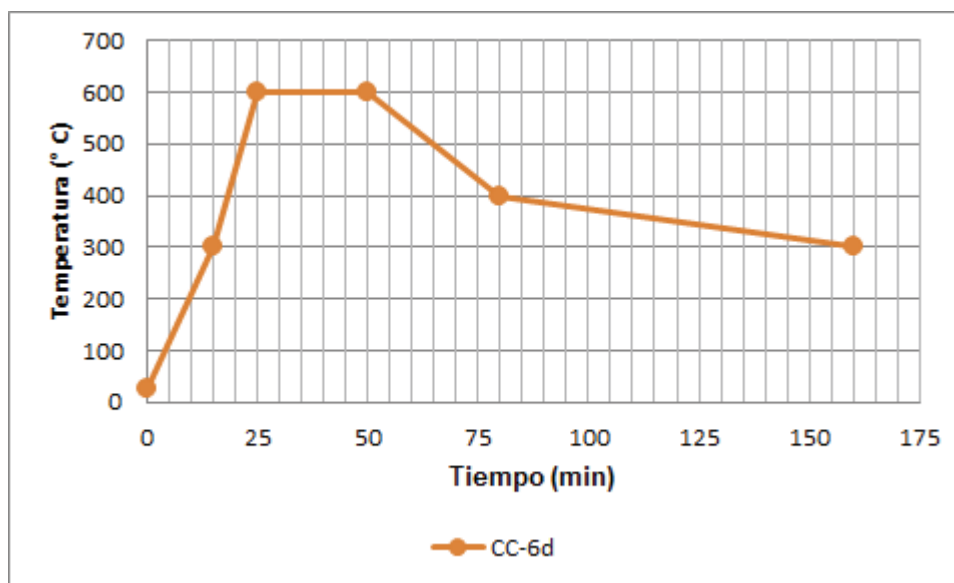


Figura 3.5. Ciclo de cocción CC-6d aplicado al esmalte E-III

3.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA RELACIÓN MOLAR ENTRE EL CARBONATO DE LITIO Y EL FLUORURO DE SODIO EN LA ADHERENCIA DEL ESMALTE CON LA SUPERFICIE DE ALUMINIO

El objetivo de esta sección es evaluar el efecto de las relaciones molares 1:1, 1:2 y 1:3 entre el carbonato de litio y el fluoruro de sodio en la adherencia del sustrato metálico con el esmalte, para ello se realizaron ensayos de resistencia al impacto a las placas esmaltadas con cada relación y sometidas al ciclo de cocción CC-6d.

3.3.1 FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES

A partir de la composición del esmalte E-III se calculó su respectiva fórmula molecular, con la finalidad de formular tres esmaltes con relaciones molares entre el carbonato de litio y el fluoruro de sodio equivalentes a 1:1, 1:2 y 1:3.

La fórmula molecular del esmalte E-III se muestra en la tabla 3.23, al esmalte con relación molar 1:1 se lo denominó como E-IIIa, para la relación 1:2 como E-IIIb y a la relación 1:3 como E-IIIc.

Tabla 3.23. Fórmula molecular del esmalte E-III

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na₂O	0,351	Al₂O₃	0,044	SiO₂	1,753
K₂O	0,099			B₂O₃	0,772
CaO	0,149				
ZrO₂	0,247				
Li₂O	0,153				
Total	1,000				
NaF	0,269				

La cantidad en moles del fluoruro de sodio se presenta como parte adicional en la fórmula molecular del esmalte E-III puesto que este compuesto no corresponde a ningún tipo de óxido. La fórmula molecular de los esmaltes E-IIIa, E-IIIb y E-IIIc fue la misma de la del esmalte E-III, ya que la cantidad de moles de cada tipo de óxido no cambió, únicamente varió la cantidad en moles del fluoruro de sodio, esta materia prima tiene la acción de fundente con lo que se esperó mejorar la adherencia del sustrato con el recubrimiento porcelánico. En la tabla 3.24 se reportan los esmaltes formulados, su denominación correspondiente y se señala la cantidad en moles de carbonato de litio y fluoruro de sodio con su respectiva relación molar.

Tabla 3.24. Esmaltes formulados con diferentes relaciones molares entre Li_2CO_3 y NaF

Esmalte	Moles de Li_2CO_3	Moles de NaF	Relación Molar
E-IIIa	0,153	0,153	1:1
E-IIIb	0,153	0,306	1:2
E-IIIc	0,153	0,459	1:3

3.3.2 DOSIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Las materias primas fueron dosificadas según los resultados de los cálculos realizados a partir de las fórmulas moleculares de cada esmalte, y se presentan en el Anexo V. A escala de laboratorio se prepararon 40 g de esmalte porcelánico, los resultados de los cálculos para la dosificación de las materias primas necesarias se reportan en las tabla 3.25.

Tabla 3.25. Dosificación de las materias primas para obtener 40 g de esmalte

Materia Prima	E-IIIa		E-IIIb		E-IIIc	
	% W/W	peso para 40 g de esmalte	% W/W	peso para 40 g de esmalte	% W/W	peso para 40 g de esmalte
Ácido Bórico	35,321	22,192	34,724	22,192	34,148	22,192
Alúmina	0,518	0,326	0,509	0,326	0,501	0,326
Bórax	12,134	7,624	11,929	7,624	11,731	7,624
Carbonato de potasio	4,021	2,526	3,953	2,526	3,888	2,526
Carbonato de litio	3,023	1,900	2,972	1,900	2,923	1,900
Cuarzo	8,934	5,613	8,783	5,613	8,637	5,613
Fluoruro de sodio	1,718	1,079	3,377	2,158	4,982	3,238
Vidrio	22,222	13,962	21,847	13,962	21,484	13,962
Zircosil	12,109	7,608	11,904	7,608	11,707	7,608
TOTAL	100,000	62,831	100,000	63,910	100,000	64,989

En la tabla 3.25, se muestra la composición química del esmalte E-IIIa, el cual contiene aproximadamente 3 % w/w de carbonato de litio, 1,7 % de fluoruro de sodio y una cantidad de vidrio de 22,22 %.


La composición química del esmalte E-IIIb contiene un porcentaje de fluoruro de sodio de 3,4 % aproximadamente, es decir el doble que el E-IIIa, pero la cantidad porcentual de carbonato de litio disminuye a un valor de 2,9 %.

La composición química del esmalte E-IIIc, que se presenta en la tabla 3.25 contiene una cantidad porcentual de 4,9 % de fluoruro de sodio y de carbonato de litio un 2,9 %, con lo cual la sumatoria en porcentaje de mezcla fundente es 7,9 %.

3.3.3 EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA DEL ESMALTE CON LA SUPERFICIE

Los resultados de las placas recubiertas con cada uno de los esmaltes formulados se presentan en las tablas 3.26, 3.27, y 3.28 mismas que fueron sometidas al ciclo de cocción determinado en la sección 3.2.

Tabla 3.26. Resultados de las placas recubiertas con el esmalte E-IIIa

CICLO DE COCCIÓN	PLACA ESMALTADA	CARÁCTERÍSTICAS
CC-6d Tm= 600 °C tm= 25 min		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 90 % de la superficie recubierta ▪ Color homogéneo ▪ Espesor poco uniforme ▪ Presenta poca adherencia ▪ La superficie no presenta brillo

Como se observa en la tabla 3.26, la placa obtenida no presenta buena adherencia; además, se puede notar que la composición del esmalte E-IIIa no permite obtener una superficie con brillo, esto se atribuye a que la cantidad porcentual de la sumatoria de la mezcla fundente de carbonato de litio y fluoruro

de sodio es de 4,74 %, que es un valor muy bajo para que se puede observar una acción fundente; razón por lo cual dicho esmalte no logró formar fase vítrea a la temperatura de 600 °C.


La tabla 3.27 presenta los resultados de la placa recubierta con el esmalte E-IIIb que fue sometida al ciclo de cocción CC-6d.

Tabla 3.27. Resultados de las placas recubiertas con el esmalte E-IIIb

CICLO DE COCCIÓN	PLACA ESMALTADA	CARÁCTERÍSTICAS
CC-6d T _m = 600 °C t _m = 25 min		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 % de la superficie recubierta ▪ Color homogéneo ▪ Espesor poco uniforme ▪ Presenta muy buena adherencia ▪ La superficie presenta brillo

La superficie recubierta con el esmalte E-IIIb, ilustrada en la tabla 3.27, presenta una muy buena adherencia del esmalte con el sustrato ya que la placa está recubierta de esmalte 100 %. Además que posee brillo, estas mejoras se deben a que dicho esmalte contiene una relación molar carbonato de litio y fluoruro de sodio de 1:2 respectivamente, y mayor cantidad de sustancias fundentes con una sumatoria porcentual de 6,35 %, lo que ayuda a que la cocción parcial del esmalte ocurra a 600 °C.

Tabla 3.28. Resultados de las placas recubiertas con esmalte E-IIIc

CICLO DE COCCIÓN	PLACA ESMALTADA	CARÁCTERÍSTICAS
CC-6d T _m = 600 °C t _m = 25 min		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 % de la superficie recubierta ▪ Color homogéneo ▪ Espesor uniforme ▪ Presenta excelente adherencia ▪ La superficie presenta brillo

La placa recubierta con esmalte E-IIIc que se muestra en la tabla 3.28 presenta muy buena adherencia con el sustrato puesto que la placa está recubierta de esmalte 100 % de su superficie, posee brillo y, sobre todo se ha logrado reducir las fallas como piel de naranja y saltado del esmalte.

La mejora obtenida en este ensayo se debe a que la composición química del esmalte E-IIIc presenta una sumatoria porcentual de la mezcla fundente de 7,91 %, mediante la cual se consigue una vitrificación completa del esmalte a la temperatura de 600 °C.

Con la finalidad de evaluar cuantitativamente la adherencia del esmalte con el sustrato se realizaron pruebas de impacto a cada una de las placas esmaltadas con diferente relación molar, que corresponden a los esmaltes E-IIIa, E-IIIb y E-IIIc. La energía que se transmite a la placa en la prueba de resistencia al impacto es igual a la energía potencial gravitatoria que tiene la esfera al inicio del ensayo y se calcula mediante la ecuación 3.1.

$$\text{Energía} = m \times g \times h \quad [3.1]$$

Donde:

- m : Masa de la esfera (kg)
 g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)
 h : Altura de lanzamiento de la esfera (m)

En la tabla 3.29 se reportan los valores de la masa de las esferas, las alturas a las que fueron lanzadas sobre las placas y su energía potencial gravitatoria.

Tabla 3.29. Energías aplicadas en la determinación de la resistencia al impacto

Masa de la esfera (kg)	Altura (m)	Energía (J)
6,88E-02	0,5	0,337
	1	0,674
	1,5	1,011
9,50E-02	0,5	0,466
	1	0,931
	1,5	1,397

En la tabla 3.30 se presentan los resultados de las placas sometidas a las pruebas de resistencia al impacto, mismas que fueron recubiertas con el esmalte E-IIIa y sometidas al ciclo de cocción CC-6d.

Tabla 3.30. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIa

ENERGÍA APLICADA	PLACA OBTENIDA	CRITERIO DE ADHERENCIA
0,337 J		Adherencia mala = 0 El esmalte porcelánico se desprende de la placa

Tabla 3.30. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIa
(continuación...)





