

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

ESTUDIO DE LA DOSIFICACIÓN DE LOS ÓXIDOS DE LITIO Y DE BORO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE MADURACIÓN DE UN ESMALTE PORCELÁNICO ELABORADO PARA RECUBRIR PIEZAS DE ALUMINIO

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

ENITH VANESSA YÁNEZ RAMÍREZ
(vanenith@hotmail.com)

DIRECTOR: ING. LUIS MERA
(luis.mera@epn.edu.ec)

Quito, Marzo 2014

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

DECLARACIÓN

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

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

Yánez Ramírez Enith Vanessa

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Yánez Ramírez Enith Vanessa, bajo mi supervisión.

Ingeniero Luis Mera

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme la oportunidad de alcanzar mis sueños, porque aunque yo me alejé de él, él nunca se alejó de mí bendiciéndome con salud, una familia unida y la sabiduría para tomar las decisiones correctas y seguir adelante.

A mi madre por siempre estar conmigo y brindarme todo su amor, aquella que con su afán y sacrificio me apoyaron cada día enseñándome a levantarme con más fuerza después de una caída.

A mi hermana Pamela que con sus locuras siempre me saco una sonrisa cuando estaba triste, mostrándome que por más negra que este la noche siempre habrá un amanecer más claro.

A mi gordita Litzzy, mi chiquitita linda que con su ternura y cariño me han hecho sentir una personita especial.

A Mauricio mi gatito lindo, quien cada momento desde que apareció en mi vida me ha cuidado y apoyado incondicionalmente, tomando mi mano para que no tropiece. Gracias mi chiquitín especial.

A Sarita G. y Clarita S. por su apoyo y ayuda desinteresada.

A mi padre por enseñarme a ser una persona trabajadora y apoyarme cuando yo lo necesitaba.

Al Ingeniero Mera por guiarme pacientemente y brindarme su apoyo durante todo este tiempo, mostrándome que a más de ser un buen profesor demostró ser un gran amigo.

A don Byron por brindarme su amistad y su ayuda en el laboratorio.

DEDICATORIA

A aquella persona que a pesar de todas las dificultades supo superarlas y no decaer, para alcanzar sus sueños.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	xiv
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. El aluminio y sus utilidades	1
1.1.1. Historia	1
1.1.2. El aluminio	1
1.1.2.1. Propiedades físicas y químicas	1
1.1.2.2. Propiedades mecánicas del aluminio	4
1.1.3. Aplicaciones del aluminio	5
1.2. Esmaltes porcelánicos para recubrir superficies de aluminio	7
1.2.1. Materias primas utilizadas para la preparación del esmalte	8
1.2.2. Tipos de esmaltes para aluminio	11
1.2.3. Factores que se deben tomar en cuenta para esmaltar una superficie de aluminio	11
1.2.3.1. Características del aluminio	11
1.2.3.2. Mecanismo que permite la adherencia entre el esmalte y el metal	14
1.2.4. Defectos en los esmaltados	14
1.3. Equipos utilizados para la dosificación y mezcla de sustancias sólidas	16
1.3.1. Fundamentos de la mezcla de sólidos	16
1.3.1.1. Mecanismos de mezclado	16
1.3.1.2. Tipos de equipos mezcladores de sólidos	17
1.3.2. Almacenamiento de materiales sólidos	20
1.3.3. Dosificación de sólidos	21
1.3.3.1. Formas de flujo en un silo	21
1.3.3.2. Tipos de dosificadores de sólidos	22
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	24
2.1. Definición de las materias primas que serán utilizadas en la elaboración de esmaltes porcelánicos para recubrir piezas de aluminio	24
2.1.1. Preparación de esmaltes porcelánicos	24
2.1.1.1. Formulación del esmalte	24
2.1.1.2. Preparación de las materias primas	25
2.1.1.3. Dosificación de las materias primas	26
2.1.1.4. Fusión de las materias primas y atronado del esmalte	26
2.1.2. Aplicación y cocción del esmalte	27
2.2. Determinación del efecto de la relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O}$ en la fusión de la mezcla de materias primas seleccionadas	29

2.2.1.	Preparación de las muestras con diferente relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O}$	29
2.2.2.	Tratamiento térmico de las muestras	30
2.2.3.	Determinación de la formación de la fase vítrea	34
2.3.	Formulación de un esmalte porcelánico para recubrir piezas de aluminio	34
2.4.	Diseño de un sistema de dosificación y mezcla de materias primas utilizadas en la elaboración de esmaltes porcelánicos	36
2.4.1.	Diseño del sistema de dosificación	36
2.4.2.	Diseño del sistema de mezclado	38
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
3.1.	Definición de las materias primas que serán utilizadas en la elaboración de esmaltes porcelánicos para recubrir piezas de aluminio	40
3.1.1.	Influencia del óxido de litio en la disminución de la temperatura de fusión de los esmaltes E-1 y E-2	40
3.1.2.	Influencia de la adición de óxidos fundentes en la temperatura de maduración del esmalte	43
3.2.	Determinación del efecto de la relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O}$ en la fusión de la mezcla de materias primas seleccionadas	59
3.2.1.	Pruebas de fusión con la relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{1,52}{1}$	60
3.2.2.	Pruebas de fusión con la relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{2,22}{1}$	62
3.2.3.	Pruebas de fusión con la relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{2,92}{1}$	64
3.2.4.	Pruebas de fusión con la relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{3,62}{1}$	66
3.2.5.	Pruebas de fusión con la relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{4,34}{1}$	68
3.3.	Formulación de un esmalte porcelánico para recubrir piezas de aluminio	70
3.3.1.	Determinación del tiempo de maduración de los esmaltes EF-5d y EF-5e	78
3.4.	Diseño de un sistema de dosificación y mezcla de materias primas utilizadas en la elaboración de esmaltes porcelánicos	81
3.4.1.	Diseño del sistema de dosificación	81
3.4.2.	Dimensionamiento de válvulas	85
3.4.3.	Sistema de pesado	87
3.4.4.	Dimensionamiento del sistema de descarga a la tolva de almacenamiento	87
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
4.1.	Conclusiones	99
4.2.	Recomendaciones	100

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	111

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Sistema de identificación de las aleaciones de aluminio según el elemento aleante	4
Tabla 2.1.	Materias Primas fuentes de los óxidos formadores del esmalte	25
Tabla 2.2.	Ciclos de cocción 1 y 2 aplicados a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5	30
Tabla 2.3.	Ciclos de cocción 3, 4 y 5 aplicados a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5	31
Tabla 2.4.	Ciclos de cocción A y B aplicados a los esmaltes EF-5d y EF-5e	35
Tabla 3.1.	Fórmula molecular del esmalte E-1	40
Tabla 3.2.	Superficie lograda con el esmalte E-1 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	41
Tabla 3.3.	Fórmula molecular del esmalte E-2	41
Tabla 3.4.	Superficie lograda con el esmalte E-2 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	42
Tabla 3.5.	Superficie lograda con el esmalte E-1a	42
Tabla 3.6.	Superficie lograda con el esmalte E-2a $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	43
Tabla 3.7.	Fórmula molecular del esmalte E-A	44
Tabla 3.8.	Superficie lograda con el esmalte E-A $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	44
Tabla 3.9.	Fórmula molecular del esmalte E-B	45
Tabla 3.10.	Superficie lograda con el esmalte E-B $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	45
Tabla 3.11.	Fórmula molecular del esmalte E-C	46
Tabla 3.12.	Superficie lograda con el esmalte E-C $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	46
Tabla 3.13.	Fórmula molecular del esmalte E-D	47
Tabla 3.14.	Superficie lograda con el esmalte E-D $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	47
Tabla 3.15.	Fórmula molecular del esmalte E-E	48
Tabla 3.16.	Superficie lograda con el esmalte E-E $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	48
Tabla 3.17.	Fórmula molecular del esmalte E-F	49
Tabla 3.18.	Superficie lograda con el esmalte E-F $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	49

Tabla 3.19.	Esmaltes porcelánicos formulados con variaciones del Na ₂ O, Li ₂ O y NaF	50
Tabla 3.20.	Fórmula molecular del esmalte E-G	51
Tabla 3.21.	Superficie lograda con el esmalte E-G T _m = 600 °C, t _m =10 min	51
Tabla 3.22.	Fórmula molecular del esmalte E-H	52
Tabla 3.23.	Superficie lograda con el esmalte E-H T _m = 600 °C, t _m =10 min	52
Tabla 3.24.	Fórmula molecular del esmalte E-I	53
Tabla 3.25.	Superficie lograda con el esmalte E-I T _m = 600 °C, t _m =10 min	53
Tabla 3.26.	Esmaltes porcelánicos formulados con variaciones del Li ₂ O y NaF	54
Tabla 3.27.	Fórmula molecular del esmalte E-Ia	54
Tabla 3.28.	Superficie lograda con el esmalte E-Ia T _m = 600 °C, t _m =10 min	55
Tabla 3.29.	Fórmula molecular del esmalte E-Ib	55
Tabla 3.30.	Superficie lograda con el esmalte E-Ib T _m = 600 °C, t _m =10 min	56
Tabla 3.31.	Fórmula molecular del esmalte E-Ic	56
Tabla 3.32.	Superficie lograda con el esmalte E-Ic T _m = 600 °C, t _m =10 min	57
Tabla 3.33.	Fórmula molecular del esmalte E-Id	57
Tabla 3.34.	Superficie lograda con el esmalte E-Id T _m = 600 °C, t _m =10 min	58
Tabla 3.35.	Esmaltes porcelánicos formulados con variaciones del B ₂ O ₃ y Li ₂ O	58
Tabla 3.36.	Materias primas seleccionadas	59
Tabla 3.37.	Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-1	60
Tabla 3.38.	Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-1 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{1,52}{1}$	61
Tabla 3.39.	Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-2	62
Tabla 3.40.	Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-2 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{2,22}{1}$	63
Tabla 3.41.	Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-3	64
Tabla 3.42.	Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-3 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{2,92}{1}$	65
Tabla 3.43.	Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-4	66

Tabla 3.44.	Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-4 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{3,62}{1}$	67
Tabla 3.45.	Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-5	68
Tabla 3.46.	Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-5 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{4,34}{1}$	69
Tabla 3.47.	Fórmula molecular del esmalte EF-5	71
Tabla 3.48.	Superficie lograda con el esmalte EF-5 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	71
Tabla 3.49.	Fórmula molecular del esmalte EF-5a	72
Tabla 3.50.	Superficie lograda con el esmalte EF-5 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	72
Tabla 3.51.	Fórmula molecular del esmalte EF-5b	73
Tabla 3.52.	Superficie lograda con el esmalte EF-5b $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	73
Tabla 3.53.	Fórmula molecular del esmalte EF-5c	74
Tabla 3.54.	Superficie lograda con el esmalte EF-5c $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	74
Tabla 3.55.	Fórmula molecular del esmalte EF-5d	75
Tabla 3.56.	Superficie lograda con el esmalte EF-5d $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	75
Tabla 3.57.	Fórmula molecular del esmalte EF-5e	76
Tabla 3.58.	Superficie lograda con el esmalte EF-5e $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	76
Tabla 3.59.	Fórmula molecular del esmalte EF-5f	77
Tabla 3.60.	Superficie lograda con el esmalte EF-5f $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$	77
Tabla 3.61.	Superficie lograda con el esmalte EF-5d $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 5, 10\text{ y } 15\text{ min}$	79
Tabla 3.62.	Superficie lograda con el esmalte EF-5e $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 5, 10\text{ y } 15\text{ min}$	80
Tabla AI.1.	Fórmula molecular del esmalte EF-5a	112
Tabla AI.2.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-1 y E-2	116
Tabla AI.3.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-A y E-B	117
Tabla AI.4.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-C y E-D	117
Tabla AI.5.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-E y E-F	117
Tabla AI.6.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-G y E-H	118

Tabla AI.7.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-I y E-Ia	118
Tabla AI.8.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-Ib y E-Ic	118
Tabla AI.9.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-Id y EF-5	119
Tabla AI.10.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes EF-5a y EF-5b	119
Tabla AI.11.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes EF-5c y EF-5d	119
Tabla AI.12.	Dosificación de las materias primas para los esmaltes EF-5e y EF-5f	120
Tabla AIII.1.	Dosificación de las materias primas consideradas para el diseño	124
Tabla AIII.2.	Ángulos de rozamiento con las paredes y ángulo de rozamiento interno de varios materiales	125

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Diagrama porcentual de los usos finales del aluminio, año 2007	6
Figura 1.2.	Elementos químicos que influyen en la adherencia entre el esmalte y el aluminio	12
Figura 1.3.	Etapas de preparación de la superficie de aluminio	13
Figura 1.4.	Etapas de la unión entre el esmalte y el metal	14
Figura 1.5.	Mezclador de doble cono	18
Figura 1.6.	Mezclador de cascos gemelos	18
Figura 1.7.	Mezclador de cintas	19
Figura 1.8.	Mezcladoras de tornillo vertical	20
Figura 1.9.	Partes de un silo	20
Figura 1.10.	Dosificador de tornillo giratorio	22
Figura 1.11.	Dosificador gravimétrico de pérdida de peso	23
Figura 1.12.	Dosificador gravimétrico tipo correa transportadora	23
Figura 2.1.	Horno para fusión y atronado de las materias primas	27
Figura 2.2.	Ciclo de cocción aplicado a los esmaltes elaborados	28
Figura 2.3.	Matriz con la mezcla de materias primas	30
Figura 2.4.	Ciclo de cocción 1 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5	31
Figura 2.5.	Ciclo de cocción 2 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5	32
Figura 2.6.	Ciclo de cocción 3 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5	32
Figura 2.7.	Ciclo de cocción 4 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5	33
Figura 2.8.	Ciclo de cocción 5 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5	33
Figura 2.9.	Ciclo de cocción A aplicado a los esmaltes EF-5d y EF-5e	35
Figura 2.10.	Ciclo de cocción B aplicado a los esmaltes EF-5d y EF-5e	36

Figura 3.1.	Porcentajes de las áreas fundidas de las mezclas EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5 a diferente temperatura	70
Figura 3.2.	Ciclo de cocción aplicado a los esmaltes EF-5d y EF-5e, $t_m = 5$ min	78
Figura 3.3.	Tolva de alimentación	82
Figura 3.4.	Partes de la tolva	83
Figura 3.5.	Cálculo de D_1	84
Figura 3.6.	Válvula de mantenimiento	85
Figura 3.7.	Válvula de dosificación	86
Figura 3.8.	Válvula de descarga	86
Figura 3.9.	Sistema de dosificación	87
Figura 3.10.	Y lateral derecha	88
Figura 3.11.	Y frontal	88
Figura 3.12.	Y lateral izquierda	89
Figura 3.13.	Tolva de almacenamiento	90
Figura 3.14.	Cálculo de D_3	92
Figura 3.15.	Mecanismo de descarga al mezclador	93
Figura 3.16.	Mezclador de tipo V	93
Figura 3.17.	Esquema de R_3	94
Figura 3.18.	Esquema del cilindro C_1	95
Figura 3.19.	Cálculo de b	96
Figura 3.20.	Esquema del recipiente R_1	96
Figura 3.21.	Centro de gravedad del mezclador	98
Figura AII.1.	Fotografía de la muestra EF-1 con temperatura de fusión de $700\text{ }^\circ\text{C}$	121
Figura AII.2.	Dimensiones de la fotografía de la muestra EF-1 con temperatura de fusión de $700\text{ }^\circ\text{C}$	121
Figura AII.3.	Áreas vítreas delimitadas de la fotografía de la muestra EF-1 con temperatura de fusión de $700\text{ }^\circ\text{C}$	122

Figura AIII.1. Sistema de dosificación y mezcla de las materias primas	123
Figura AIII.2. Ángulo medio de tolva para geometría cónica	125
Figura AIII.3. Dimensiones de la tolva	126
Figura AIII.4. Hoja de cálculo de D_1	128
Figura AIII.5. División del mezclador	129
Figura AIII.6. Dimensiones de R_3	129
Figura AIII.7. Esquema de las alturas de las cuñas cilíndricas	130
Figura AIII.8. Dimensiones del cilindro C_1	131
Figura AIII.9. Centro de gravedad del mezclador	133

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Cálculo de la dosificación de las materias primas para esmaltes porcelánicos	112
ANEXO II	
Determinación del área vítrea de las muestras obtenidas en el estudio 3.2	121
ANEXO III	
Cálculos usados para el diseño del sistema de dosificación y mezcla de materias primas utilizadas en la elaboración de esmaltes porcelánicos	123
ANEXO IV	
Plano de conjunto	134

RESUMEN

A través del presente proyecto se evaluó el efecto de la mezcla fundente que forman los óxidos de litio y de boro sobre la temperatura de maduración de esmaltes porcelánicos para ser aplicados sobre piezas de aluminio 1100.

Con base, en la composición química del esmalte porcelánico formulado en Gómez (2011) y que se utilizó para recubrir superficies de acero, se prepararon 15 mezclas vitrificables tomando como temperatura límite de fusión total la del aluminio.

Se evaluó el proceso de fusión de cada muestra a través del análisis por microscopía petrográfica y se determinó que el Na_2CO_3 , NaF , Li_2CO_3 y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, tienen influencia directa en la temperatura de maduración del esmalte.

Se estudió el efecto de la relación entre los óxidos de boro y de litio sobre la fusión de mezclas vitrificables. Se determinó que la mezcla con $\frac{\text{B}_2\text{O}_3}{\text{Li}_2\text{O}} = \frac{4,34}{1}$ presenta el 49,20 % de masa vitrificada a 600 °C. Con base en esta composición química, se formularon 7 esmaltes variando las concentraciones de óxido de sodio, litio y boro, se evaluaron cada una de ellas a través del análisis de los resultados de las superficies logradas.

De los resultados obtenidos se concluyó en que las superficies aceptables se obtuvieron con el esmalte EF-5a cuyo contenido en moles es: 0,53 de Na_2O , 0,25 de Li_2O , 0,15 de NaF y 1,08 moles de B_2O_3 , bajo el ciclo de cocción con temperatura de maduración de 600 °C y tiempo de maduración de 15 min.

Se diseñó y dimensionó los equipos para dosificar y mezclar 10 materias primas fuentes de los óxidos componentes del esmalte, con capacidad de procesar 15 kg/h de cada una de ellas.

El presente proyecto constituye el primer aporte del Departamento de Ingeniería Química a la investigación sobre la formulación de esmaltes porcelánicos utilizados en el recubrimiento de piezas de aluminio.

INTRODUCCIÓN

Los esmaltes vítreos proporcionan ventajas adicionales en inercia química, estabilidad a las altas temperaturas y propiedades mecánicas superiores en comparación con los metales, polímeros, pinturas, cauchos, entre otros. Los esmaltes han sido desarrollados y son adecuados únicamente para su uso en el esmaltado de las superficies de acero (Amitava y Sunirmal, 2001, p. 68; Vielhaber, 2004, p. 125).

Las principales razones por las que se cierran unidades de la industria, son las altas tasas de desgaste de sus equipos. Un recubrimiento vítreo protege a la superficie, ayudando a reducir el costo e incrementando la vida útil de los componentes (Amitava y Sunirmal, 2001, p. 69).

Los esmaltes para recubrir aluminio se preparan partiendo de fritas con altos coeficientes de dilatación térmica y bajo punto de fusión, por lo que se usan mezclas con grandes contenidos en óxidos alcalinos y componentes auxiliares.

El coeficiente de dilatación del aluminio provoca que durante el calentamiento se rompan y aíslen pequeñas áreas del esmalte (Romero, 2009, p. 12,13).

Las fritas para el esmaltado del aluminio, contienen principalmente PbO , SiO_2 , Na_2O , K_2O , ZrO_2 , Al_2O_3 , BaO , Li_2O , P_2O_5 y TiO_2 , en proporciones definidas.

El óxido de litio se lo emplea para obtener esmaltes con elevados coeficientes de dilatación térmica, disminuye el punto de fusión, aumenta la fluidez, mejora el brillo y la opacidad, su enérgica acción fundente permite aumentar el contenido de sílice y alúmina con un mejoramiento en la estabilidad de los esmaltes (Sánchez, García-Ten y Regueiro, 2006, p. 3).

Por lo expuesto en el presente proyecto se realizó estudios preliminares sobre la formulación de esmaltes porcelánicos exentos de plomo que se utilizan en el recubrimiento de aluminio; además se planteó la obtención de la mejor

concentración de la mezcla fundente entre los óxido de boro y óxido de litio que permita obtener una temperatura de fusión menor que la del aluminio.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. EL ALUMINIO Y SUS UTILIDADES

1.1.1. HISTORIA

El aluminio fue descubierto en Inglaterra por Sir Humphrey Davey en 1807, varios años más tarde se pudo determinar sus propiedades y se empezó a comercializar a partir del año 1855. En la antigüedad se obtenía únicamente a escala de laboratorio (Nañez, 1998, p. 4).

Charles Martin Hall y Paul L.T. Héroult en el año de 1886 diseñaron el proceso industrial para producir aluminio, desde allí el consumo de este metal se incrementó a nivel mundial. Según datos estadísticos el consumo mundial se duplica cada diez años, convirtiéndose en el segundo metal industrial más consumido después del acero (Ruiz, Delgado y Torralba, 2008, p. 206; Surace, 2003, p. 1).

1.1.2. EL ALUMINIO

El aluminio es un elemento químico muy común de la corteza terrestre, se halla presente combinado con varios minerales, formando óxidos, silicatos y combinado con otros elementos químicos. Se lo encuentra en el mineral llamado bauxita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) cuyo contenido de aluminio está entre el 20 al 30 %, se lo encuentra también en la criolita, en piedras preciosas como el rubí, zafiro y el topacio (Coca, 2004, p. 9; Guillén, 2008, p. 2; Saidman y Bessone, 2001, p. 699).

1.1.2.1. Propiedades físicas y químicas

El aluminio es un metal blanco plateado muy ligero, brillante y relativamente blando, cristaliza en red cúbica centrada en las caras, es un buen conductor del

calor y la electricidad, su coeficiente de conductividad térmica es $235 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ y de conductividad eléctrica es $37,67 \text{ m}\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}$. Presenta un alto poder de reflexión en lo que se refiere a radiaciones luminosas y térmicas, posee neutralidad magnética. Su masa atómica es 26,98, su punto de fusión es de $660 \text{ }^\circ\text{C}$ y el de ebullición $2\ 450 \text{ }^\circ\text{C}$, tiene una densidad o peso específico igual a $2\ 700 \text{ Kg/m}^3$ y el coeficiente de dilatación lineal de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ es $23,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Coca, 2004, p. 7; Santos, 2011, p. 5; Vielhaber, 2002, p. 55).

Presenta alta resistencia a la corrosión frente al agua, aceites, aire, alimentos y agentes químicos pues al estar en contacto con estos se recubre de una capa de óxido llamada alúmina, cuyo espesor esta comúnmente entre 10-20 Å dependiendo de las condiciones de temperatura y atmósfera, que la protege de la corrosión (González, Escudero, López, Simancas y Morcillo, 2009, p. 259; Ruiz, et al, 2008, p. 207).

El aluminio puro presenta una resistencia baja a la tracción y una escasa dureza, por lo que se lo debe combinar con otros elementos para dar lugar a distintas aleaciones, cuyas propiedades como: conductividad eléctrica, resistencia mecánica, ductilidad, y resistencia a la corrosión se incrementa adquiriendo valores incluso comparables a las del acero (Valdez, 2013, p. 1).

Los principales elementos aleantes solubles en el aluminio son: cobre, zinc, silicio, magnesio, manganeso, y en pequeñas cantidades se encuentran como impurezas el níquel, cobalto, plata, titanio, estaño, hierro, litio, plomo, circonio, bismuto entre otros (Gómez, Jasso, Maldonado y Haro, 2008, p. 1).

A continuación se detalla las ventajas y efectos que provocan varios de sus elementos aleantes (Kalpakjian y Schimid, 2002, p. 159; Marcos, 2002, p. 9-14).

- Cadmio: Eleva la resistencia a la corrosión.
- Cobre: Forma el compuesto intermetálico Al_2Cu , que ayuda a elevar la resistencia mecánica del aluminio pero disminuye su resistencia a la corrosión.