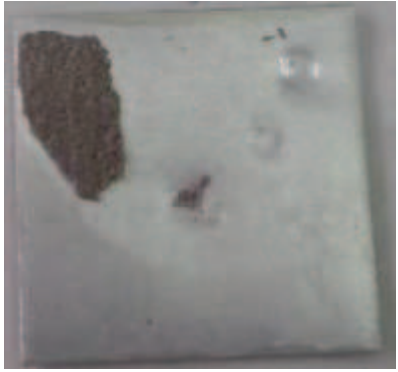
ENERGÍA APLICADA	PLACA OBTENIDA	CRITERIO DE ADHERENCIA
0,674		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
1,011		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
0,466		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>

Tabla 3.30. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIa
(continuación...)

ENERGÍA APLICADA	PLACA OBTENIDA	CRITERIO DE ADHERENCIA
0,931		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
1,397		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>

Al observar las placas recubiertas con el esmalte E-IIIa sometidas a las pruebas de resistencia al impacto presentadas en la tabla 3.30, se concluye que en todos los casos se tiene una mala adherencia ya que el esmalte porcelánico se desprende de la placa. La unión entre el sustrato y el esmalte fue insuficiente debido a que el esmalte no alcanzó su vitrificación.

En la tabla 3.31 se muestran los resultados de las placas sometidas a las pruebas de resistencia al impacto que fueron recubiertas con el esmalte E-IIIb y sometidas al ciclo de cocción CC-6d.

Tabla 3.31. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIb


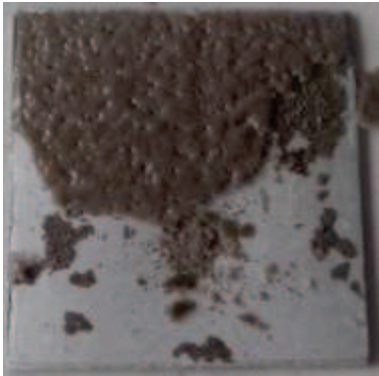


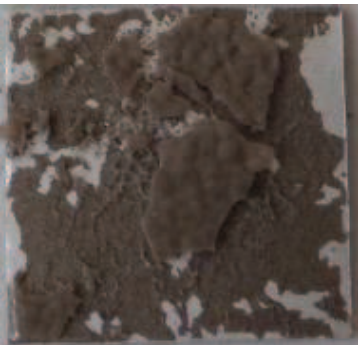

ENERGÍA APLICADA	PLACA OBTENIDA	CRITERIO DE ADHERENCIA
0,337 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
0,674 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
1,011 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>

Tabla 3.31. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIb (continuación...)

ENERGÍA APLICADA	PLACA OBTENIDA	CRITERIO DE ADHERENCIA
0,466 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
0,931 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
1,397 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>

Las placas esmaltadas con la composición E-IIIb presentaron mala adherencia con el sustrato. El esmalte se desprendió del metal, pero se observó la formación de una capa adherente cuando se aplicaron energías potenciales de 0,337 J, 0,674 J y 0,931 J.

En la tabla 3.32 se muestran los resultados de las placas sometidas a las pruebas de resistencia al impacto, mismas que fueron recubiertas con el esmalte E-IIIc y sometidas al ciclo de cocción CC-6d.

Tabla 3.32. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIc


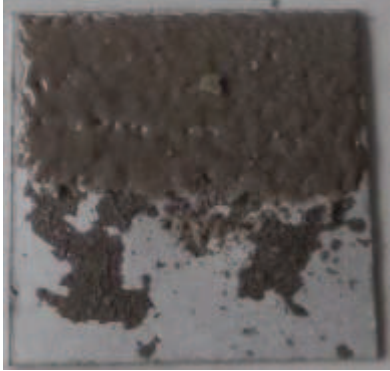




ENERGÍA APLICADA	PLACA OBTENIDA	CRITERIO DE ADHERENCIA
0,337 J		<p>Adherencia buena = 3</p> <p>El impacto no presenta círculos concéntricos</p>
0,674 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
1,011 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>

Tabla 3.32. Resultados de las pruebas de resistencia al impacto del esmalte E-IIIc
(continuación...)

ENERGÍA APLICADA	PLACA OBTENIDA	CRITERIO DE ADHERENCIA
0,466 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
0,931 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>
1,397 J		<p>Adherencia mala = 0</p> <p>El esmalte porcelánico se desprende de la placa</p>

Del análisis de los resultados que se presentan en la tabla 3.32, se observa que el esmalte E-IIIc que recubre las placas de aluminio, presentó desprendimiento después de ser sometida a las pruebas de impacto, excepto en el caso donde se aplicó 0,337 J, en la que al comparar con las morfologías de adherencia por

impacto de un cuerpo esférico sobre esmaltes porcelánicos se consideró la adherencia buena que corresponde al nivel 3 en la escala de 1 a 4. Se concluyó que el esmalte de composición E-IIIc, que contiene una cantidad porcentual de mezcla fundente del 7,9 %, donde 2,92 % corresponden al carbonato de litio y 4,98 % al fluoruro de sodio, influyó en la formación de la capa adherente.

3.4 DISEÑO DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ESMALTE PORCELÁNICO PARA RECUBRIR PIEZAS DE ALUMINIO

Se diseñó una planta para obtener 100 kg/día de esmalte. Los procesos que se explican son: la molienda inicial de la materia prima, la dosificación y mezclado, fusión y atronado del esmalte, secado y la molienda con tamizado final del mismo para asegurar un tamaño de partícula de 75 μm . Se realizó el balance de masa del proceso y se dimensionaron los equipos necesarios, se estableció el diagrama de flujo y el layout de la planta.

3.4.1 MOLIENDA DE LAS MATERIAS PRIMAS

El proceso de molienda se lo hace con un molino de bolas; en el caso del vidrio, debido a que tiene un tamaño mayor ya que es un material reciclado, se muele en primer lugar en un molino de martillos, la figura 3.6 muestra el proceso de molienda del vidrio para su dosificación en la mezcla de materias primas.

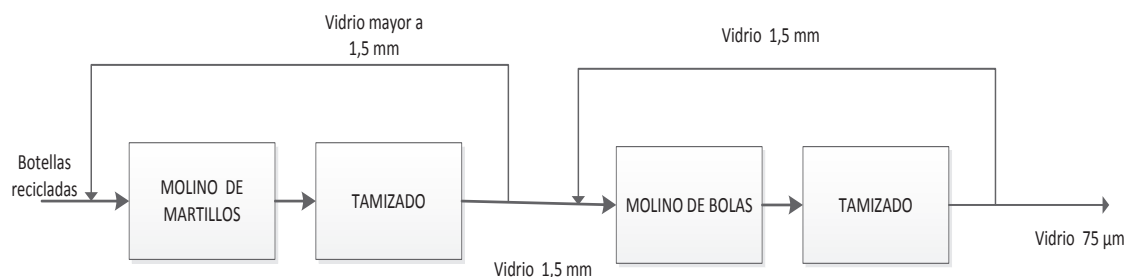


Figura 3.6. Diagrama de bloque del proceso de molienda de botellas de vidrio recicladas

Las características del molino de martillo a utilizarse se describen en la tabla 3.33., el catálogo del equipo se presenta en el Anexo VII. Este molino reduce el tamaño las partículas desde 30 mm hasta 1,5 mm en promedio. La capacidad es de 8 a 15 t/h, por lo que no representa problema alguno al dimensionar el suministro de materia prima necesaria para la capacidad deseada.

Tabla 3.33. Características del molino de martillos para la molienda del vidrio

Modelo / Marca	Dimensiones	Potencia
PC4008-75 / Shibang Machinery	Largo: 2 310 mm Ancho: 1 665 mm Altura: 1 610 mm	75 kW

En la tabla 3.34 se anotan las materias primas y su correspondiente granulometría inicial, que fue dada por proveedores. Se puede concluir que la molienda es necesaria únicamente en el caso de la alúmina, el bórax, el carbonato de potasio, el cuarzo y el vidrio debido a que presentan un tamaño de partícula mayor que 75 μm . En el caso de las materias primas que no requieren de un proceso de molienda, el fabricante provee de las mismas con las características requeridas.

Tabla 3.34. Granulometría inicial de las materias primas necesarias para la producción del esmalte

Materia prima	D80 (μm)
Ácido Bórico	74
Alúmina	1500
Borax	150
Carbonato de potasio	150
Carbonato de litio	5
Cuarzo	2000
Fluoruro de sodio	40
Vidrio	1500
Zircosil	74

A la salida del molino se coloca un tamiz para clasificar las partículas, el cálculo del área de este equipo se realizó mediante la estimación de la capacidad unitaria del tamiz, Mc Cabe, Smith y Harriott (1991) mencionan que este parámetro oscila entre $2,15E-03 \text{ t/m}^2\text{h } \mu\text{m}$ y $5,38E-03 \text{ t/m}^2\text{h } \mu\text{m}$, por lo cual el área es $2,2 \text{ m}^2$ (pp. 988-997), las especificaciones del tamiz vibratorio se reporta en la tabla 3.35.

Tabla 3.35. Especificaciones del tamiz vibratorio a la salida del molino de martillos para el vidrio de desecho

Modelo / Marca	Especificaciones	Frecuencia
SZZ600x1200/GANDONG	Ancho: 0,74 m Largo: 2,96 m Profundidad: 0,33 m Ángulo de inclinación: 15 ° Abertura: 1,5 cm	1 000 rpm

A continuación, se estableció la potencia y la cantidad de molinos de bolas necesarios para la producción de la materia prima con una granulometría igual o menor que $75 \mu\text{m}$ y se calculó la potencia mínima de la molienda de cada una de las materias primas. Los valores necesarios para la determinación de esta potencia son los índices de Bond y las cantidades de cada material a tratar, estos valores se resumen en la tabla 3.37.

Para determinar el rendimiento de este proceso se pesó la masa inicial de las materias primas, la masa final después de la fusión y se calculó la diferencia de pesos. En la tabla 3.36 se pueden ver los valores de 3 ensayos y su promedio.

Tabla 3.36. Rendimiento del proceso de fusión de la mezcla de materias primas

Masa de esmalte esperado (g)	Masa final del esmalte (g)	Rendimiento (%)
40,0	36,4	91,0
40,0	36,0	90,0
40,0	36,0	90,0
PROMEDIO		90,0

Para la obtención de 100 kg/día de esmalte se deben mezclar por lo tanto una cantidad total de 180,55 kg/día de materias primas, debido a que existen transformaciones de los carbonatos que liberan CO₂ en el proceso de fusión y considerando el rendimiento de 90 %. En el Anexo VI se presenta la dosificación de materias primas.

Con la finalidad de asegurar un stock de materia prima, se calculó la cantidad necesaria de cada una, que debe molerse para la producción total de 2 días.

Tabla 3.37. Índice de Bond y cantidades de materias prima a tratar para la obtención de 100 kg/día de esmalte

Materia prima	Wi (kWh/st)	C (kg)	Ct (t)
Ácido Bórico	----	61,63	no requiere molienda
Alúmina	9,45	0,88	0,10
Bórax	9,00	21,13	0,10
Carbonato de potasio	8,00	7,04	0,10
Carbonato de litio	----	5,28	no requiere molienda
Cuarzo	12,77	15,85	0,05
Fluoruro de sodio	----	8,87	no requiere molienda
Vidrio	3,08	38,74	0,10
Zircosil	----	21,13	no requiere molienda
Total		180,55	

(Green et al, 2008, p. 21-48)

Con estos datos, las potencias necesarias se calcularon con la ecuación 2.1, los resultados obtenidos se anotan en la tabla 3.38.