- Zinc: Disminuye la resistencia a la corrosión y la soldabilidad, facilita la colabilidad. Este elemento se lo adiciona asociado con cobre.
- Magnesio: Forma el compuesto intermetálico Al_2Mg_3 , las aleaciones formadas son ligeras debido a la densidad de los dos elementos, incrementa la resistencia a la corrosión, mejora la maquinabilidad y soldabilidad.
- Manganeso: Refuerza las propiedades mecánicas del aluminio.
- Níquel: Mejora las características mecánicas y la colabilidad de las aleaciones de forja, además produce una gran resistencia al calor.
- Silicio: Mejora las características de soldabilidad, conformabilidad, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión cuando se encuentra combinado con Mg.
- Titanio: Mejora las características mecánicas del aluminio.
- Cromo: Cuando esta combinado con Cu, Mn y Mg incrementa la resistencia mecánica del aluminio.

Las aleaciones de aluminio se dividen en dos grupos: aleaciones por forja y por fundición.

Aleaciones por Forja: Este tipo de aleaciones se obtienen a través de procesos por deformación plástica (Guillén, 2008, p. 3).

Aleaciones por fundición: Este tipo de aleaciones poseen grandes cantidades de elementos de aleación para facilitar la fundición lo que dificulta su trabajo en frío (Nisbett y Budynas, 2008, p. 51).

Para identificar las aleaciones, según la Aluminium Association, tanto para las forjadas como las de fundición, se usa un sistema de cuatro dígitos y dos letras (H o T) que nos indican el tipo de temple que ha sufrido la aleación (Avner, 2008, p. 477, 480).

El primer dígito indica el elemento aleante principal, como lo muestran los datos presentados en la Tabla 1.1, el segundo las modificaciones al límite de impurezas, si es cero significa que no tiene control especial y los enteros del 1 al 9 especiales controles de impurezas (Ortolá, 2009, p. 3).

Por ejemplo la aleación 1050 H18, nos indica que es un metal con 99,5 % de Al y un estado metalúrgico duro.

Tabla 1.1. Sistema de identificación de las aleaciones de aluminio según el elemento aleante

Principal Aleante	Denominación
Aluminio puro	1xxx
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Silicio y magnesio	6xxx
Zinc, cobre, magnesio, cromo y zirconio	7xxx
Estaño y algo de litio	8xxx
Reservados para usos futuros	9xxx

(Kalpakjian y Schmid, 2002, p. 160)

1.1.2.2. Propiedades mecánicas del aluminio

Es un material de fácil mecanizado, dúctil y maleable lo que favorece su utilización en la producción de hilos y láminas muy finas obtenidas por fundición. Se procesa mediante fusión en arena o en matriz, trabajo en caliente o en frío por extrusión, su módulo de elasticidad y de sus aleaciones es de 71,7 GPa (Nisbett y Budynas, 2008, p. 51).

La dureza del aluminio purísimo blando es de 15 (Brinell) y puede llegar a ser hasta de 110 (Brinell) para aluminio endurecido térmicamente. En algunos casos ciertas aleaciones llegan a ser más resistentes que el acero (Vera, Schrebler, Layana, Orellana y Olguín, 1998, p. 268).

1.1.3. APLICACIONES DEL ALUMINIO

El aluminio y sus aleaciones han sido incorporados en prácticamente todos los sectores de la producción debido a la capacidad de sustituir a otros metales y a su costo relativamente bajo, por lo que se ha convertido en uno de los más importantes a nivel mundial (Fernández y Restrepo, 2008, p. 22; Gómez et al., 2008, p. 2).

Los sectores en los que se usa el aluminio son:

Transporte: En la actualidad el sector transporte absorbe la cuarta parte de la producción del aluminio, ya que aproximadamente el 5 % del peso de un automóvil constituye el aluminio (Sánchez et al., 2006, p. 160; Surace, 2003, p. 4,5).

Se lo utiliza en la fabricación de cabezas de cilindro de transmisiones, tapas de motor, pistones, compresores de aire acondicionado entre otros. El objetivo es reducir su peso con lo que se incrementa la eficiencia del carburante y se ahorra energía disminuyendo las emisiones gaseosas a la atmósfera. En un automóvil medio el uso de 1 kg de aluminio ahorra 28 kg de CO₂. Según datos estadísticos más del 98 % del metal es reciclado, regresando gran parte de este al mismo sector y con un ahorro de 95 % de la energía requerida para su producción (European Aluminium Association, 2007, p. 4-6).

En el sector aeronáutico y aeroespacial, es extremadamente importante el uso del aluminio debido a su ligereza, resistencia y maleabilidad (DeGarmo, Black y Kohser, 2002, p. 22).

A continuación se presenta una gráfica en la que se puede observar en porcentaje los usos más comunes de productos desechados del aluminio.

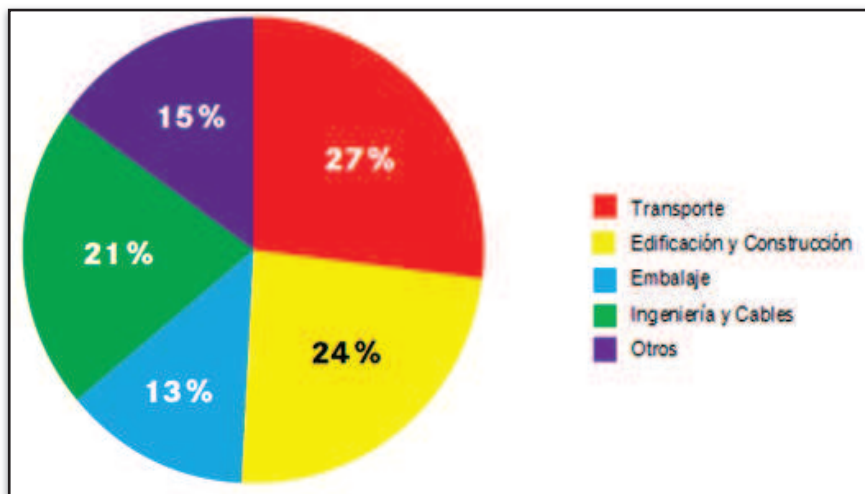


Figura 1.1. Diagrama porcentual de los usos finales del aluminio, año 2007
(Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, International Aluminium Institute, 2009, p. 17)

Edificación y construcción: La demanda de aluminio en el sector de la construcción ha crecido en los últimos 50 años en comparación con otros metales.

Se elaboran muros, cortinas, ventanas, puertas, piezas estructurales, como ruedas, bloques, chapas para cubiertas de edificios. En la actualidad se desarrollan interesantes proyectos y técnicas de edificación (López, Otero, Escudero y González, 2001, p. 1141).

Envase y embalaje: La inercia química que posee el aluminio lo hace un material idóneo para el envase y embalaje, debido a que los compuestos que forma son atóxicos, incoloros e ino cuos. Además es ligero, impermeable, protege los productos de la luz, microorganismos, entre otros.

Tiene múltiples aplicaciones que van desde latas, ampollas, tapas para cerrar envases, papel de aluminio, capas intermedias de envases de cartón (Cerdeo, 2009, p. 1; Kalpakjian y Schimd, 2002, p. 157).

Otros usos: La alta conductividad eléctrica del aluminio facilita su utilización en la elaboración de conductores eléctricos, cableado subterráneo, líneas de

transmisión eléctrica, transformadores, cajas de fusible, televisiones entre otras (Bunte, Zamboni, Glassel y Zalcman, 2007, p. 1936; Coca, 2004, p. 7).

Su alta conducción del calor, permite su utilización en la elaboración de utensilios de cocina y en componentes que demanden intercambio de calor. Se lo utiliza también para elaborar cascos de barco y otros mecanismos acuáticos por su bajo peso específico y excelente resistencia a la corrosión (Nañez, 1998, p. 5; Ruiz et al., 2008, p. 206).

1.2. ESMALTES PORCELÁNICOS PARA RECUBRIR SUPERFICIES DE ALUMINIO

Un esmalte porcelánico se define como una especie de vidrio de composición inorgánica que se adhiere a los metales por fusión o sinterizado.

El adelanto tecnológico ha creado la necesidad de elaborar nuevos revestimientos que protejan los metales contra las altas temperaturas y la corrosión.

Los esmaltes porcelánicos proporcionan al metal ventajas adicionales superiores a las que ofrecen los otros métodos de recubrimiento como los metales, polímeros, lacas entre otros.

El esmaltado del aluminio es una industria posterior a la II Guerra mundial, cuyos primeros intentos se dieron en Estados Unidos. Esta industria surgió como industria colaboradora de la construcción (Leveaux, et al., 2001, p. 1).

La industria del esmaltado de aluminio es corta y limitada en comparación a los estudios realizados para otros metales esmaltados. Sin embargo, hay grandes posibilidades de que el mercado se expanda y se apodere del que hoy son dueños los materiales ferrosos.

1.2.1. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS PARA LA PREPARACIÓN DEL ESMALTE

Las primeras fritas que se elaboraban para recubrir superficies de aluminio contenían sustancias nocivas para el ser humano como cadmio y plomo, que también ayudan a bajar la temperatura de fusión. Con el tiempo el uso de estas sustancias se redujo (Leveaux et al., 2001, p. 1).

Para bajar la temperatura de maduración de este tipo de esmalte se usan mezclas eutécticas, con lo cual se puede reducir el contenido de sustancias peligrosas como el plomo y llegar a obtener temperaturas adecuadas de fusión.

Clasificación de las materias primas: La composición química de una frita se la puede lograr mediante una combinación de diferentes materias primas. La variabilidad de esta mezcla dependerá del costo, disponibilidad y la función que se quiera satisfacer (Rincón, 2011, p. 51).

Las materias primas que se utilizan para la elaboración de un esmalte en general se presentan a continuación:

Sustancias refractarias: Las sustancias refractarias o vitrificantes son los óxidos formadores de la red vítrea, se caracterizan por presentar elevadas temperaturas de fusión.

Su incorporación dentro de la estructura del esmalte provoca un incremento de su viscosidad y retrasan los procesos de sinterización y de maduración. Dentro de las materias fuentes de los óxidos formadores de la red vítrea se destacan: el cuarzo, corindón, alúmina entre otras (Sánchez et al, 2006, p. 2).

El cuarzo constituye el formador del retículo de los vidrios interviene en mayor cantidad, en porcentajes del 50 al 80 %. Su uso provoca un incremento en la temperatura de maduración, resistencia mecánica, resistividad eléctrica y

resistencia química, disminuye el coeficiente de dilatación térmica y actúa desfavorablemente sobre la elasticidad (Fernández, 1989, p. 451).

El óxido de aluminio (Al_2O_3), mejora las propiedades mecánicas y resistencia del esmalte contra los ácidos, es estabilizante, evita la desvitrificación, aumenta la viscosidad por lo que afecta su elasticidad, retrasa el proceso de sinterización y de maduración (Vielhaber, 2002, p. 7-11).

Fundentes: La función principal de los fundentes es disminuir la temperatura a la cual funde la mezcla de materias primas. Aportan al vidrio óxidos modificadores de la red, aceleran el proceso de sinterización, y permiten la disolución e incorporación de los materiales refractarios a la fase fundida (Cantavella, 2008, p. 12).

Entre las materias primas usadas como fundentes se pueden encontrar los feldespatos, bórax, carbonato de litio, criolita y fluorita.

El óxido de boro (B_2O_3), se lo obtiene a partir del ácido bórico (H_3BO_3) o del compuesto conocido como bórax. Este compuesto disminuye el coeficiente de dilatación térmica, reduce la temperatura de fusión, mejora la viscosidad, tensión superficial, brillo e índice de refracción, aumenta la resistencia al choque térmico, previene el cuarteado. La cantidad contenida de B_2O_3 en un determinado esmalte disminuye la resistencia a la acción de los ácidos.

El óxido de sodio (Na_2O), se lo puede introducir al esmalte a partir del carbonato de sodio y sulfato sódico. Este óxido es muy importante ya que se lo usa prácticamente en todos los esmaltes; es el segundo componente después de la sílice y vidrios debido a sus cualidades vítreas y a su precio relativamente económico.