Tabla 3.38. Potencia mínima necesaria para la molienda de las materias primas

Materia prima	P (kW)
Alúmina	0,94
Bórax	0,34
Carbonato de potasio	0,31
Cuarzo	0,66
Vidrio	0,31

El molino que puede asegurar en cada caso la eficiencia del proceso tiene las características que se reportan en la tabla 3.39, el catálogo de este equipo se presenta en el Anexo VII.

Tabla 3.39. Características del molino de bolas requerido para el proceso

Modelo / Marca	Dimensiones	Potencia
BM 5T / Foshan Guanglongshi Machinery Co., Ltd.	Diámetro: 600 mm Longitud: 840 mm	1,5 kW

Los tiempos de molienda que se calcularon para el molino descrito se muestran en la tabla 3.40.

Tabla 3.40. Tiempos de molienda necesarios para cada materia prima

Materia prima	Tiempo de molienda (h)
Alúmina	1
Bórax	2
Carbonato de potasio	1
Cuarzo	2
Vidrio	1

Debido a las bajas potencias requeridas y a que los tiempos de molienda calculados de todas las materias primas suman un total de 7 horas, se estima necesario un único molino para el proceso de reducción de tamaño.

Las especificaciones del tamiz vibratorio que se coloca a la salida del molino de bolas se presentan en la tabla 3.41.

Tabla 3.41. Especificaciones del tamiz vibratorio a la salida del molino de bolas

Modelo / Marca	Especificaciones	Frecuencia
SZZ600x1200/GANDONG	Ancho: 0,74 m Largo: 2,96 m Profundidad: 0,33 m Ángulo de inclinación: 15 ° Abertura: 75 μm	1 000 rpm

3.4.2 DOSIFICACIÓN Y MEZCLADO DE LAS MATERIAS PRIMAS

Para garantizar una fusión uniforme, la mezcla de materias primas debe ser homogénea, por esta razón se requiere un mezclador de sólidos que garantice un correcto mezclado. Para lo cual se determinó el volumen de la mezcla de materias primas a partir de la cantidad necesaria y de su densidad aparente, mediante el método de Scott. Los valores se muestran en la tabla 3.42, por lo tanto, el volumen del mezclador debe ser mayor a 103,65 L.

Tabla 3.42. Cálculo del volumen necesario para el mezclador de sólidos

Parámetro	Valor
Masa	180,55 kg
Densidad	2600 kg/m ³
Densidad aparente	1742 kg/m ³
Densidad aparente / Densidad real	0,67
Volumen	103,65 L

En el Anexo VII se incluye el catálogo de un tipo de mezcladores de sólidos, denominados “en V” que son utilizados por la industria de minerales, para garantizar un factor de seguridad y por ser el más cercano al necesario se

escogió el mezclador con capacidad de 165 L.

3.4.3 FUSIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Para la elección del horno que se necesita en el proceso de fusión, se consideraron 2 parámetros: la potencia necesaria que debe entregarse a la masa a fundir y la temperatura máxima que el horno alcanza.

La potencia necesaria está en función del calor requerido para la fusión de la mezcla, que se determinó con la ecuación 2.3. Las variables necesarias y sus valores se muestran en la tabla 3.43.

Tabla 3.43. Parámetros para el cálculo de la potencia del horno

Parámetro	Valor
Masa	180,55 kg
Capacidad calórica	836 J/kg-K
Temperatura inicial	20 °C
Temperatura final	800 °C
Diferencia de temperaturas	780 °C
Tempo de fusión	2 h
Potencia requerida	16,4 kW

Con el valor de la potencia determinado y la máxima temperatura se seleccionó un horno que asegure una correcta homogeneización de la mezcla durante la fusión y su rápida descarga al finalizar el proceso.

Las características del horno seleccionado se presentan en la tabla 3.44. De los catálogos de equipos se seleccionó un horno de 150 L y 81,41 Kw, que se reporta

en el Anexo VII. La descarga se la realiza mediante una compuerta en la parte inferior del horno.

Tabla 3.44. Características del horno de fusión

Modelo / Marca	Dimensiones crisol	Potencia
FON 150 / Emison	Diámetro: 550 mm Altura: 580 mm Volumen: 150 L	81,4 kW

Los cálculos para la determinación de la potencia del horno se anotan en el Anexo VIII.

3.4.4 ATRONADO DEL ESMALTE

El atronado del esmalte se realiza en un tanque cilíndrico que contiene agua y hielo. Los cálculos para este proceso se reportan en el Anexo VIII y en la tabla 3.45 se reportan los requerimientos.

Tabla 3.45. Requerimientos para el atronado del esmalte

Parámetro	Valor
Masa de agua	630 kg
Temperatura inicial del agua	0 °C
Temperatura final del agua	40 °C
Masa de hielo	190 kg
Diámetro del tanque	1,5 m
Altura del tanque	0,8 m

3.4.5 DESCARGA Y SECADO DEL ESMALTE

Se determinó que la válvula de descarga del agua de enfriamiento desde el tanque cilíndrico debe colocarse a 0,03 m de su base, la cantidad de agua

existente con el esmalte atronado es de 8,84 kg y por seguridad la válvula se coloca, por tanto, a 0,035 m medidos desde la parte inferior del tanque.

El secado del esmalte, previo a la molienda final, se lo hace en un secador de bandejas horizontales. La cantidad de agua que acompaña al esmalte luego del vaciado parcial del tanque es de 8,84 kg. La velocidad de secado es de $3,2 \text{ g/m}^2\text{s}$ por lo cual, para un tiempo de secado de 1 h, el área necesaria es de $0,77 \text{ m}^2$. La potencia se estima que es de $2,5 \text{ kW/m}^2$, por lo que se requiere de 1,7 kW en este caso. Las características del secador seleccionado se anotan en la tabla 3.46 y el catálogo del equipo se muestra en el Anexo VII.

Tabla 3.46. Características del secador de bandejas horizontales

Modelo / Marca	Dimensiones	Potencia
SE-150 / Emison	Ancho: 500 mm Alto: 600 mm Fondo: 500 mm	2 kW

3.4.6 MOLIENDA FINAL DEL ESMALTE

El esmalte debe tener una granulometría final menor que $75 \mu\text{m}$, por lo que debe someterse a un ciclo de molienda después del atronado y el secado.

Al igual que para las materias primas, el cálculo de la potencia que debe tener el molino requerido se lo hace a partir de la cantidad que se debe moler y su índice de Bond, estos valores y el de la potencia se anotan en la tabla 3.47.

Tabla 3.47. Determinación de la potencia del molino de bolas para el producto final

Material	Wi (kWh/st)	C (kg)	P (kW)
Esmalte final	3,08	100	0,31

A la salida del molino se coloca un tamiz para clasificar las partículas, el cálculo del área de este equipo se realizó mediante la estimación de la capacidad unitaria

del tamiz, de igual forma que para el molino de martillos, el área es 2,2 m². Las especificaciones del tamiz vibratorio se reportan en la tabla 3.48.

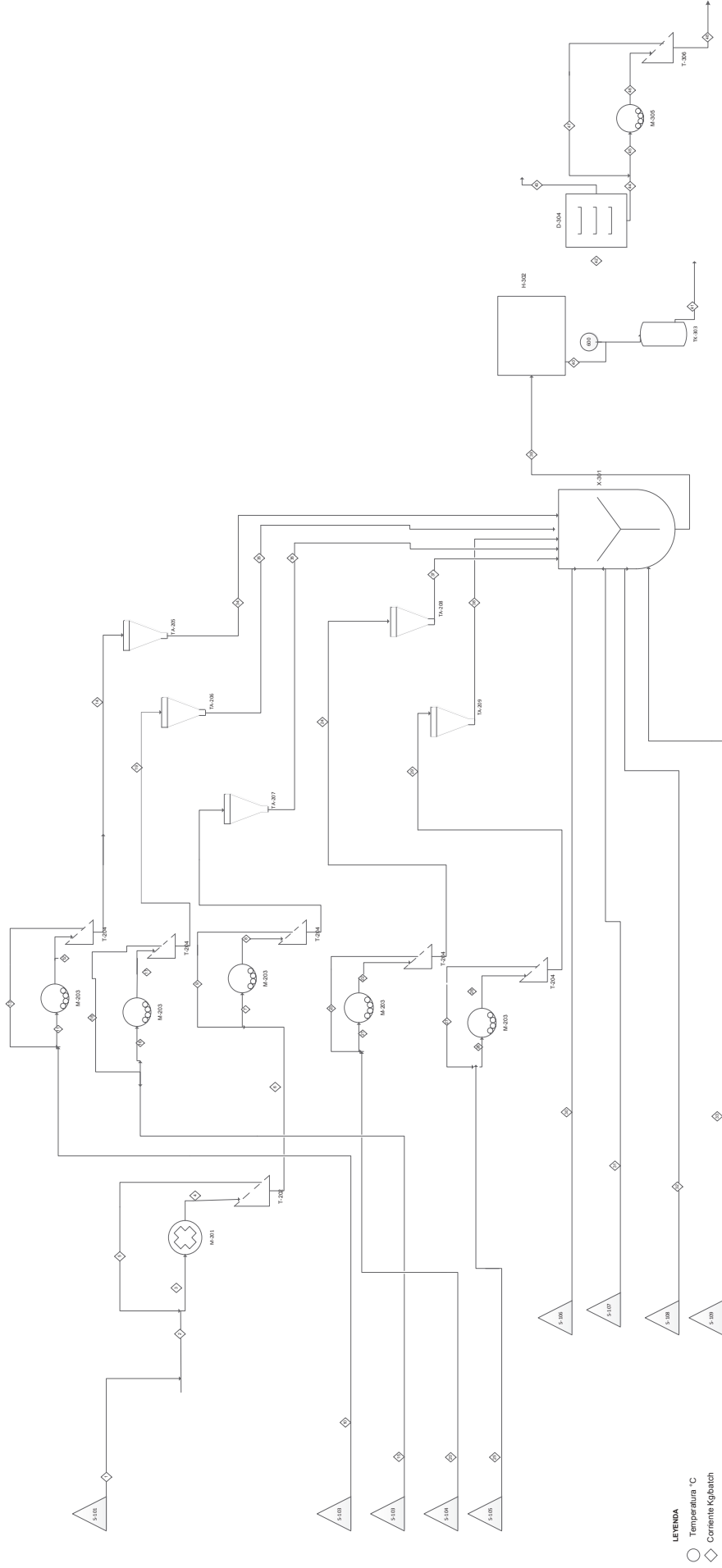
Tabla 3.48. Especificaciones del tamiz vibratorio para la molienda final del esmalte

Modelo / Marca	Especificaciones	Frecuencia
SZZ600x1200/GANDONG	Ancho: 0,74 m Largo: 2,96 m Profundidad: 0,33 m Ángulo de inclinación: 15 ° Abertura: 75µm	1 000 rpm

La figura 3.7 presenta el diagrama de flujo del proceso de obtención del esmalte porcelánico para recubrir aluminio. La lista de los equipos se reportan en la tabla 3.49, el balance de materia se muestra en la tabla 3.50 y la distribución de los equipos en planta se presenta en la figura 3.8.

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ESMALTE PARA ALUMINIO

S-101-109 SILOS DE ALMACENAMIENTO M-201 MOLINO DE MARTILLOS T-202 TAMIZ VIBRATORIO M-203 MOLINO DE BOLAS T-204 TAMIZ VIBRATORIO T-205-206 TOLVA DE ALMACENAMIENTO X-301 MECLADOR H-302 HORNO DE FUSIÓN TK-303 TANQUE CILINDRICO D-304 SECADOR M-305 MOLINO DE BOLAS T-306 TAMIZ VIBRATORIO



LEYENDA
 ○ Temperatura °C
 ◇ Corriente Kg/batch

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA UNIVERSIDAD DEL ZULIA	
TITULO: PROCESO DE OBTENCIÓN DE ESMALTE POR ELANCO PARA ALUMINIO	
REALIZADO POR: DIANA VÁZQUEZ	
FECHA: 21/09/2023	ESCALA: N/A

Figura 3.7. Diagrama de flujo de la planta de producción de esmalte para aluminio

Tabla 3.49. Lista de equipos necesarios para el proceso de obtención de esmalte

Lista de equipos	
Simbología	Descripción
S-101	Silo de almacenamiento de botellas de vidrio
S-102	Silo de almacenamiento de bórax
S-103	Silo de almacenamiento de alúmina
S-104	Silo de almacenamiento de carbonato de potasio
S-105	Silo de almacenamiento de cuarzo
S-106	Silo de almacenamiento de ácido bórico
S-107	Silo de almacenamiento de carbonato de litio
S-108	Silo de almacenamiento de fluoruro de sodio
S-109	Silo de almacenamiento de zircosil
M-201	Molino de martillos
T-202	Tamiz vibratorio
M-203	Molino de bolas
T-204	Tamiz vibratorio
T-205	Tolva de almacenamiento de bórax
T-206	Tolva de almacenamiento de alúmina
T-207	Tolva de almacenamiento de vidrio
T-208	Tolva de almacenamiento de carbonato de potasio
T-209	Tolva de almacenamiento de cuarzo
X-301	Mezclador
H-302	Horno de fusión
TK-303	Tanque cilíndrico
D-304	Secador
M-305	Molino de bolas
T-306	Tamiz vibratorio

Tabla 3.50. Balance de materia del proceso de obtención de esmalte

Lista de corrientes del proceso					
No de corriente	Nombre de la corriente	Flujo másico (kg/día)	No de corriente	Nombre de la corriente	Flujo másico (kg/día)
1	Vidrio de desecho	77,48	25	Cuarzo	31,7
2	Vidrio de desecho	77,48	26	Cuarzo	79,25
3	Vidrio de desecho	193,7	27	Cuarzo	110,95
4	Vidrio de desecho	193,7	28	Cuarzo	79,25
5	Vidrio de desecho	271,18	29	Cuarzo	31,7
6	Vidrio de desecho	77,48	30	Ácido bórico	61,63
7	Vidrio de desecho	193,7	31	Carbonato de litio	5,28
8	Vidrio de desecho	193,7	32	Fluoruro de sodio	8,87
9	Vidrio de desecho	271,18	33	Zircosil	21,13
10	Bórax	42,26	34	Bórax	21,13
11	Bórax	147,91	35	Alúmina	0,88
12	Bórax	147,91	36	Vidrio de desecho	38,74
13	Bórax	105,65	37	Carbonato de potasio	7,04
14	Bórax	42,26	38	Cuarzo	15,85
15	Alúmina	1,76	39	Mezcla de materias primas	180,55
16	Alúmina	6,16	40	Esmalte	100
17	Alúmina	6,16	41	Agua	821
18	Alúmina	4,4	42	Esmalte	108,84
19	Alúmina	1,76	43	Agua	8,84
20	Carbonato de potasio	14,08	44	Esmalte	100
21	Carbonato de potasio	49,28	45	Esmalte	350
22	Carbonato de potasio	49,28	46	Esmalte	350
23	Carbonato de potasio	35,2	47	Esmalte	250
24	Carbonato de potasio	14,08	48	Esmalte	100

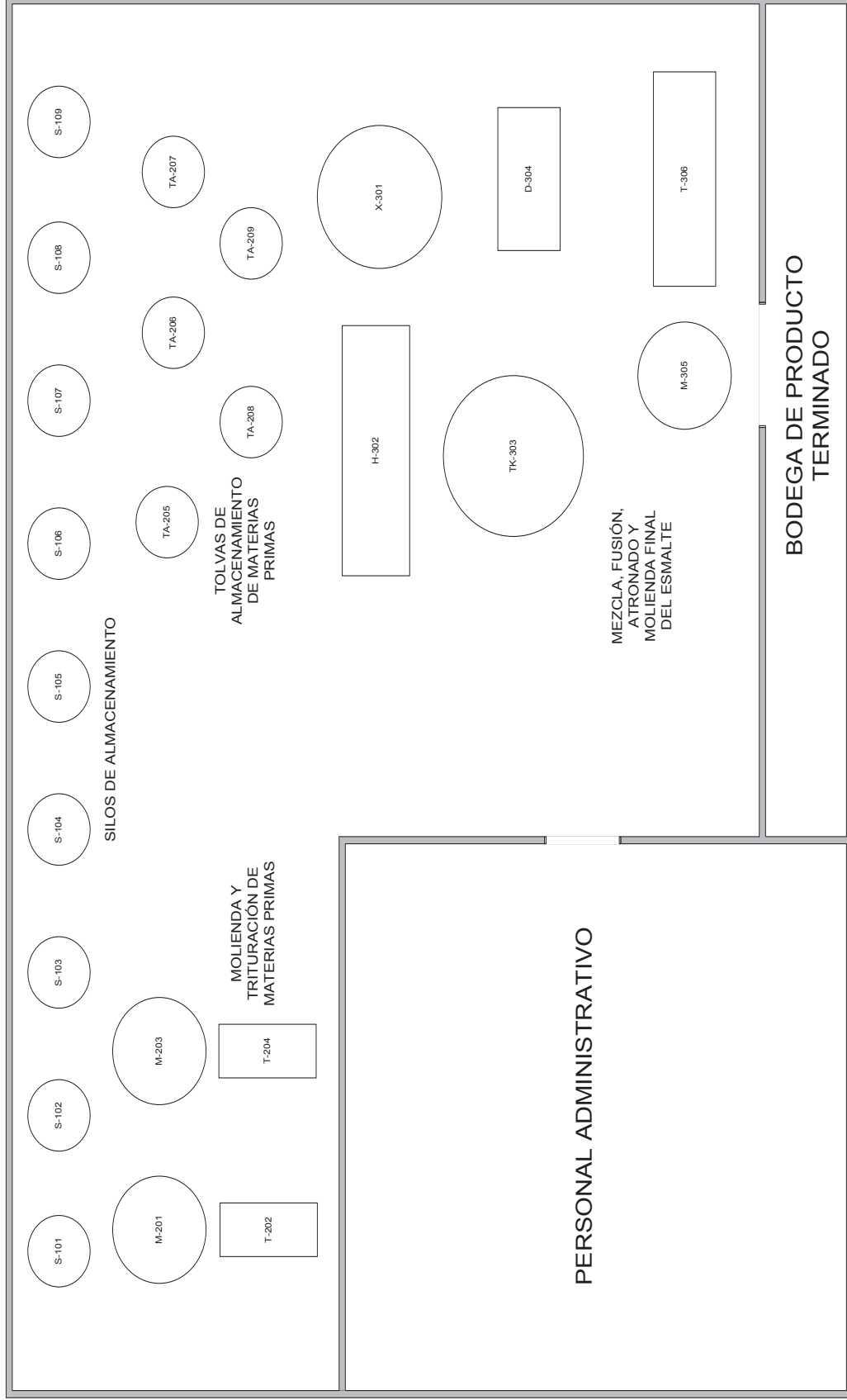


Figura 3.8. Distribución en planta de los equipos para el proceso de obtención de esmalte

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. La temperatura de fusión de la mezcla de materias primas vitrificables fue 600 °C cuando la relación en peso entre el vidrio de desecho y fluoruro de sodio fue de $\frac{20}{5}$, $\frac{21}{4}$ y $\frac{22}{3}$; cuando la relación en peso fue de $\frac{23}{2}$, $\frac{24}{1}$ y $\frac{25}{0}$ fundieron a temperatura superior a 700 °C, debido a la disminución de material fundente en su composición.
2. Se determinó que la mezcla de materias primas con relación en peso correspondiente a 22 % de vidrio de desecho y 3 % de fluoruro de sodio presentó una formación de fase vítrea de 91,18%, aproximadamente, cuando fue sometida a un tratamiento térmico con temperatura máxima de 600 °C. Se concluye que la cantidad de fluoruro de sodio presente en la composición debe ser superior al 3 % para que la mezcla funda a 600 °C y que la formación de fase vítrea sea mayor al 90 %.
3. Al aumentar la temperatura de maduración del esmalte, mejoró la calidad del recubrimiento porcelánico, a 600 °C la placa recubierta en este caso presentó una superficie de color homogéneo, con brillo, un espesor uniforme y buena adherencia del recubrimiento con el sustrato; mientras que, a temperaturas inferiores el esmalte no logró adherirse completamente a la placa de aluminio. El ciclo de cocción con el que se obtuvo superficies con menos presencia de fallas y mayor brillo fue el CC-6d, cuya temperatura de maduración es de 600 °C y el tiempo de maduración fue 25 min.
4. Al aumentar la relación molar entre el carbonato de litio y el fluoruro de sodio mejoraron las características del recubrimiento obtenido, la mejor relación fue de 1:3, el esmalte obtenido con esta composición presentó

una superficie brillante con excelente adherencia, espesor uniforme y color homogéneo.