La incorporación de este compuesto en la formulación del esmalte provoca el aumento del coeficiente de dilatación térmica, disminuye el intervalo de

maduración, actúa como agente afinante, elimina burbujas, en algunos casos provoca una disminución de la resistencia química del vidrio (Rincón, 2011, p. 57).

El carbonato potásico es fuente del óxido de potasio (K_2O), el cual interviene en la composición de casi todos los esmaltes en cantidades menores que 1 %. Disminuye el coeficiente de dilatación térmica, la fluidez del esmalte, incrementa sus propiedades mecánicas y le confiere un mejor aspecto (Zimbrón, 2004, p. 10).

El óxido de calcio (CaO), mejora las propiedades mecánicas del esmalte, pero lo hace quebradizo. Ingresa en la mezcla de materias primas como caliza, carbonato de calcio u óxido.

El carbonato de litio (Li_2CO_3), es fuente del óxido de litio (Li_2O) que es un fundente excelente, ya que disminuye el tiempo de afinación por la disminución de temperatura. Además disminuye el coeficiente de dilatación térmica (Fernández y Ferrandis, 2011, p. 127).

Agentes opacificantes: Dentro de estos podemos encontrar la criolita ($NaF-AlF_3$) y la fluorita (CaF_2); permiten dispersar la luz y proporcionan una disminución de la viscosidad del esmalte. Su uso no permite controlar el aspecto superficial del esmalte.

La criolita presenta una fuerte acción fundente que se debe al contenido de flúor y sodio, incrementa el coeficiente de expansión térmica y disminuye la elasticidad. Su uso incrementa el apareamiento de burbujas debido a la volatilización de gases (Vielhaber, 2002, p. 15; Cantavella, 2008, p. 16).

Componentes auxiliares: Son sustancias cristalinas que se introducen en el esmalte en proporciones específicas, que dependerá de los fines deseados. Como sustancias auxiliares podemos nombrar a los agentes oxidantes, los reguladores de la consistencia, los óxidos adhesivos, los opacificantes y los óxidos colorantes.

El óxido de circonio es un agente opacificante, debido a su elevado índice de refracción tiende a enturbiar el esmalte (Bender y Hellerstein, 2000, p. 17).

1.2.2. TIPOS DE ESMALTES PARA ALUMINIO

Las dificultades de la aplicación de un esmalte sobre una superficie de aluminio se deben a la temperatura de fusión de éste, cuyo valor es de 660 °C, y a su alto coeficiente de dilatación térmica entre 20 °C y 100 °C es $23,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Vielhaber, 2002, p. 54).

Existen dos tipos de esmaltes que se pueden utilizar para recubrir superficies de aluminio: los que contienen óxido de plomo y los exentos de éste óxido.

Dentro de los segundos se encuentran los tipo: fluoruros, aluminofosfatos alcalinos, bario, silicotitanatos alcalinos y vanadio.

1.2.3. FACTORES QUE SE DEBEN TOMAR EN CUENTA PARA ESMALTAR UNA SUPERFICIE DE ALUMINIO

Si se desea recubrir una pieza de aluminio con esmalte porcelánico, se debe tomar en cuenta algunos aspectos que se detallan a continuación.

1.2.3.1. Características del aluminio

Existen varios factores que se deben tomar en cuenta al momento de decidir el tipo de aleación de aluminio que se desea esmaltar, ya que no todas las aleaciones presentan características idóneas para realizar este proceso. Se debe tener en cuenta la temperatura de fusión, los elementos aleantes y la preparación necesaria de su superficie antes de aplicar el recubrimiento (Ferraro, 2006, p. 1, 2).

Las aleaciones consideradas idóneas para ser esmaltadas son la chapa de aluminio 1100 (comercialmente puro), 3003, 6061, 7104 y, para fundición de aluminio, son las 43, 356 y 344 (Kirk y Othmer, 2005, p. 8).

Las aleaciones no consideradas aptas para ser esmaltadas son aquellas que presentan en su composición altos contenidos de magnesio. La presencia de este elemento provoca que al momento de esmaltar se produzca una capa de alúmina no homogénea, que no se disuelve totalmente en el esmalte provocando que no se adhiera al metal (Kirk y Othmer, 2005, p. 8).

La presencia de ciertos elementos químicos en aleaciones de aluminio, influye negativamente sobre la adherencia entre el aluminio y el esmalte, como se puede observar en la Figura 2.1.

2	Li	Be											B	C	N
3	Na	Mg											Al	Si	P
4	K	Ca	Sc	Ti	Va	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As
5	Rb	Sr	Y	Zr	Ni	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi

Figura 1.2. Elementos químicos que influyen en la adherencia entre el esmalte y el aluminio
(Ferraro, 2006, p. 3)

En color verde se destacan los elementos químicos que influyen positivamente, en rojo los que lo hacen negativamente, y en azul los que no afectan de ninguna forma la adherencia entre esmalte y metal.

La limpieza química de la superficie de aluminio, tiene una gran influencia en el mecanismo de adhesión, entre el esmalte y el metal. Es una fase muy importante del proceso de esmaltado.

Para el aluminio 1100 y el 3003 hace falta solamente un desengrasado y limpieza de la superficie con el fin de eliminar grasas y aceites (Kirk y Othmer, 2005, p. 10).

El aluminio puro o las aleaciones sin magnesio deben ser limpiados mediante un desengrasado térmico a 540 °C. Se puede utilizar también una solución química detergente, que se puede preparar con carbonato sódico y fosfatos sódicos inhibidos con silicato sódico eliminando la acción corrosiva.

Si se desean mejores resultados después del desengrasado se puede usar un mordentado en ácido sulfúrico del 6 % a temperaturas entre 45 °C y 50 °C de 3 a 5 minutos, para después realizar un mordentado final en un baño de una solución de hidróxido sódico, cromato potásico y sulfato de cromo de 4 a 5 minutos a temperaturas entre 49 °C y 52 °C. Se lava con agua corriente para eliminar las sales de cromo (Vielhaber, 2002, p. 55).

Para la realización de la limpieza existen varias formas que dependerán del uso final que se le desea dar a las piezas y de la disponibilidad de reactivos. Sin embargo el mejor ciclo conocido para la preparación de este tipo de piezas se reporta en la Figura 1.3 (Ferraro, 2006, p. 6).

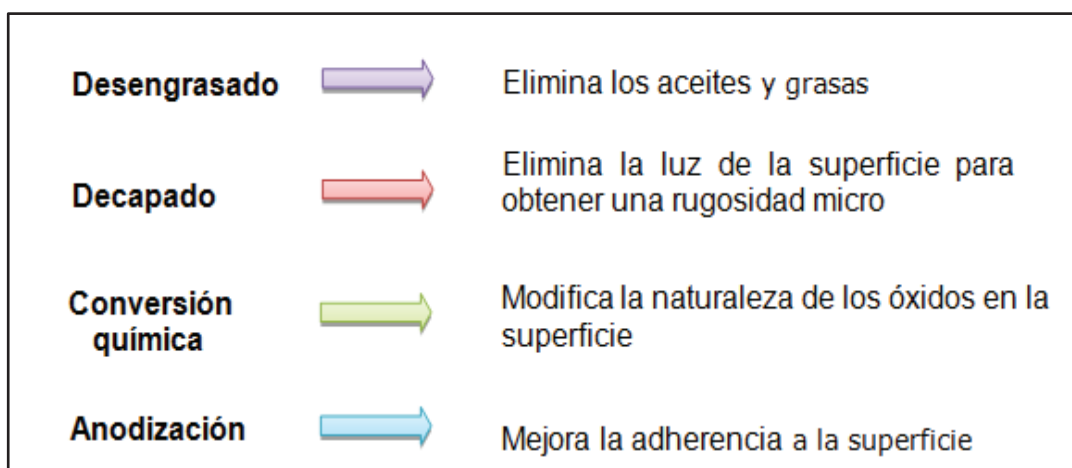


Figura 1.3. Etapas de preparación de la superficie de aluminio

1.2.3.2. Mecanismo que permite la adherencia entre el esmalte y el metal

El esmalte presenta una estructura en la que prevalecen los enlaces de tipo iónico con la superficie de aluminio. El mecanismo de adherencia se produce a través de 4 etapas que se detallan en la Figura 1.4 (Leveaux et al., 2001, p. 1).

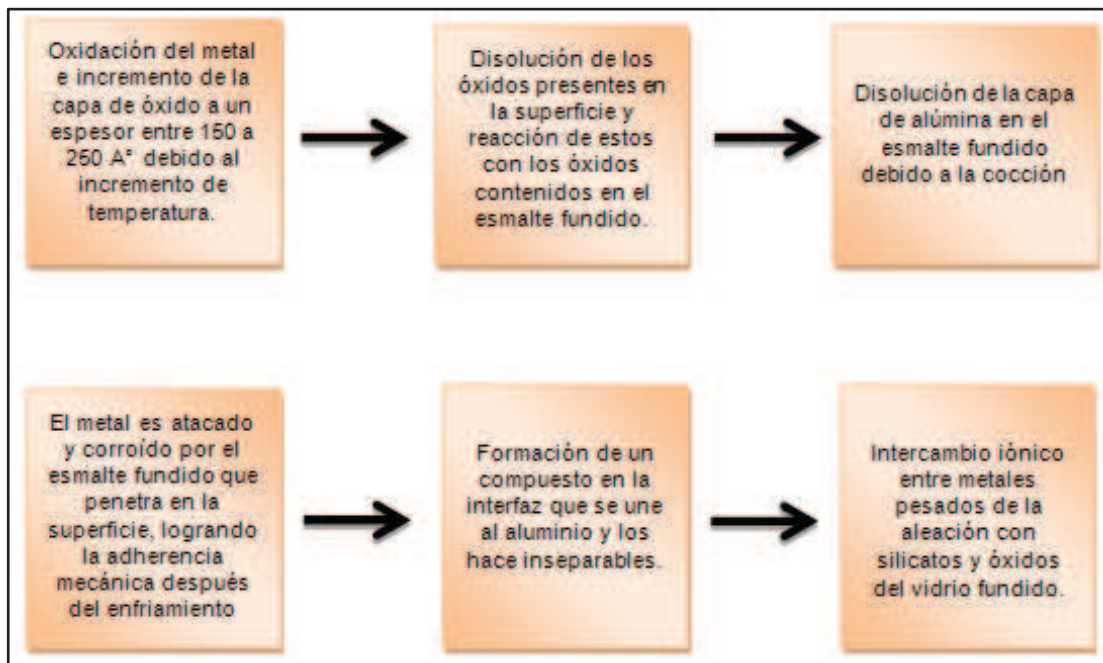


Figura 1.4. Etapas de la unión entre el esmalte y el metal

1.2.4. DEFECTOS EN LOS ESMALTADOS

Los distintos tipos de defectos se presentan por varios factores, tales como: las características del material, el esmalte mismo y del proceso de elaboración.

Los defectos más comunes se presentan a continuación:

Burbujas: La presencia de burbujas en el seno del esmalte provoca una disminución de las propiedades mecánicas y transparencia del esmalte; están relacionadas con la naturaleza del soporte y del esmalte. Las posibles causas de la presencia de burbujas son gases que se producen por la descomposición de materias primas, desgasificación del soporte, impurezas orgánicas, contaminantes

del esmalte, vapor de agua, aire en la capa de esmalte o esmaltes excesivamente fundentes (Cantavella, 2008, p. 55).

Esquirlas: Se debe a la falta de adaptación del esmalte a las curvaturas de la pieza debido a su baja dilatación térmica, o al exceso en el espesor de la capa (Vielhaber, 2002, p. 114).

Grietas capilares: Son finas rajaduras que aparecen en la superficie después del enfriamiento del esmalte cocido. Estas rajaduras se deben a la falta de compatibilidad entre esmalte y soporte, quizás debido a la diferencia de coeficiente de dilatación (Vielhaber, 2002, p. 115).

Recogidos: Se producen cuando pequeñas áreas de la pieza quedan sin esmaltar o parcialmente esmaltadas.

Esto puede deberse a una excesiva molienda del esmalte, aumento excesivo de la temperatura en la zona de precalentamiento o soportes contaminados (Mulero y Franquesa, 2010, p. 12).