5. Al comparar los resultados de las pruebas de adherencia según el criterio de la morfología de adherencia por impacto de un cuerpo esférico sobre esmalte porcelánico, se pudo concluir que la adición de fluoruro de sodio no ayudó a mejorar la resistencia al impacto, por lo cual la adherencia fue mala en todos los casos, a excepción del esmalte con relación 1:3 que presentó cierta adherencia correspondiente a 3 en la escale de 0 a 4 al soportar el impacto de una esfera de 66,8 g desde 0,5 m de altura.
6. Los resultados obtenidos en el desarrollo del presente proyecto, sin ser los mejores, permiten prever la posibilidad cierta de utilizar vidrio de desecho como materia prima para la preparación de esmaltes porcelánicos para recubrir superficies de aluminio.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar el estudio de la formulación de esmaltes porcelánicos para aluminio que contengan al óxido fosfórico como formador de la red vítrea.
2. Aplicar los esmaltes formulados mediante el método por inmersión, para verificar la influencia sobre la calidad de la superficie recubierta y la adherencia del recubrimiento con el sustrato.
3. Analizar el efecto en la temperatura de fusión del esmalte si se reemplaza el fluoruro de sodio por fluoruro de litio, el cual posee una mayor acción fundente.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Andrews, A., Pagliuca, S. y Faust, W. (2011). *Porcelain (Vitreous) Enamels* (Tercera ed.). Mantova, Italia: Tipografia Commerciale.
2. ASTM Standard C 162, 1997, "Estándar terminology of glass and glass products", ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997, DOI: 10.1520/C0162-05R4.
3. Baldwin, C. y Feldman, S. (2007). Surface Tension and Fusion Properties of Porcelain Enamels. *Proceedings of the Porcelain Enamel Institute Technical Forum* (pp. 1-10). Norcross, USA: Wiley & Sons Co.
4. Batista, J. (2001). ¿Es posible un Cluster en torno al Bauxita en el Estado de Pará? En R. Buitelaar, *Aglomeraciones mineras y desarrollo local en América Latina* (pp. 219 -247). Bogotá, Colombia: Alfaomega Grupo Editor.
5. Cabildo, M., Claramut, R., Cornago, M., Escolástico, C., Santos, S., Farrán, A. y Sanz, D. (2010). *Reciclado y tratamiento de residuos*. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=jXEFxC3GiGQC&pg=PA326&dq=vidrio+caracter%C3%ADsticas+y+reciclaje&hl=es&sa=X&ei=SmKtUa3iGpSc9QSAslB4&ved=0CC8Q6AEwAA#v=onepage&q=vidrio%20caracter%C3%ADsticas%20y%20reciclaje&f=false> (Mayo, 2013).
6. Cantavella, M. (2010). *Desarrollo e fritas, esmaltes y pigmentos cerámicos*. (I. E. Caminás, Ed.) Valencia, España.
7. Castells, E. (2012a). *Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=8yWSZEBQsXgC&pg=PA355&dq=reciclaje+del+vidrio&hl=es&sa=X&ei=D_W0UaeYLB0_0QGfjGo

Cw&ved=0CEcQ6AEwBA#v=onepage&q=reciclaje%20del%20vidrio
&f=false (Abril, 2013).

8. Castells, E. (2012b). *Reciclaje de residuos industriales: Aplicación a la fabricación de materiales para la construcción*. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=oA7ndthNMYQC&pg=PA471&dq=reciclaje+del+vidrio&hl=es&sa=X&ei=D_W0UaeYLbO_0QGfjIGoCw&ved=0CC8Q6AEwAA#v=onepage&q=reciclaje%20del%20vidrio&f=false (Abril, 2013).
9. Cervera, A. (2003). *Envase y embalaje*. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=Yzha4dQ10yoC&pg=PA143&dq=reciclaje+de+vidrio+proceso&hl=es-419&sa=X&ei=HweHUb_8loTO9QTE74DYDA&ved=0CD0Q6AEwAg#v=onepage&q=reciclaje%20de%20vidrio%20proceso&f=false (Abril, 2013).
10. Choate, W. (2007). U. S. Energy requirements for aluminum production: historical perspective, Theoretical limits, and new opportunities. En J. Green, *Aluminum Recycling and Processing for Energy conservation and Sustainability* (pp. 157-221). Ohio, Estados Unidos: ASM International.
11. Coursol, P., Dufour, G., Coté, J., Chartrand, P. y Mackey, P. (2012). Application of Thermodynamic Models for Better Understanding and Optimizing the Hall - Heroult Process. *Journal of The Metals & Materials Society*, 64(11), 1326-1333.
12. Estrada, D. y Jimenez, I. (1974). Esmasltes sobre aluminio. *Instituto de Cerámica y Vidrio*, 13(2), 123-128.
13. Fernández, J. (2003). *El vidrio* (Tercera Edición ed.). Madrid, España:

Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.

14. Funatani, K., Yoshida, M. y Tsunekawa, Y. (2003). Surface Modification. En G. Totten y D. Mackenzie, *Handbook of Aluminum* (pp. 483-564). New York: Marcel Dekker, Inc.
15. Gasik, M. y Mazur, V. (2003). Smelting of Aluminum. En G. Totten y D. Mackenzie, *Handbook of Aluminum* (Vol. 2, pp. 47-81). New York, Estados Unidos: Marcel Dekker, Inc.
16. Gómez, M. (2006). *Dieta metabólica*. En Medicina Nutricional, Ohio, Estados Unidos, Recuperado de <http://www.dietametabolica.es/teflon.htm> (Agosto, 2012)
17. Gómez, T., Águeda, E., García, J. y Navarro, J. (2011). *Mecanizado básico para electrotecnia*. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=_ESsEd-4OYUC&pg=PA90&dq=anodizado+de+aluminio&hl=es&sa=X&ei=FE0_UsDPCYKs9ATS6IG4DA&ved=0CEgQ6AEwBQ#v=onepage&q=anodizado%20de%20aluminio&f=false (Julio, 2013).
18. Green, D. y Perry, R. (2008). *Manual del Ingeniero Químico* (Octava ed.). Kansas, USA: Mc Graw Hill.
19. Green, J. (2007). *Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability*. doi: 10.1361/arpe 2007p033.
20. Hufnagel, W. (1992). *Manual de Aluminio* (Vol. I). Düsseldorf, Alemania: Reverté.
21. Hyland, M. (2003). Surface Chemistry of Adhesion to Aluminum. En G. E. Totten y D. S. MacKenzie, *Handbook of Aluminum* (Vol. 2, pp. 465-

- 483). New York, Estados Unidos: Macel Dekker Inc.
22. Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (cuarta ed.). Mexico, México: Prentice Hall.
 23. Lombardero, J. (2008). *Manual para la formación en medio ambiente* (primera ed.). Madrid, España: Lex nova.
 24. Madumjar, A. y Sunirmal, J. (2001). Glass and glass–ceramic coatings, versatile materials for industrial engineering applications. *Bulletin of Material Science*, 24(1), 69-77.
 25. Mejía, P. (2003). *Preparación de un esmalte opaco a partir de vidrio reciclado para recubrir cerámica roja*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
 26. Morales, J. (2005). *Tecnología de los materiales cerámicos*. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=4H6OXgN1w6wC&pg=PA22&dq=formula+de+seger&hl=es&sa=X&ei=_mIUUpiePLGj4APD7YBw&ved=0CC4Q6AEwAA#v=onepage&q=formula%20de%20seger&f=false (Agosto, 2013).
 27. Mukhlis, R., Rhamdhani, M. y Brooks, G. (2010). Sidewall materials for Hall - Héroult process. *Light Metals*, 1(1), 883-886.
 28. Nesse, A., Garbossa, G., Pérez, G., Vittori, D. y Pregi, N. (2003). Aluminio: ¿Culpable o Inocente? *Química Viva*, 2(001), 9-16.
 29. Olsen, G., Church, T., Larson, E., Van Belle G., Lundberg J., Hansen K., Burris J., Mandel J. y Zobel L.. (2004). Serum concentrations of perfluorooctanesulfonate and other fluorochemicals in an elderly

- population from Seattle Washington. *Chemosphere*, 54(11), 1599-1611. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14675839> (Noviembre, 2012)
30. Pascual, M. (1996). Cristalización en vidrios. Estudio por difracción de rayos X. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 35(5), 353-362.
 31. Pozo, J. y Rogel, F. (2011). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la planta de producción de la empresa UMCO S.A.* (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Mecánico no publicado), Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
 32. Quarantha, N., Caligaris, M., Mansilla, G. y Palmieri, F. (2004). *Análisis comparativo de diferentes recubrientos sobre aluminio*. En Congreso Conamet, San Nicolás, Argentina. Recuperado de <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/laserena/32.pdf> (Septiembre, 2012).
 33. Rai, S., Wasewar, K., Mukhopadhyay, J., Yoo, C. y Uslu, H. (2012). Neutralization and utilization of red mud for tis better waste management. *Archives of Environmental Science*, 6(1), 13-33.
 34. Rodríguez, J., Castro, L. y Del Real, J. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos* (segunda ed.). Madrid, España: Vision net.
 35. Rodríguez, A., Suárez, L., Calleja, L. y Ruiz, V. (1997). Métodos microscópicos para la cuantificación del contenido en fase vítrea de escorias siderúrgicas. *Materiales de construcción*, 47(245), 45-51.
 36. Vielhaber, L. (2002). *Tecnología de los Esmaltes*. (J. Beltrán, Trad.) Barcelona, España: Reverté.

37. Whitten, K., Davis, R., Peck, M. y Stanley, G. (2008). *Química*. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=Chw7tP3s7Z8C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Junio, 2013)
38. World Aluminium (2011). *Base de datos*. Londres: International Aluminium Institute. Disponible en <http://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/> (Abril, 2013)
39. Yatsenko, E. A., Shkurakova, E. A. y Kuprikova, A. (2004). Mathematical modeling of the optimum conditions for formation of enamel coatings on aluminum. *Glass Physics and Chemistry*, 30(2), 186-190.

ANEXOS

ANEXO I

CÁLCULOS PARA LA PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE LIMPIEZA

Cálculos para la preparación del ácido sulfúrico 6 % w/w**Tabla AI. 1.** Propiedades de las soluciones utilizadas para preparar las soluciones de limpieza

Sustancia	Densidad
Solución de ácido sulfúrico 6 % w/w	1,04 g/mL
Ácido sulfúrico 98,08 % w/w	1,84 g/ mL
Hidróxido de sodio 10 % w/v	1,045 g/ mL

(Green et al., 2008, pp. 2-108, 2-105)

$$1000 \text{ mL sol} \frac{1,04 \text{ g sol}}{1 \text{ mL sol}} \times \frac{6 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{100 \text{ g sol}} \times \frac{98,08 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{100 \text{ g H}_2\text{SO}_4} \times \frac{1 \text{ mL H}_2\text{SO}_4}{1,84 \text{ g H}_2\text{SO}_4}$$

$$= 33,3 \text{ mL H}_2\text{SO}_4 \text{ 98,08 \%}$$

Cálculos para la preparación de la solución utilizada en el mordentado de la pieza**Tabla AI. 2.** Concentración de la solución para el mordentado

Reactivo	Concentración (g/L)
Solución de NaOH 10 % w/v	231,0
Cromato de potasio	46,5
Sulfato de cromo (III)	2,4

$$231 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ sol NaOH } 10 \% \frac{\text{w}}{\text{v}} \times \frac{\text{mL sol}}{1,045 \text{ g}} \times 1\text{L} = 221 \text{ mL sol NaOH } 10 \% \frac{\text{w}}{\text{v}}$$

Ejemplo de cálculo de las cantidades necesarias de materias primas para la preparación de 40 g

- Cantidad necesaria de ácido bórico:

$$\frac{35}{100} \times 40 \text{ g} = 14,00 \text{ g de ácido bórico}$$

En la tabla AI.3, se reporta la cantidad necesaria de cada materia prima para 40 g de mezcla de la Composición C-III

Tabla AI. 3. Dosificación de materias primas del E-III

Materias primas	%	PM	peso (g)
Ácido Bórico	35,00	123,664	14,000
Alúmina	0,50	101,96	0,200
Bórax	12,00	381,268	4,800
Carbonato de potasio	4,00	165,23	1,600
Carbonato de litio	3,00	73,89	1,200
Cuarzo	9,00	60,084	3,600
Fluoruro de sodio	3,00	41,98	1,200
Vidrio	22,00	208,78	8,800
Zircosil	12,00	183,31	4,800

ANEXO II

CICLOS DE COCCIÓN APLICADOS AL ESMALTE E-III

Tabla AII. 1. Ciclos de cocción aplicados al esmalte con tiempo de maduración constante

CICLOS DE COCCIÓN						
Parámetros	CC-1	CC-2	CC-3	CC-4	CC-4	CC-6
TM (°C)	550	560	570	580	590	600
tm (min)	10	10	10	10	10	10

Tabla AII. 2. Ciclos de cocción aplicados al esmalte con temperatura de maduración constante

CICLOS DE COCCIÓN				
Parámetros	CC-6a	CC-6b	CC-6c	CC-6d
TM (°C)	600	600	600	600
tm (min)	10	15	20	25

ANEXO III

CÁLCULO DE LA FÓRMULA MOLECULAR DEL ESMALTE E-III

Cálculo de la fórmula molecular del esmalte E-III

Para el cálculo de la fórmula molecular del esmalte, se requiere conocer la composición química del vidrio de desecho, en la tabla AIII.1 y en la tabla AIII.2 se reportan la composición y la fórmula molecular del vidrio respectivamente.

Tabla AIII. 1. Composición química del vidrio de desecho

Compuesto	Peso Molecular (g/gmol)	Porcentaje en peso (%)
SiO ₂	60,084	68,1
Al ₂ O ₃	101,96	3,12
Na ₂ O	61,977	17,35
K ₂ O	94,203	0,92
CaO	56,079	10,07
MgO	40,311	0,42

(Mejía, 2003, p. 123)

Tabla AIII. 2. Fórmula Molecular del vidrio de desecho

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na ₂ O	0,584	Al ₂ O ₃	0,064	SiO ₂	2,363
K ₂ O	0,020				
CaO	0,374				
MgO	0,022				
Total	1,000				

(Mejía, 2003, p. 123)

Cálculo del peso molecular del vidrio de desecho

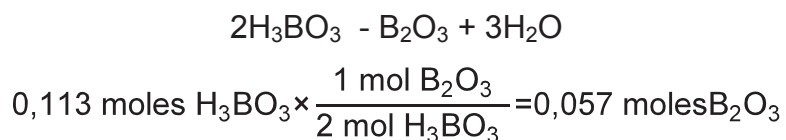
En la tabla AIII.3 se reporta la composición química del esmalte E-III, y se calcularon las moles de cada compuesto, para posteriormente hacer un desglose

de la cantidad de moles que se obtienen de cada óxido a partir de las materias primas y finalmente obtener la fórmula molecular.

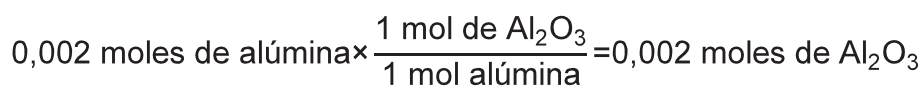
Tabla AIII. 3. Composición química del esmalte E-III

Materias primas	%	PM	peso (g)	moles
Ácido Bórico	35,000	123,664	14,000	0,113
Alúmina	0,500	101,960	0,200	0,002
Bórax	12,000	381,268	4,800	0,013
Carbonato de potasio	4,000	165,230	1,600	0,010
Carbonato de litio	3,000	73,890	1,200	0,016
Cuarzo	9,000	60,084	3,600	0,060
Fluoruro de sodio	3,000	41,980	1,200	0,029
Vidrio	22,000	208,780	8,800	0,042
Zircosil	12,000	183,310	4,800	0,026

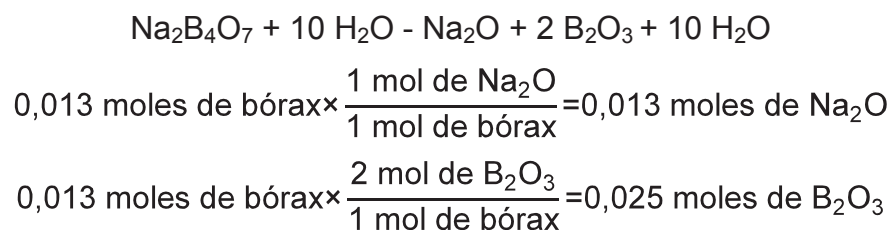
Cálculo de los óxidos que aporta el ácido bórico



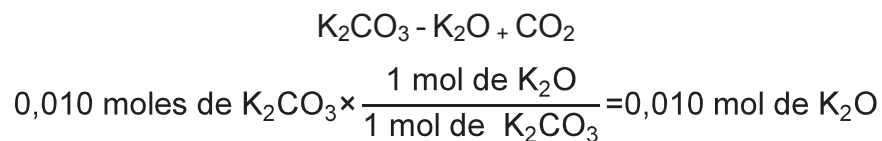
Cálculo de los óxidos que aporta la alúmina



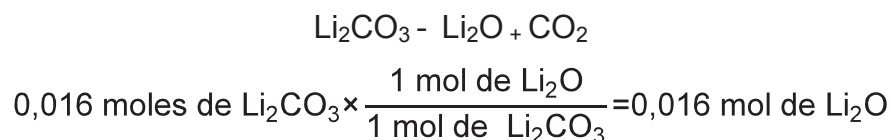
Cálculo de los óxidos que aporta el bórax



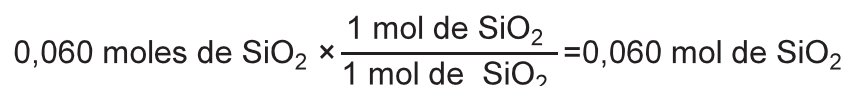
Cálculo de los óxidos que aporta el carbonato de potasio



Cálculo de los óxidos que aporta el carbonato de litio

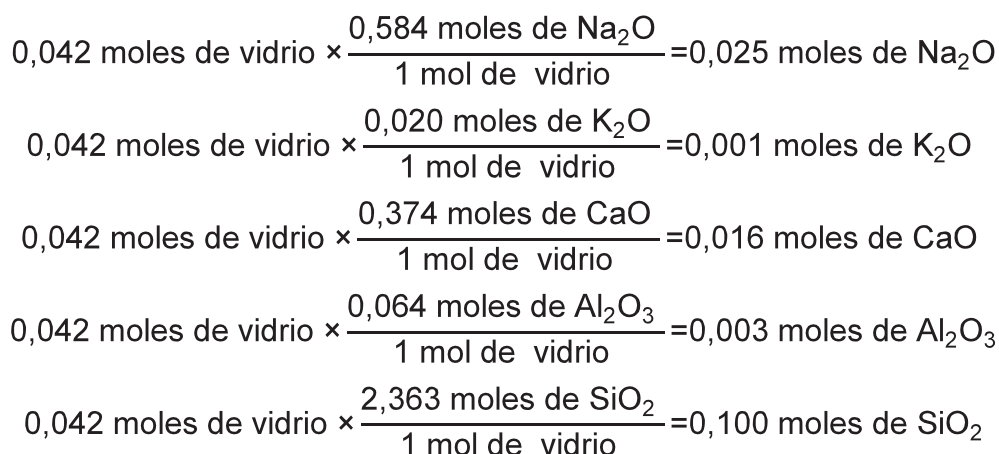


Cálculo de los óxidos que aporta el cuarzo



Cálculo de los óxidos que aporta el vidrio

En la tabla AIII.2 se muestra la fórmula molecular del vidrio, lo que permite calcular la cantidad en moles que aporta de cada óxido; a continuación se realizan los respectivos cálculos.



Cálculo de los óxidos que aporta el zircosil



$$0,026 \text{ moles de ZrSiO}_4 \times \frac{1 \text{ moles de SiO}_2}{1 \text{ mol de ZrSiO}_4} = 0,026 \text{ moles de SiO}_2$$

$$0,026 \text{ moles de ZrSiO}_4 \times \frac{1 \text{ moles de ZrO}_2}{1 \text{ mol de ZrSiO}_4} = 0,026 \text{ moles de ZrO}_2$$

A continuación en la tabla AIII.4 se muestra el total de moles de cada óxido; sin embargo la suma de los óxidos modificadores de la red debe ser igual a 1, por lo tanto se requiere dividir la cantidad de cada óxido para la suma total, en la tabla AIII.5 se reporta la fórmula molecular del esmalte E-III.

Tabla AIII. 4. Cantidad total en moles de cada óxido

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na₂O	0,037	Al₂O₃	0,005	SiO₂	0,186
K₂O	0,011			B₂O₃	0,082
CaO	0,016				
ZrO₂	0,026				
Li₂O	0,016				
Total	0,1060				

Tabla AIII. 5. Fórmula molecular del esmalte E-III

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na₂O	0,351	Al₂O₃	0,044	SiO₂	1,753
K₂O	0,099			B₂O₃	0,772
CaO	0,149				
ZrO₂	0,247				
Li₂O	0,153				
Total	1,000				

ANEXO IV NORMA ASTM B219

En la figura IV. 1 se muestra la formación de círculos concéntricos en las superficies recubiertas, lo que permite determinar el tipo de adherencia mediante la comparación con los patrones de la Norma ASTM B219.

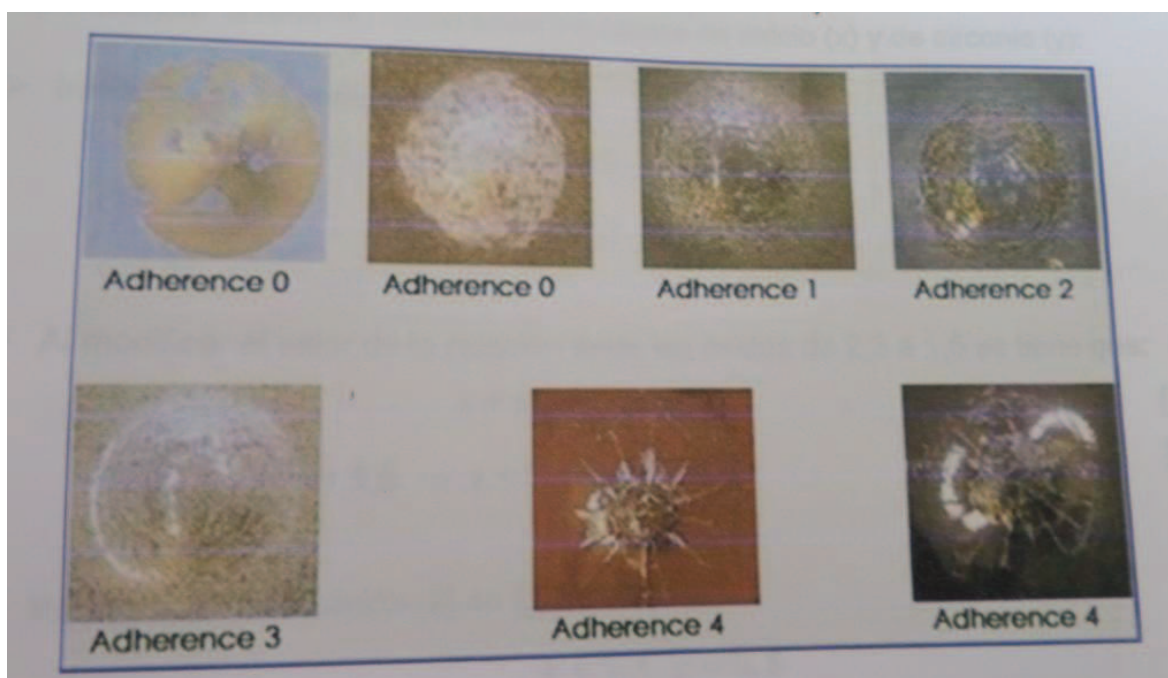


Figura AIV. 1. Morfologías de adherencia por impacto de un cuerpo esférico sobre esmalte porcelánico

CRITERIOS

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 acentuados
Adherencia buena = 3	El impacto no presenta círculos concéntricos
Adherencia excelente = 4	El impacto producido sobre la placa esmaltada tiene forma de una estrella

ANEXO V

DOSIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS PARA LOS ESMALTES CON RELACIONES MOLARES 1:1, 1:2 y 1:3

En este apartado se calcula la composición química de cada esmalte a partir de la fórmula molecular del mismo donde se obtiene la cantidad de moles necesarias de cada óxido que compone el esmalte y posteriormente se calcula la cantidad de materia prima requerida para este fin.