Adherencia defectuosa: Se da cuando el mecanismo de adherencia entre el esmalte y el metal no fue el adecuado. El esmalte salta con facilidad del soporte, quizás debido a que el esmalte fundió demasiado rápido por lo que se debe ajustar el intervalo de cocción; el caso contrario se da cuando aparece un saltado del esmalte debido al coeficiente de dilatación muy bajo (Mulero y Franquesa, 2010, p. 56).

Poros: Son pequeñas burbujas que quedan ocluidas y se deben a los gases desprendidos durante la fusión.

Distorsión de las piezas: Se puede deber a la utilización de láminas muy delgadas, la capa de espesor del esmalte, calefacción o enfriamiento desigual de la pieza por una aglomeración.

1.3. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA DOSIFICACIÓN Y MEZCLA DE SUSTANCIAS SÓLIDAS

Los óxidos que forman la red vítrea provienen en su mayoría de materias primas que en algunos casos constituyen minerales no metálicos que contienen más de un tipo de óxido; éstas deben ser dosificadas en función de la fórmula molecular y la cantidad de esmalte que se desea preparar.

1.3.1. FUNDAMENTOS DE LA MEZCLA DE SÓLIDOS

El mezclado de sólidos es una operación muy importante que se da en casi todos los procesos químicos. Su objetivo es obtener una distribución homogénea de varios componentes del sistema (McCabe, Smith y Harriot, 2002, p. 1029-1030).

Para obtener un buen mezclado se debe tomar en cuenta la forma, tamaño, densidad, adhesividad y la tendencia a deslizarse de cada una de las partículas de mezcla. Las partículas deben tener características semejantes, lo que permitirá evitar el fenómeno de segregación (Rodríguez et al., 2002, p. 65).

Existen 2 tipos de mezclas:

Mezcla ordenada: Es un sistema en el que los elementos no se comportan independientemente unos de otros.

Mezcla aleatoria: Es un sistema en el que la probabilidad de encontrar un componente de la mezcla es la misma en cualquier punto del sistema.

1.3.1.1. Mecanismos de mezclado

Existen tres mecanismos de mezclado que son:

Mezclado por movimiento convectivo: Se presenta cuando el movimiento de una gran cantidad de masas de material es producido por la inversión del lecho o por arrastre.

Mezclado por cizalla o corte: En este proceso, el movimiento de elementos mecánicos situados en el interior del recipiente de mezclado, provoca, que en ciertos espacios del lecho, se den planos de deslizamiento.

Mezclado por difusión: En este proceso el mezclado se da por el movimiento aleatorio de partículas individuales en la superficie del lecho.

1.3.1.2. Tipos de equipos mezcladores de sólidos

Un buen mezclador es el equipo que presenta facilidad para su limpieza y descarga, que sea hermético al polvo, que no requiera mucho mantenimiento y que la operación se realice de forma rápida y con el menor costo económico.

Mezcladores de carcasa giratoria: Son equipos que se basan en el mecanismo difusivo suave que se logra cuando se hace rotar un recipiente cilíndrico alrededor de su eje horizontal en el cual se encuentra la mezcla.

La eficiencia del proceso se puede mejorar colocando elementos internos que incrementan la eficiencia del equipo pero dificultan la limpieza. El material a mezclar se desmorona sobre sí mismo y en ocasiones se puede presentar movimiento de tipo convectivo (McCabe et al., 2002, p. 1032).

La carga máxima en este tipo de mezcladores no debe superar el 50-60 % del volumen total, estos equipos son relativamente baratos y la potencia requerida es baja. El consumo de energía está alrededor de 5 kw/1000kg (Morataya, 1997, p. 37).

Dentro de los mezcladores de carcasa giratoria podemos encontrar:

Mezclador de doble cono: Se usa para mezclar polvos que fluyen libremente, la mezcla se produce por movimiento del material en cada uno de los extremos del equipo. Se puede cargar y descargar por ambos lados, es de fácil limpieza, el tiempo del proceso oscila de 5 a 20 minutos. El esquema se presenta en la Figura 1.5 (McCabe et al., 2002, p. 1032).

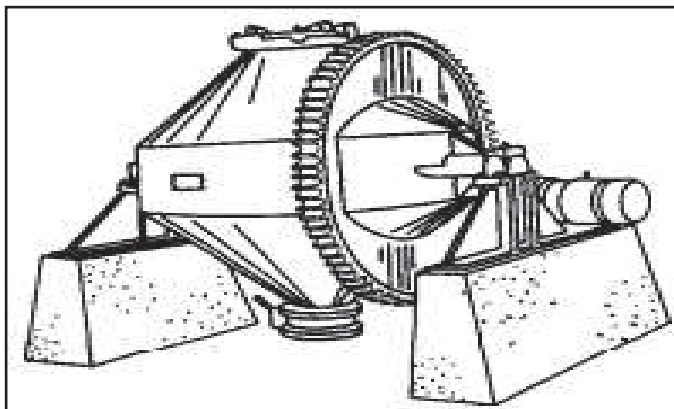


Figura 1.5. Mezclador de doble cono
(McCabe et al., 2002, p. 1027)

Mezclador de cascos gemelos: Este tipo de mezclador está formado por dos cilindros que se unen en forma de "V" y giran alrededor de un eje horizontal que incrementa la acción del mezclado. Son equipos que presentan bajo consumo de energía y su mantenimiento es sencillo. Su esquema se presenta en la Figura 1.6 (Morataya, 1997, p. 38; McCabe et al., 2002, p. 1033).

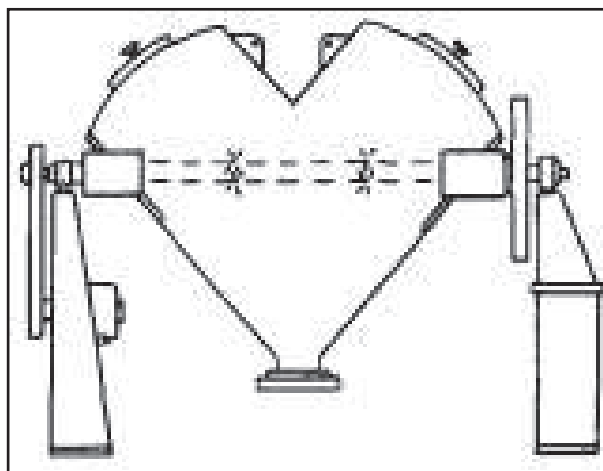


Figura 1.6. Mezclador de cascos gemelos
(McCabe et al., 2002, p. 1033)

Mezcladores de cuerpo fijo: En estos equipos el recipiente de mezcla permanece estático. El proceso se da por difusión y convección, que se logra gracias a la presencia de elementos mecánicos. También se puede mezclar sólidos con cierta cantidad de humedad.

Como ejemplo de mezcladores de cuerpo fijo tenemos:

Mezcladores de cintas: Es un recipiente semicilíndrico, el mezclado se produce por turbulencia que se induce por un agitador de cintas helicoidales que actúan en sentidos contrarios. Es una mezcladora continua, la capacidad es de 15 m³, no es de fácil limpieza y el consumo de energía es alto.

Se lo utiliza para operaciones sencillas y exigentes. Un esquema se presenta en la Figura 1.7 (Rodríguez et al., 2002, p. 66).

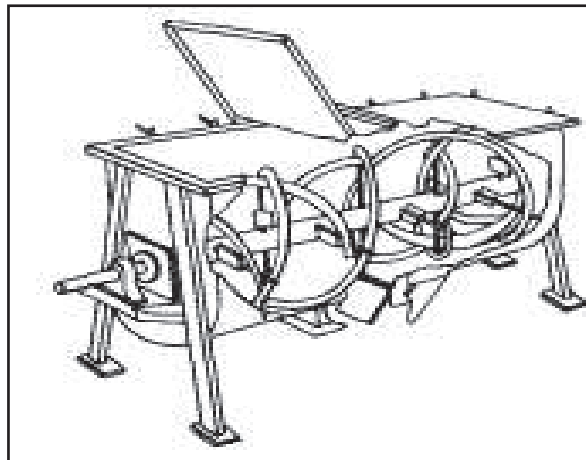


Figura 1.7. Mezclador de cintas
(McCabe et al., 2002, p. 1032)

Mezclador de tornillo interno: Estos equipos se caracterizan porque el mecanismo predominante es de tipo convectivo gracias a un tornillo vertical giratorio que puede estar fijo o desplazarse formando una órbita alrededor del eje central. Este tipo de mezclador es menos eficiente que el mezclador de cintas pero el consumo de energía es menor. Un esquema se presenta en la Figura 1.8.

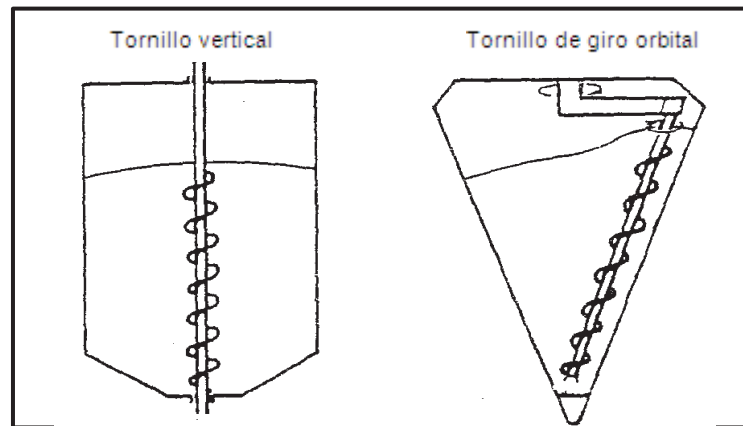


Figura 1.8. Mezcladoras de tornillo vertical
(McCabe et al., 2002, p. 1027)

1.3.2. ALMACENAMIENTO DE MATERIALES SÓLIDOS

Las materias primas se almacenan en silos o tolvas, cada una de ellas con los acoples que permitan la alimentación a los distintos sistemas de transporte neumático.

Un silo por lo general está compuesto de una sección vertical y de una sección convergente. La carga se realiza por la parte superior, el elemento principal es el alimentador que se encarga de dosificar el material a la línea de transporte el esquema se presenta en la Figura 1.9 (McCabe et al., 2002, p. 1027).

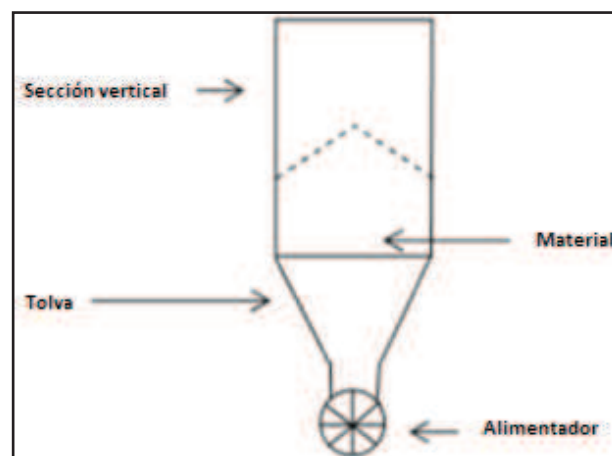


Figura 1.9. Partes de un silo
(Allendes, 2007, p. 15)

Dentro de un determinado contenedor se originan 2 tipos de fuerzas de rozamiento que se manifiestan en la masa del sólido provocando fricción. Las que se presentan entre la pared de la tolva y las partículas del sólido, y las que existen entre las partículas entre sí (Aragón, Yugo y Palancar, 2005, p. 1).

El material de construcción de las tolvas es generalmente acero inoxidable, y su interior es recubierto de materiales de baja fricción para facilitar el flujo del material (Ortega y Carillo, 2011, p. 15).

1.3.3. DOSIFICACIÓN DE SÓLIDOS

El objetivo de la dosificación es distribuir las materias primas sin desperdicios y en cantidades exactas, debiendo ser una operación simple y eficiente (Gennaro, 2003, p. 810; Santoyo, Guatemala, Orozco y Arriola, 2010, p. 180).

Los polvos se comportan como líquidos viscosos en flujo laminar. Si el diámetro del silo es 2,5 veces el diámetro del orificio de salida ($D > 2,5 D_o$) el flujo es independiente del diámetro del silo, y el flujo es independiente de la altura del lecho cuando esta altura es 2,5 veces el diámetro del silo ($H > 2,5 D$) (Mankoc, 2007, p. 6).

1.3.3.1. Formas de flujo en un silo

Para determinar el flujo en un silo es importante conocer la fricción entre el material almacenado, las paredes del depósito de la tolva y el sumidero.

Flujo másico: El flujo másico significa que todo el material dentro del silo se encuentra en movimiento; la fricción de las partículas con el silo es menor que entre ellas produciendo un remezclado con lo que se garantiza una descarga completa.

Para tener un flujo másico se requiere que las paredes del silo sean lisas y su ángulo con respecto a la horizontal sea mayor que 70° (Zuriguel, 2005, p. 29).

Flujo canalizado: En éste tipo de flujo la fricción de las partículas entre sí es menor que el de las partículas con la pared, el sólido se estanca en zonas cercanas a las paredes. Los sólidos caen sobre el canal de flujo vertical formado en la salida, esto provoca que se generen problemas de segregación (Pernich, 2010, p. 3).

1.3.3.2. Tipos de dosificadores de sólidos

Dosificadores volumétricos: En este tipo de equipos la dosis necesaria se calcula midiendo el volumen de material. Los dosificadores de este tipo pueden ser: de válvula alveolar, de disco giratorio, de plato oscilante y de tornillo (Díaz y Lescano, 2012, p. 15).

El más utilizado es el dosificador de tornillo que dispone de una tolva, un vibrador y un tornillo de dosificación. El tornillo de dosificación dispone de un brazo empuja el material a través de un tubo calibrado. Un esquema se presenta en la Figura 1.10 (Cangas y Chaguamate, 2007, p. 29).

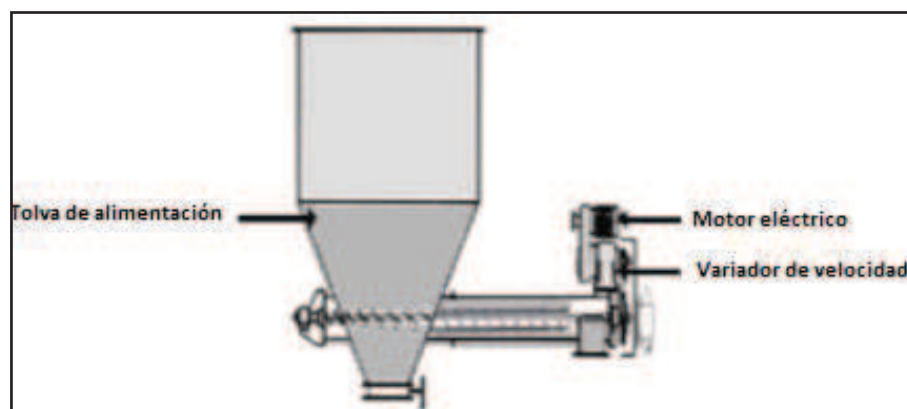


Figura 1.10. Dosificador de tornillo giratorio
(Ortega y Carrillo, 2011, p. 29)

Dosificadores gravimétricos: En estos equipos el peso de la materia prima, permite dosificar la cantidad necesaria del producto deseado. Como ejemplo de este tipo de dosificadores podemos nombrar el de correa transportadora y el de pérdida de peso. En este último el cálculo de material necesario se lo hace por diferencia de pesaje. Un esquema se presenta en la Figura 1.11 (García, 2012, p. 99).

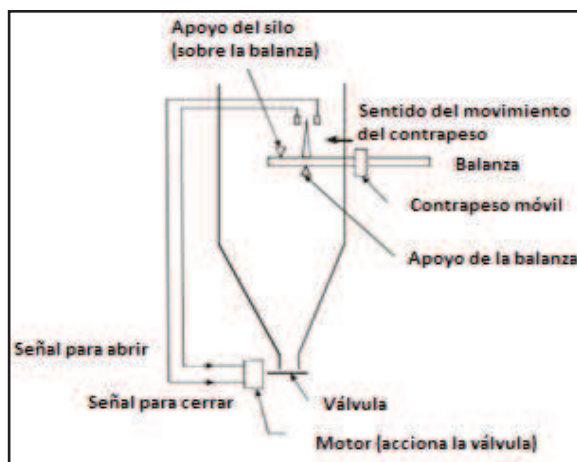


Figura 1.11. Dosificador gravimétrico de pérdida de peso (Canepa, 2011, p. 35)

Dosificador tipo correa transportadora: En este tipo de dosificador el material almacenado cae a una correa transportadora, ésta regula a través de una balanza la cantidad de producto entregado. Un esquema se muestra en la Figura 1.12 (Ortega y Carrillo, 2011, p. 32).

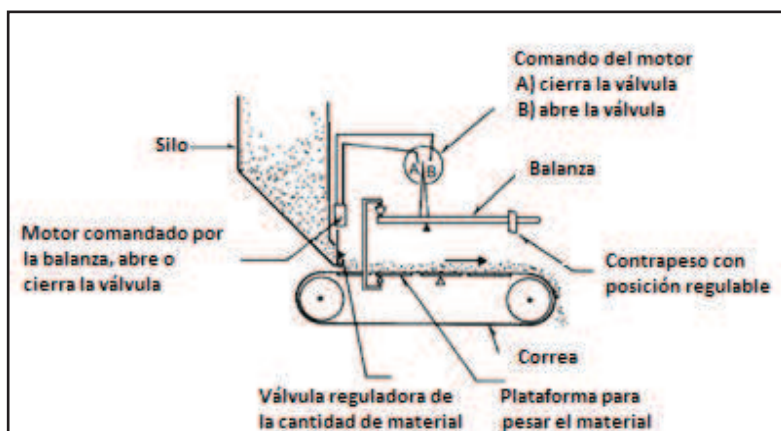


Figura 1.12. Dosificador gravimétrico tipo correa transportadora (Canepa, 2011, p. 33)

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. DEFINICIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS QUE SERÁN UTILIZADAS EN LA ELABORACIÓN DE ESMALTES PORCELÁNICOS PARA RECUBRIR PIEZAS DE ALUMINIO

Las características de la superficies esmaltadas dependen de la composición química, la calidad y naturaleza de las materias primas fuentes de los óxidos, y del ciclo de cocción al que ha sido sometido el esmalte porcelánico.

El esmalte porcelánico compatible con la superficie de aluminio debe cocerse a temperatura de maduración menor que la de fusión del aluminio; por lo que las materias primas que se utilizarán para el desarrollo del presente proyecto se caracterizan por ser materiales fundentes.

2.1.1. PREPARACIÓN DE ESMALTES PORCELÁNICOS

Las pruebas preliminares realizadas consistieron en preparar esmaltes porcelánicos, tomando como base la formulación E-1 que fue estudiada por Gómez (2011). A ésta se la reformuló añadiéndole materias primas fundentes.

2.1.1.1. Formulación del esmalte

Para formular esmaltes porcelánicos opacos con temperatura de maduración menor a 600 °C y compatible con la superficie de aluminio, se tomó como fórmula de referencia el esmalte E-1 y se lo reformuló añadiéndole Li_2O con lo que se obtuvo el esmalte E-2. Se formularon los esmaltes E-1a y E-2a a partir de los esmaltes E-1, E-2 y la adición de NaF. Se formularon 13 esmaltes con varias concentraciones de los óxidos de litio, sodio, boro y NaF.

2.1.1.2. Preparación de las materias primas

Los materiales utilizados fueron:

- Fundas plásticas con cierre hermético
- Espátula de acero
- Mortero y pistilo
- Pincel de cerda # 12
- Tamiz de acero de 20 cm de diámetro, malla # 200 ASTM

En la Tabla 2.1, se presenta las materias primas fuentes de los óxidos formadores del esmalte.

Tabla 2.1. Materias primas fuentes de los óxidos formadores del esmalte

Materias Primas	Fórmula
Ácido Bórico	H_3BO_3
Alúmina, 99 %	Al_2O_3
Bórax	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$
Carbonato de Litio, 99 %	Li_2CO_3
Carbonato de Calcio	$CaCO_3$
Carbonato de Potasio, 99 %	K_2CO_3
Carbonato de Sodio, 99 %	Na_2CO_3
Cuarzo	SiO_2
Fluoruro de Sodio, 99 %	NaF
Zircosil	$ZrO_2 \cdot SiO_2$

Para reducir el tamaño de partícula de cada una de las materias primas a tamaño menor que malla # 200 ASTM, se molieron cada una de las materias primas de forma manual.

En el caso del carbonato de potasio antes y después de la molienda se lo secó a 50 °C por un tiempo de 2 horas, debido a su poder higroscópico. Las materias primas se tamizaron a través de la malla # 200 ASTM y se almacenaron en fundas herméticas de plástico. Las materias primas zircosil, NaF, CaCO₃ y NaF, no necesitaron de molienda.

2.1.1.3. Dosificación de las materias primas

Los materiales y equipo utilizados fueron:

- Fundas plásticas con cierre hermético
- Espátula de acero
- Balanza analítica, ADAM, 120 g, 0,0001 g

Para determinar la cantidad exacta de cada una de las materias primas de acuerdo con la fórmula molecular y con la composición de cada una de ellas, se calculó la cantidad necesaria para obtener 40 g de esmalte; un ejemplo de cálculo se reporta en el Anexo AII. Las materias primas fueron pesadas, se las colocó en una funda plástica y se las mezcló.

2.1.1.4. Fusión de las materias primas y atronado del esmalte

Los materiales y equipo utilizados fueron:

- Fundas plásticas con cierre hermético
- Crisol de material refractario con orificio en la base
- Pinzas
- Guantes
- Mortero con pistilo
- Tamiz # 200 ASTM

- Horno para atronado de vidrio, fabricado de acero y material refractario con un sistema de calentamiento por combustión de gas licuado de petróleo, como se puede ver en la figura 2.1.



Figura 2.1. Horno para fusión y atronado de las materias primas

Para realizar el calentamiento y fusión de las materias primas se colocó la mezcla en un crisol con perforación en la base, se encendió el horno y se colocó el crisol en su interior, hasta que terminó el proceso de atronado del esmalte porcelánico. El esmalte obtenido se lavó con agua destilada, se molió, secó y tamizó a través de tamiz # 200 ASTM.

2.1.2. APLICACIÓN Y COCCIÓN DEL ESMALTE

Preparación de las piezas de aluminio: El objetivo de este paso es obtener piezas limpias de óxidos y grasas.

Los materiales y equipo utilizados fueron:

- Lámina de aluminio 1100
- Agua destilada
- Detergente
- Estufa, MEMMERT, 220 °C

Se cortaron las piezas de aluminio 1100 de 3x3 cm. Una vez cortadas se lavaron con detergente y agua corriente, se secaron con una franela y se las colocó en la estufa a 100 °C por 5 min.

Aplicación del esmalte: El objetivo de este proceso es obtener piezas de aluminio recubiertas con esmalte porcelánico.

Los materiales y equipos utilizados fueron:

- Base refractaria para colocar las placas de aluminio
- Láminas de aluminio 1100
- Tamiz ASTM # 200 y pincel de cerda # 12
- Balanza analítica, ADAM, 120 g, 0,0001 g
- Horno, WISE THERM

Para obtener piezas de aluminio recubiertas con esmalte porcelánico, se pesaron 0,70 gramos de esmalte y se espolvoreó con la ayuda del tamiz y del pincel, tratando de hacerlo de manera uniforme. Las piezas se colocaron sobre la base refractaria y se las introdujo dentro del horno programable, las piezas se cocieron a través del ciclo que se presenta en la Figura 2.2.