Tabla AV. 1. Fórmula molecular del esmalte E-III

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na₂O	0,351	Al₂O₃	0,044	SiO₂	1,753
K₂O	0,099			B₂O₃	0,772
CaO	0,149				
ZrO₂	0,247				
Li₂O	0,153				
Total	1,000				
NaF	0,269				

Como se muestra en el Anexo III, el vidrio de desecho aporta óxidos de sodio, de potasio, de calcio, de aluminio y de silicio; por lo que esta materia prima aportará con la totalidad del óxido de calcio requerido, por lo tanto:

Cálculo de las moles necesarias de vidrio de desecho

$$0,149 \text{ moles de CaO} \times \frac{1 \text{ mol de vidrio}}{0,374 \text{ mol de CaO}} = 0,398 \text{ moles de vidrio}$$

Cálculo de los óxidos que aporta el vidrio

En la tabla AIII.2 se muestra la fórmula molecular del vidrio, lo que permite calcular la cantidad en moles que aporta de cada óxido; a continuación se realizan los respectivos cálculos.

$$0,398 \text{ moles de vidrio} \times \frac{0,584 \text{ moles de Na}_2\text{O}}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,232 \text{ moles de Na}_2\text{O}$$

$$0,398 \text{ moles de vidrio} \times \frac{0,020 \text{ moles de K}_2\text{O}}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,008 \text{ moles de K}_2\text{O}$$

$$0,398 \text{ moles de vidrio} \times \frac{0,064 \text{ moles de Al}_2\text{O}_3}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,025 \text{ moles de Al}_2\text{O}_3$$

$$0,398 \text{ moles de vidrio} \times \frac{2,363 \text{ moles de SiO}_2}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,940 \text{ moles de SiO}_2$$

En la tabla AV.2 se muestran las moles de óxidos requeridas, las moles de cada óxido que aportan 0,398 moles de vidrio y la diferencia.

Tabla AV. 2. Cantidad de moles que aporta el vidrio

Moles de óxidos requeridas		Moles que aporta el vidrio	Diferencia
Na₂O	0,351	0,232	0,119
K₂O	0,099	0,008	0,091
CaO	0,149	0,149	0,000
ZrO₂	0,247	-	0,247
Li₂O	0,153	-	0,153
Al₂O₃	0,044	0,025	0,019
SiO₂	1,753	0,940	0,813
B₂O₃	0,772	-	0,772

Las 0,119 moles de Na₂O que faltan se obtienen con 0,119 moles de bórax, de igual manera para los demás óxidos, y a su vez el bórax aporta con 0,238 moles de óxido bórico, la cantidad que falta para completar las moles requeridas del mismo se obtienen a partir de 1,068 moles de ácido bórico. La tabla AV.3 muestra la lista de materias primas, los óxidos que aportan cada una y la cantidad en moles necesarias.

Tabla AV. 3. Cantidad en moles que aportan las materias primas de cada óxido

Moles de óxidos requeridas		Materia prima que aporta	Cantidad en moles
Na_2O	0,119	Bórax	0,119
K_2O	0,091	Carbonato de potasio	0,091
ZrO_2	0,247	Zircosil	0,247
Li_2O	0,153	Carbonato de litio	0,153
Al_2O_3	0,019	Alúmina	0,019
SiO_2	0,813	Zircosil	0,247
		Cuarzo	0,556
B_2O_3	0,772	Bórax	0,119
		Ácido bórico	1,068

Una vez determinada la cantidad en moles que se requiere de cada materia prima, se realiza la dosificación correspondiente para obtener 40 g de esmalte, en la tabla AV.4 se presenta la dosificación de materias primas del esmalte E-IIIa

Tabla AV. 4. Dosificación de las materias primas para obtener 40 g de esmalte E-IIIa

Materia Prima	moles	PM (g/mol)	peso (g)	% W/W	peso para 40 g de esmalte
Ácido Bórico	1,068	123,664	132,073	35,321	22,192
Alúmina	0,019	101,96	1,937	0,518	0,326
Bórax	0,119	381,268	45,371	12,134	7,624
Carbonato de potasio	0,091	165,23	15,036	4,021	2,526
Carbonato de litio	0,153	73,89	11,305	3,023	1,900
Cuarzo	0,556	60,084	33,407	8,934	5,613
Fluoruro de sodio	0,153	41,98	6,423	1,718	1,079
Vidrio	0,398	208,78	83,094	22,222	13,962
Zircosil	0,247	183,31	45,278	12,109	7,608
TOTAL	2,804		373,924	100,000	62,831

El peso del esmalte de composición E-IIIa se presenta en la tabla AV.5, con este dato se realiza el recalcu para obtener 40 g de esmalte.

Tabla AV. 5. Peso molecular del esmalte E-IIIa

Moles requeridas		PM (g/mol)	Peso (g)
Na ₂ O	0,351	61,977	21,767
K ₂ O	0,099	94,203	9,369
CaO	0,149	56,079	8,362
ZrO ₂	0,247	123,223	30,439
Li ₂ O	0,153	29,88	4,578
Al ₂ O ₃	0,044	101,96	4,477
SiO ₂	1,753	60,084	105,349
B ₂ O ₃	0,772	69,618	53,712
		TOTAL	238,053

$$\frac{373,924 \text{ g de materias primas}}{238,053 \text{ g de esmalte}} \times 40 \text{ g de esmalte} = 62,831 \text{ g de materias primas}$$

La dosificación de materias primas de los esmaltes E-IIIb y E-IIIc se reportan en las tablas AV.6 y AV.7 respectivamente.

Tabla AV. 6. Dosificación de las materias primas para obtener 40 g de esmalte E-IIIb

Materia Prima	moles	PM (g/mol)	peso (g)	% W/W	peso para 40 g de esmalte
Ácido Bórico	1,068	123,664	132,073	34,724	22,192
Alúmina	0,019	101,96	1,937	0,509	0,326
Bórax	0,119	381,268	45,371	11,929	7,624
Carbonato de potasio	0,091	165,23	15,036	3,953	2,526
Carbonato de litio	0,153	73,89	11,305	2,972	1,900
Cuarzo	0,556	60,084	33,407	8,783	5,613
Fluoruro de sodio	0,306	41,98	12,846	3,377	2,158
Vidrio	0,398	208,78	83,094	21,847	13,962
Zircosil	0,247	183,31	45,278	11,904	7,608
TOTAL	2,957		380,347	100,000	63,910

Tabla AV. 7. Dosificación de las materias primas para obtener 40 g de esmalte E-IIIc

Materia Prima	moles	PM (g/mol)	peso (g)	% W/W	peso para 40 g de esmalte
Ácido Bórico	1,068	123,664	132,073	34,148	22,192
Alúmina	0,019	101,96	1,937	0,501	0,326
Bórax	0,119	381,268	45,371	11,731	7,624
Carbonato de potasio	0,091	165,23	15,036	3,888	2,526
Carbonato de litio	0,153	73,89	11,305	2,923	1,900
Cuarzo	0,556	60,084	33,407	8,637	5,613
Fluoruro de sodio	0,459	41,98	19,269	4,982	3,238
Vidrio	0,398	208,78	83,094	21,484	13,962
Zircosil	0,247	183,31	45,278	11,707	7,608
TOTAL	3,11		386,770	100,000	64,989

ANEXO VI

CÁLCULOS DE LA DOSIFICACIÓN DE MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE 100 kg DE ESMALTE

La cantidad de materias primas que se debe dosificar para obtener 100 kg de esmalte E-IIIc se calcula con la siguiente ecuación:

$$\frac{386,77 \text{ kg de materias primas}}{238,05 \text{ kg de esmalte}} \times 100 \text{ kg de esmalte} = 162,47 \text{ g de materias primas}$$

Con un rendimiento del 90 %, se tiene:

$$\frac{162,47 \text{ kg de materias primas}}{0,9} = 180,55 \text{ kg de materias primas}$$

En la tabla AVI.1 se presenta la dosificación de materias primas para obtener 100 kg de esmalte.

Tabla AVI. 1. Dosificación de las materias primas para obtener 100 kg de esmalte E-IIIc

Materia Prima	moles	PM (kg/mol)	peso (kg)	% w/w	PESO para 100 kg
Ácido Bórico	1,068	123,664	132,073	34,148	61,645
Alúmina	0,019	101,96	1,937	0,501	0,904
Borax	0,119	381,268	45,371	11,731	21,177
Carbonato de K	0,091	165,23	15,036	3,888	7,018
Carbonato de litio	0,153	73,89	11,305	2,923	5,277
Cuarzo	0,556	60,084	33,407	8,637	15,593
Fluoruro de Na	0,459	41,98	19,269	4,982	8,994
Vidrio	0,398	208,78	83,094	21,484	38,784
Zircosil	0,247	183,31	45,278	11,707	21,133
TOTAL	3,110	-	386,770	100,000	180,545

ANEXO VII CATÁLOGOS DE LOS EQUIPOS SELECCIONADOS

Catálogo del molino de martillos

Tabla AVII. 1. Tabla de especificaciones del molino de martillos

Modelo	PC4008-75	PC4012-90	PC4015-132
Diámetro del rotor (mm)	750	900	1150
Longitud del rotor(mm)	800	1200	1500
Velocidad de rotación del rotor (r/min)	800-1000	800-1000	550-800
Tamaño de la abertura de la entrada(mm)	320 x 930	400 x 1200	500 x 1500
Tamaño Máximo de entrada (mm)	<30	<40	<50
Tamaño Máximo de salida (mm)	0-3	0-3	0-8
Capacidad (t/h)	8-15	15-35	40-70
Potencia del motor (Kw)	75	90	132
Dimensión (L x W x H/mm)	2310 x 1665 x 1610	2840 x 2100 x 2020	3720 x 2650 x 2540