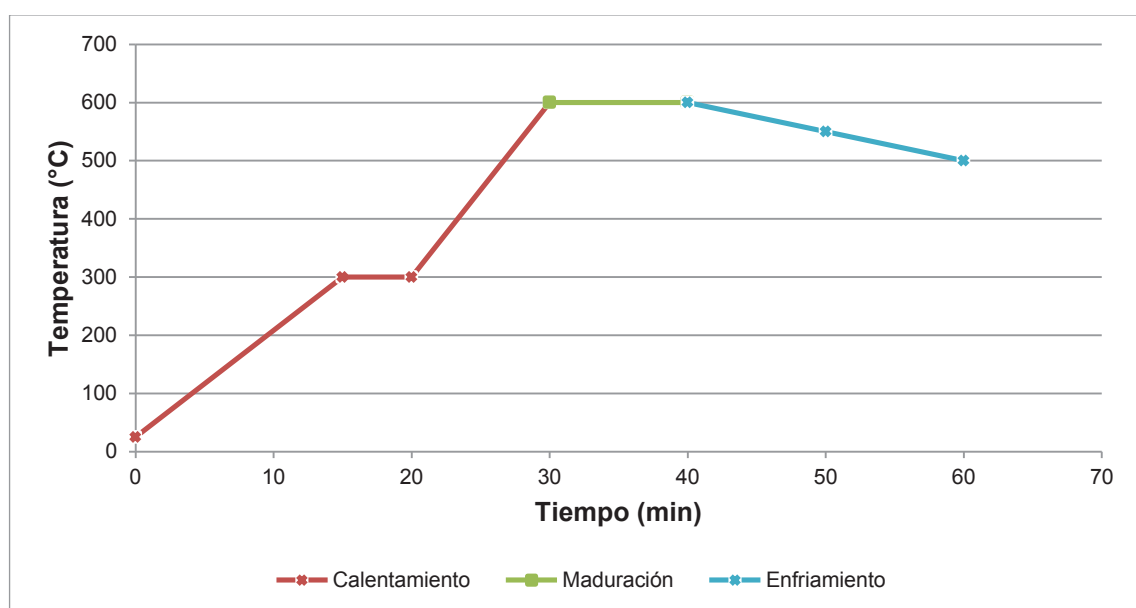


Figura 2.2. Ciclo de cocción aplicado a los esmaltes elaborados

Las placas obtenidas se evaluaron a través de parámetros tales como: área recubierta y área fundida.

2.2. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA RELACIÓN $\frac{B_2O_3}{Li_2O}$ EN LA FUSIÓN DE LA MEZCLA DE MATERIAS PRIMAS SELECCIONADAS

Se prepararon 5 mezclas vitrificables con las materias primas previamente seleccionadas, con diferentes cantidades en moles, de los óxidos de boro y de litio de tal manera que la relación de $\frac{B_2O_3}{Li_2O}$ se encuentre entre 4,34 y 1,52, y se evaluó cualitativamente la formación de fase vítrea a diferentes temperaturas.

2.2.1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS CON DIFERENTE RELACIÓN $\frac{B_2O_3}{Li_2O}$

Los materiales y equipos utilizados fueron:

- Matriz para obtener pastillas
- Se utilizaron las materias primas seleccionadas en 2.1.1.2.
- Balanza analítica, ADAM, 120 g, 0,0001 g
- Prensa hidráulica CARVER LABORATORY

Para preparar mezclas vitrificables con relaciones $\frac{B_2O_3}{Li_2O}$ de 1,52, 2,22, 2,92, 3,62 y 4,34; se formularon las mezclas vitrificables y se dosificaron las materias primas. Se pesó 0,70 g de mezcla de cada composición y se la depositó dentro de la matriz como se muestra en la Figura 2.3 y se obtuvo las muestras en forma de pastillas de 1 cm de diámetro y 0,30 mm de espesor, mediante la aplicación de 5000 psi.

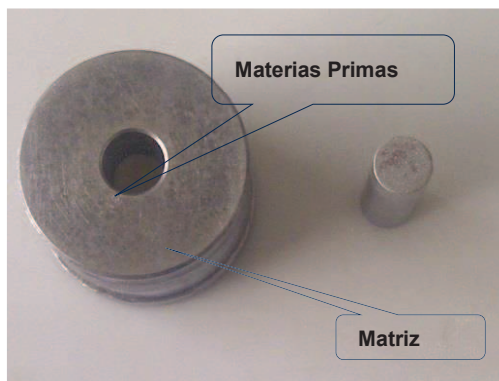


Figura 2.3. Matriz con la mezcla de materias primas

2.2.2. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS MUESTRAS

Los materiales y equipo utilizados fueron:

- Placas de cerámica
- Horno, WISE THERM

Para determinar el efecto del tratamiento térmico a diferentes temperaturas sobre la formación de la fase vítrea, las pastillas elaboradas fueron colocadas en las placas de cerámica y se las depositó en el horno, se sometieron a 5 ciclos de calentamiento que se presentan en las Tablas 2.2 y 2.3 y en las Figuras 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8.

Tabla 2.2. Ciclos de cocción 1 y 2 aplicados a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5

Etapa	Ciclo de Cocción –1		Ciclo de Cocción –2	
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	Ta*-300	15	Ta*-300	15
	300-300	5	300-300	5
	300-500	10	300-550	12
Maduración	500-500	10	550-550	10
Enfriamiento	500-Ta	~ 720	550-Ta	~ 720

Tabla 2.3. Ciclos de cocción 3, 4 y 5 aplicados a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5

Etapa	Ciclo de Cocción –3		Ciclo de Cocción –4		Ciclo de Cocción –5	
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	Ta*-300	15	Ta*-300	Ta*-300	Ta*-300	15
	300-300	5	300-300	300-300	300-300	5
	300-600	14	300-700	300-700	300-700	19
Maduración	600-600	10	700-700	700-700	700-700	10
Enfriamiento	600-Ta	~ 720	700-Ta	700-Ta	700-Ta	~ 720

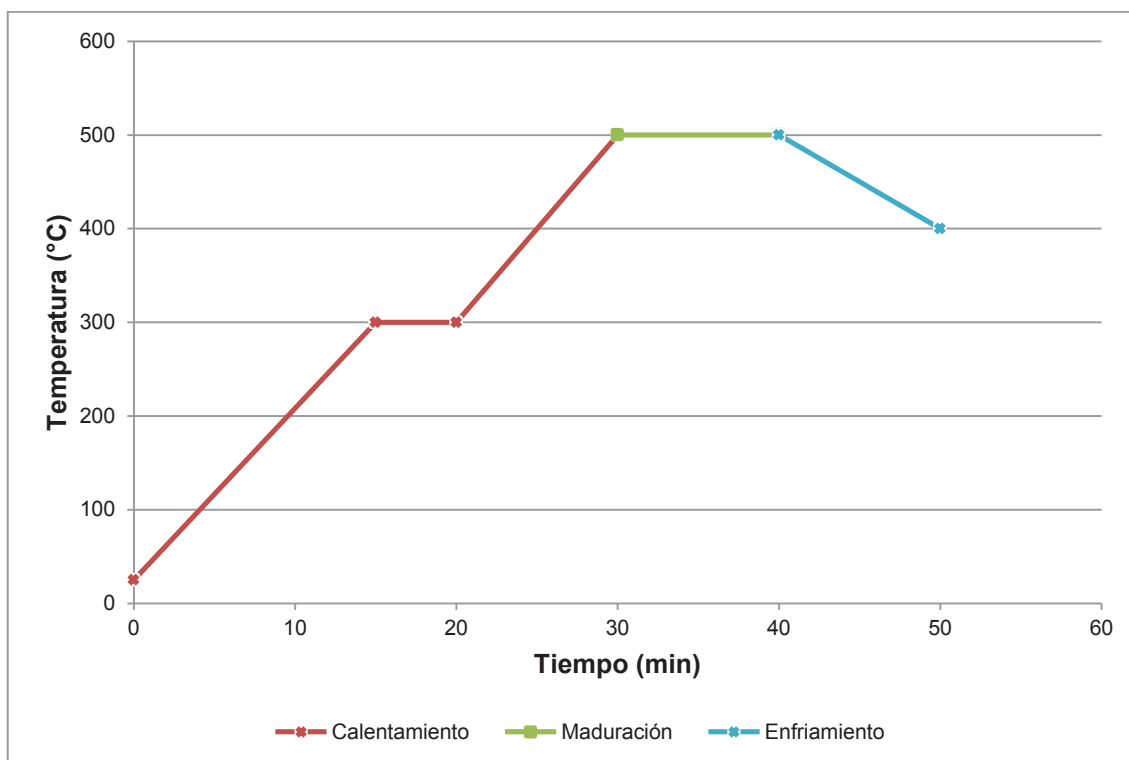


Figura 2.4. Ciclo de cocción 1 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5

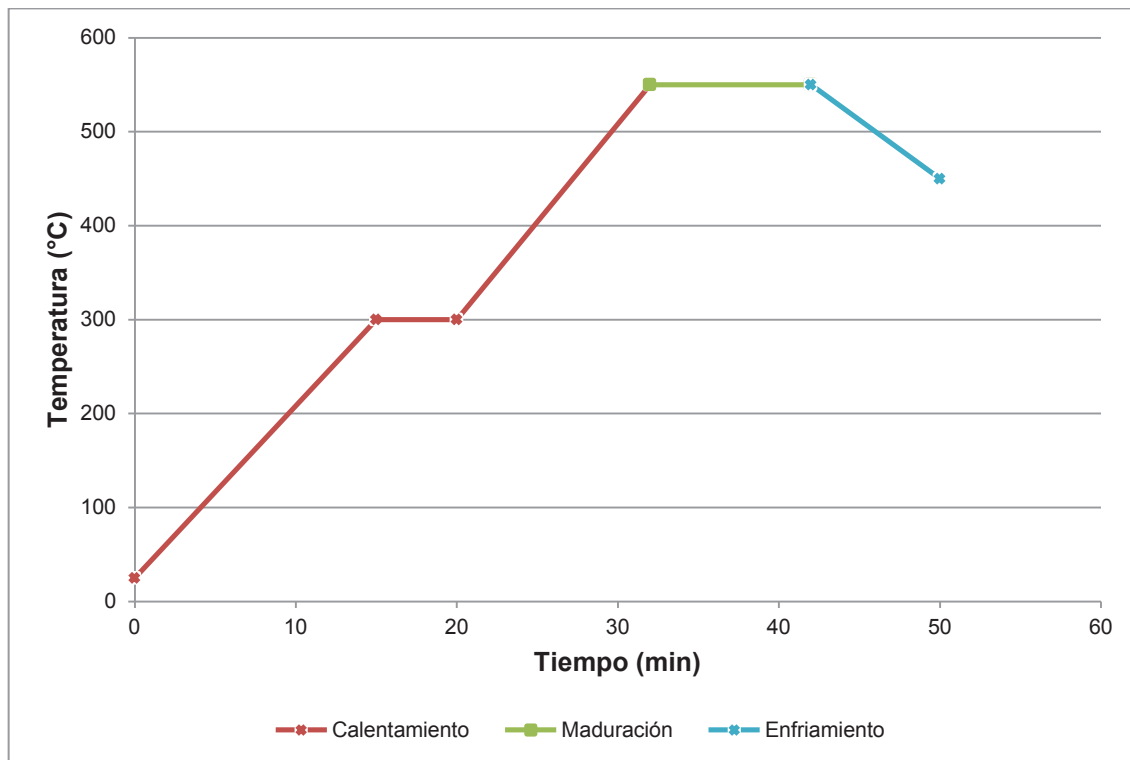


Figura 2.5. Ciclo de cocción 2 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5