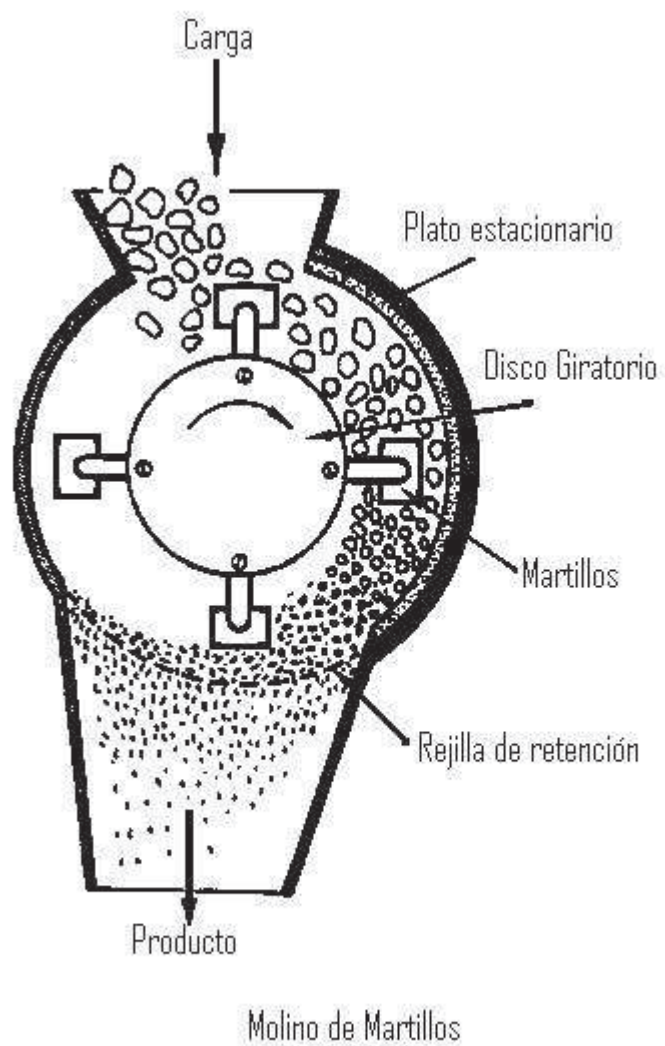


Figura AVII. 1. Esquema de funcionamiento del molino de martillos

Catálogo del molino de bolas

Tabla AVII. 2. Tabla de especificaciones del molino de bolas

Modelo	Dimensiones (mm)	% de carga de bolas	Velocidad (rpm)	Motor eléctrico de potencia (kw)
0.1t	D; 600 L; 840	0.24	55	1.5
0.2t	D; 800 L; 950	0.48	35	2.2
0.35t	D; 1200 L; 1420	0.5	31.45	4
0.5t				
1t	D; 1400 L; 1800	1	27	7.5
1.5t	D; 1800 L; 2100	1.5	23	11
2t	D; 2200 L; 2200	2.5	20	18.5
3t	D; 2200 L; 2600	3	20	22
5tg	D; 2500 L; 3000	5	16	37
5t				
8t	D; 2800 L; 3400	8	13.8	45
14t	D; 2800 L; 4000	10	13.8	55
18t	D; 3000 L; 5000	15	13	75
23t	D; 3100 L; 5000	18	12	90
30t	D; 3200 L; 5800	20	13	90
36t	D; 3400 L; 6500	30	14.2	110
40t	D; 3600 L; 7000	40	13	132
50t	D; 3800 L; 8000	50	11	200
60t	D; 4000 L; 8500	60	10	200

Catálogo del Mezclador

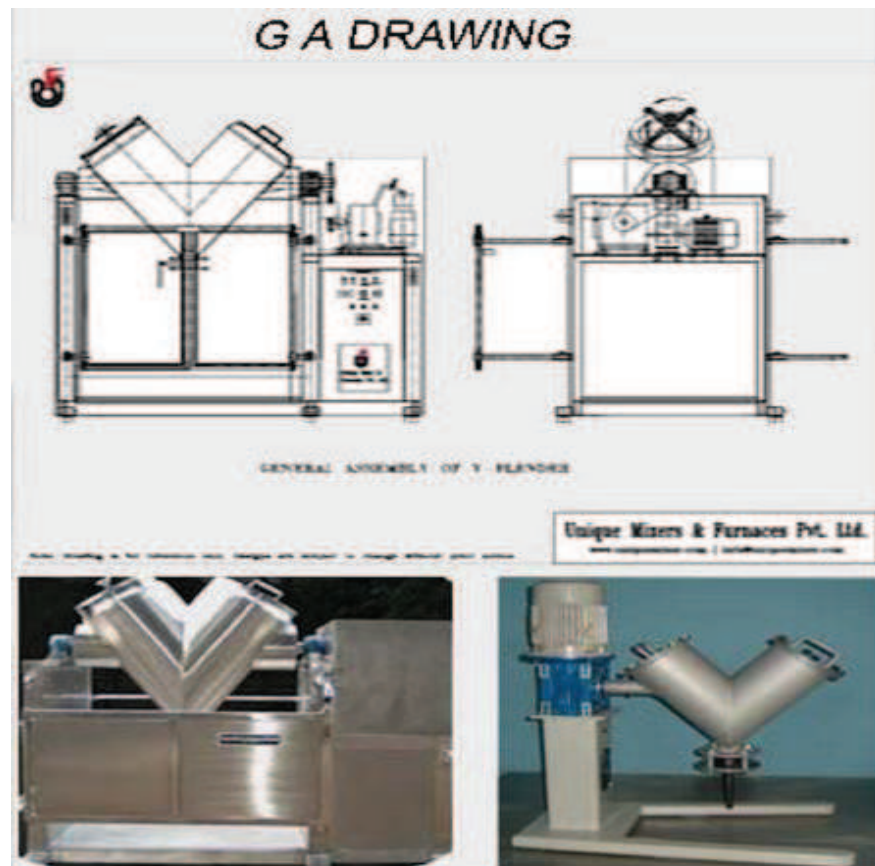


Figura AVII. 2. Catálogo del mezclador en “V”

CAPACITY TABLE
V-BLENDER - CAPACITY TABLE

Model No.	Working (Liter)	Capacity Total (Liter)	Capacity Motor Rating (HP)
VB - 5	5	8	0.5
VB - 10	10	17	0.5
VB - 25	25	40	1.0
VB - 50	50	80	1.5
VB - 100	100	165	2.0
VB - 200	200	330	3.0
VB - 300	300	500	5.0
VB - 500	500	800	7.5
VB - 750	750	1250	10.0
VB - 1000	1000	1650	12.5
VB - 1500	1500	2500	20.0
VB - 2000	2000	3300	25.0
VB - 2500	2500	4150	30.0

Figura AVII. 3. Especificaciones del mezclador en “V”

Catálogo del horno de fusión

CALENTAMIENTO CON GAS O GASÓLEO					
MODELO	DIMENSIONES CRISOL		POTENCIA	PRECIO	PRECIO CRISOL
	Diámetro x Alto		Kcal	€	Acero dulce
FON - 50	360 x 490 mm		30.000	6.710	785
FON - 65	380 x 570 mm		40.000	7.520	890
FON - 80	430 x 570 mm		50.000	8.330	950
FON - 100	470 x 580 mm		60.000	9.705	1.020
FON - 150	550 x 580 mm		70.000	11.200	1.350
FON - 200	600 x 700 mm		80.000	16.380	1.820

Figura AVII. 4. Especificaciones del horno de fusión

Catálogo del horno del secador

CARACTERÍSTICAS SECADEROS					
MODELO	DIMENSIONES INTERIORES			Potencia Kw	PRECIO
	ANCHO	ALTO	FONDO		
SE - 20	25	30	25	0.5	2.675
SE - 35	30	40	30	1	2.775
SE - 80	40	50	40	1.5	3.260
SE - 150	50	60	50	2	3.940
SE - 360	60	100	60	3	4.800
SE - 500	65	120	65	4	5.700
SE - 500	70	100	70	5	6.790
SE - 725	80	100	90	6	8.100
SE - 1000	80	120	100	7	9.220
SE - 1200	80	150	100	8	10.025

Figura AVII. 5. Especificaciones del secador

ANEXO VIII CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS

Cálculo de la potencia del molino de bolas

$$Pa=10 \times w_i \frac{1}{0,907} \left(\frac{1}{d_{80}} - \frac{1}{D_{80}} \right) \times C$$

Como ejemplo de cálculo se consigna el del bórax

$$Pa=10 \times 9,00 \frac{1}{0,907} \left(\frac{1}{150} - \frac{1}{74} \right) \times 0,1$$

$$Pa=0,34 \text{ kW}$$

Cálculo del volumen del mezclador de sólidos

El volumen necesario se calculó con la densidad aparente de la mezcla, que es de 1742 kg/m^3 y los $180,55 \text{ kg}$ de materia prima. El valor resultante fue de $103,65 \text{ L}$, debido a que se debe considerar un factor de seguridad del 25% , se eligió un mezclador con una capacidad de 165 L .

Cálculo de la potencia del horno

El calor necesario para llevar la mezcla de materias primas hasta la temperatura de $800 \text{ }^\circ\text{C}$ se identificó como la potencia del horno que se requirió.

$$Q=m \times Cp \times T_f - T_a \quad [2.2]$$

$$m = \frac{180,55 \text{ kg}}{2 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 2,508 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Q = 2,508 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 836 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \times 780 \text{ }^\circ\text{C} = 16,35 \text{ kW}$$

Cálculo del agua necesario para el atronado

El intercambio de calor para asegurar un enfriamiento súbito está relacionado con el balance energético calor entregado es igual a calor ganado como se expresa en la ecuación 3.1.

$$-Q_e = Q_g$$

Donde, el esmalte fundido entrega su calor a la masa de agua de la piscina; el tiempo de descarga del material fundido es de aproximadamente 15 min por lo tanto el balance energético queda:

$$m_e \times C_{p_e} \times 800 - T_f = m_w \times C_{p_w} \times T_f - 18 + m_h \times \lambda_h$$

$$100 \text{ kg} \times 0,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 800 - T_f = m_w \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times T_f - 18 + m_h \times \lambda_h$$

La variable T_f es la temperatura final que alcanza el agua para el enfriamiento, se considera que $40 \text{ }^\circ\text{C}$ permite trabajar en un rango seguro de operación, entonces:

$$T_f = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$m_w = 630 \text{ kg}$$

Con este valor y el calor latente del hielo que es de 80 cal/g se determinó la cantidad de hielo y agua necesarios. Para un tanque cilíndrico con un diámetro de $1,5 \text{ m}$ y una altura de $0,8 \text{ m}$, la cantidad de hielo a añadir es de 190 kg .

Descarga y secado del esmalte

Se debe calcular la distancia a la que es conveniente colocar la válvula de descarga de agua:

$$V_{\text{esmalte}} = \frac{100 \text{ kg}}{1895 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 5,28 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$V_{\text{esmalte}} = 52,77 \text{ L}$$

$$h_e = \frac{V_{\text{esmalte}}}{A_L} = \frac{5,28 \times 10^{-2} \text{ m}^3}{1,5^2 \times \frac{\pi}{4} \text{ m}^2}$$

$$h_e = 0,03 \text{ m} = 2,99 \text{ cm}$$

Para tener un margen de seguridad, la válvula de descarga se coloca a 3,5 cm desde la parte inferior.

La cantidad de agua a eliminar es 8,84 kg, por lo que el cálculo del área y la potencia del separador adecuado se realizaron de la siguiente manera. Con una tasa de evaporación de 3,2 g/m²s y un tiempo de 1 h se determinó que el área necesaria es 0,77 m², si la potencia del secador debe ser de 2,5 kW/m² se encontró que un secador de 1,92 kW es apto para el proceso.