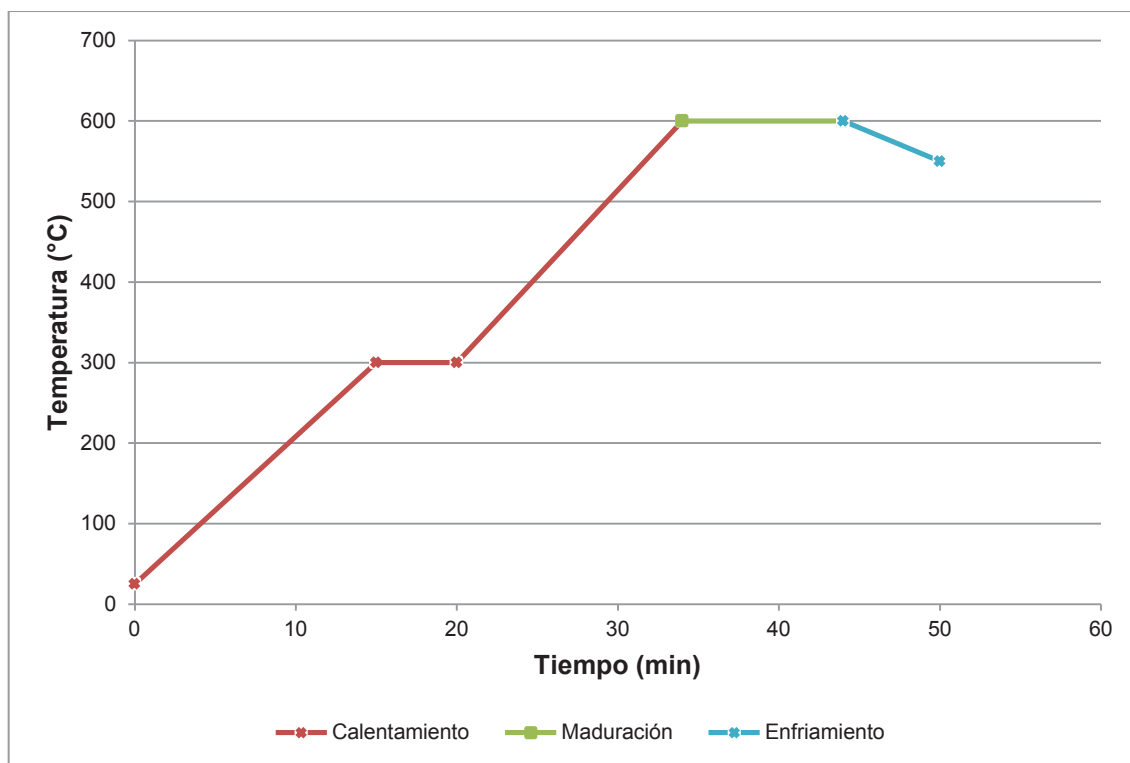


Figura 2.6. Ciclo de cocción 3 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5

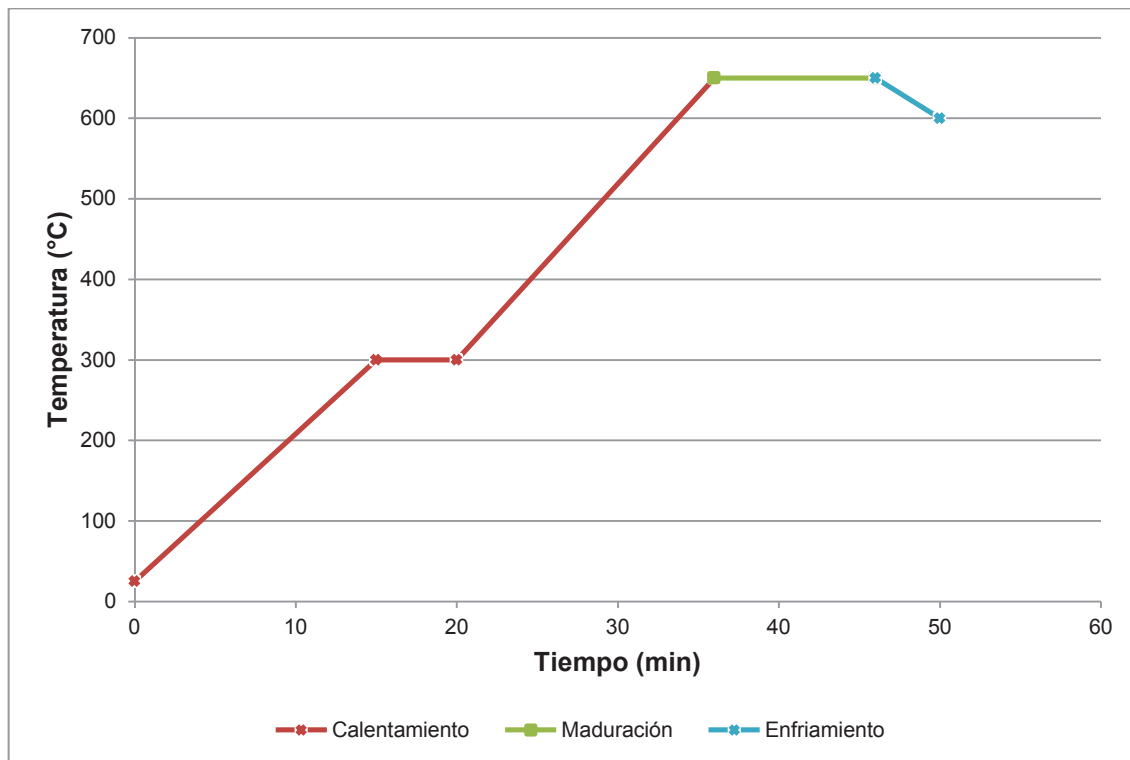


Figura 2.7. Ciclo de cocción 4 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5

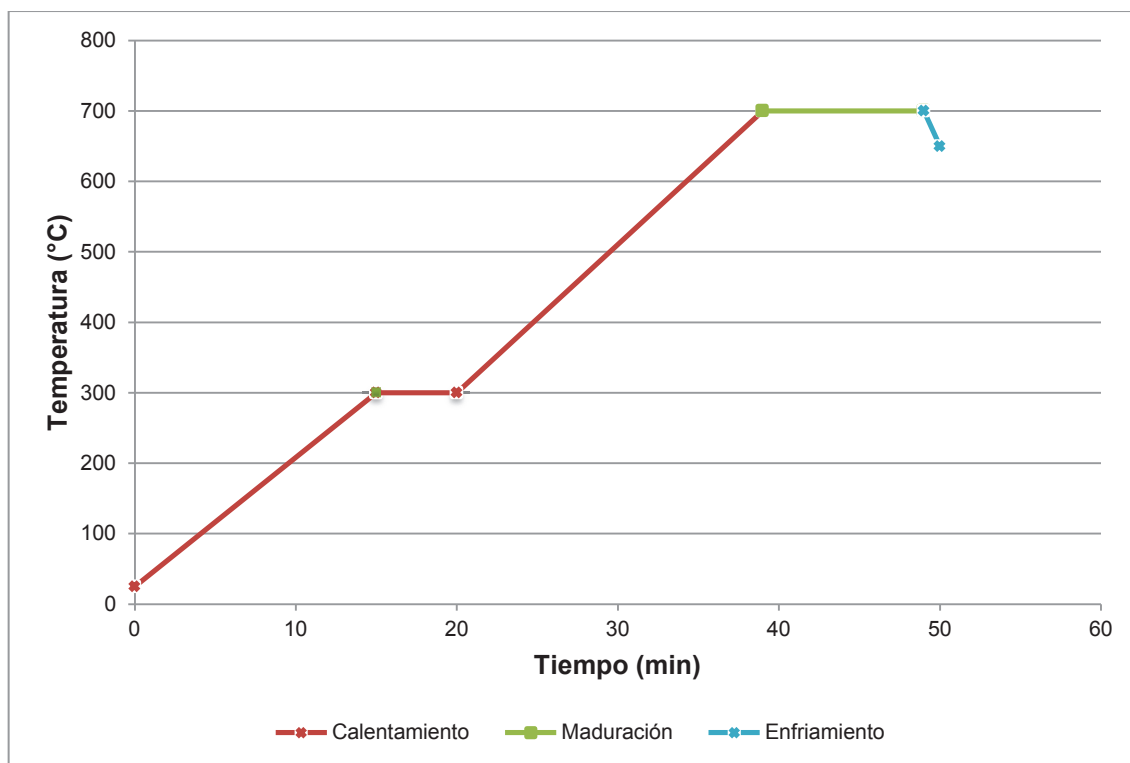


Figura 2.8. Ciclo de cocción 5 aplicado a las muestras EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5

2.2.3. DETERMINACIÓN DE LA FORMACIÓN DE LA FASE VÍTREA

Los materiales y equipo utilizados fueron:

- Lija # 200
- Microscopio Petrográfico, ZEISS

El microscopio petrográfico o de polarización es un instrumento de alta precisión que permite la visualización de minerales y texturas que no son visibles a simple vista.

Para determinar el porcentaje de fase vítrea de cada pastilla se prepararon las muestras fundidas, para lo cual se lijó la superficie tratando de que el área observada sea uniforme y se observó y fotografió cada una de las muestras tratadas térmicamente a través de un microscopio petrográfico con un aumento de 2,5 X. El porcentaje de fase vítrea de cada una de las placas se determinó, con la ayuda del programa AUTOCAD 2008.

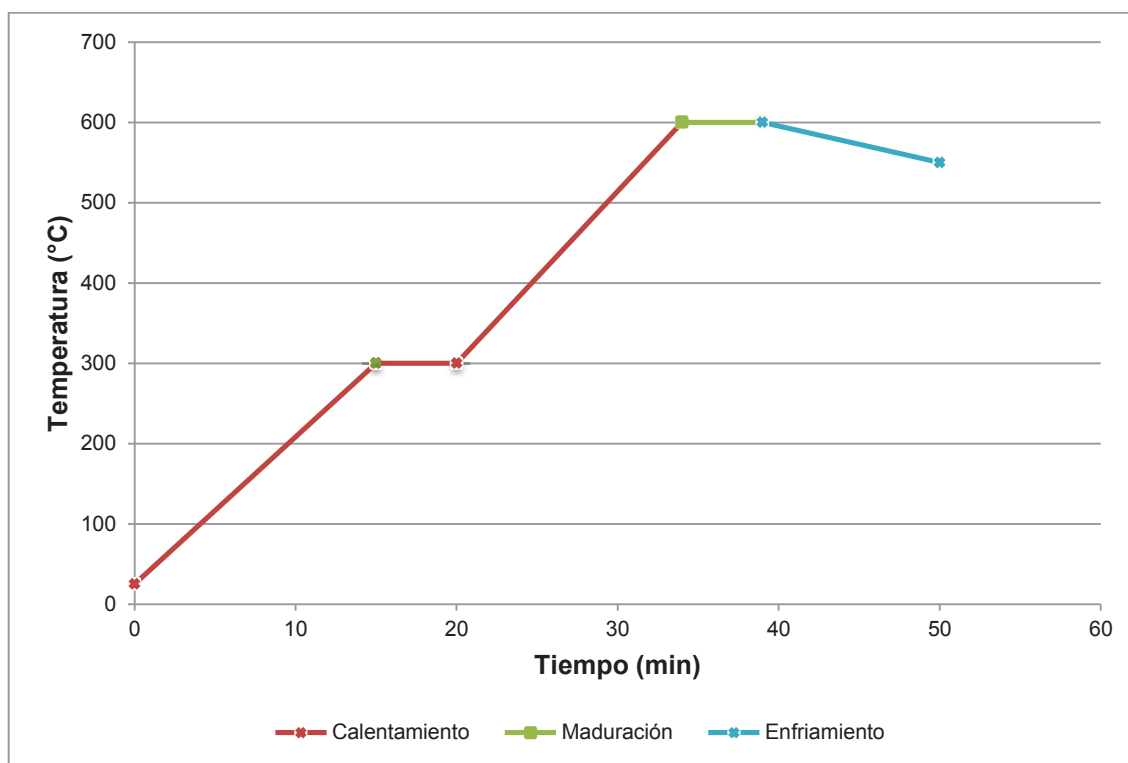
2.3. FORMULACIÓN DE UN ESMALTE PORCELÁNICO PARA RECUBRIR PIEZAS DE ALUMINIO

Para formular esmaltes porcelánicos con las mezclas vitrificables que mayor fase vítrea presentaron se formularon, fundieron y aplicaron 7 esmaltes de la forma ya descrita en las secciones 2.1.1.2, 2.1.1.3, 2.1.1.4 y 2.1.2 y se evaluó la calidad de las superficies logradas determinando área recubierta, homogeneidad, brillo y presencia de defectos.

Se aplicaron dos ciclos de cocción a los esmaltes EF-5d y EF-5e. Los ciclos se presentan en la Tabla 2.4 y en las Figuras 2.9 y 2.10.

Tabla 2.4. Ciclos de cocción A y B aplicados a los esmaltes EF-5d y EF-5e

Etapa	Ciclo de Cocción –A		Ciclo de Cocción –B	
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	Ta*-300	15	Ta*-300	15
	300-300	5	300-300	5
	300-600	14	300-600	14
Maduración	600-600	5	600-600	15
Enfriamiento	600-Ta	~ 720	600-Ta	~ 720

**Figura 2.9.** Ciclo de cocción A aplicado a los esmaltes EF-5d y EF-5e

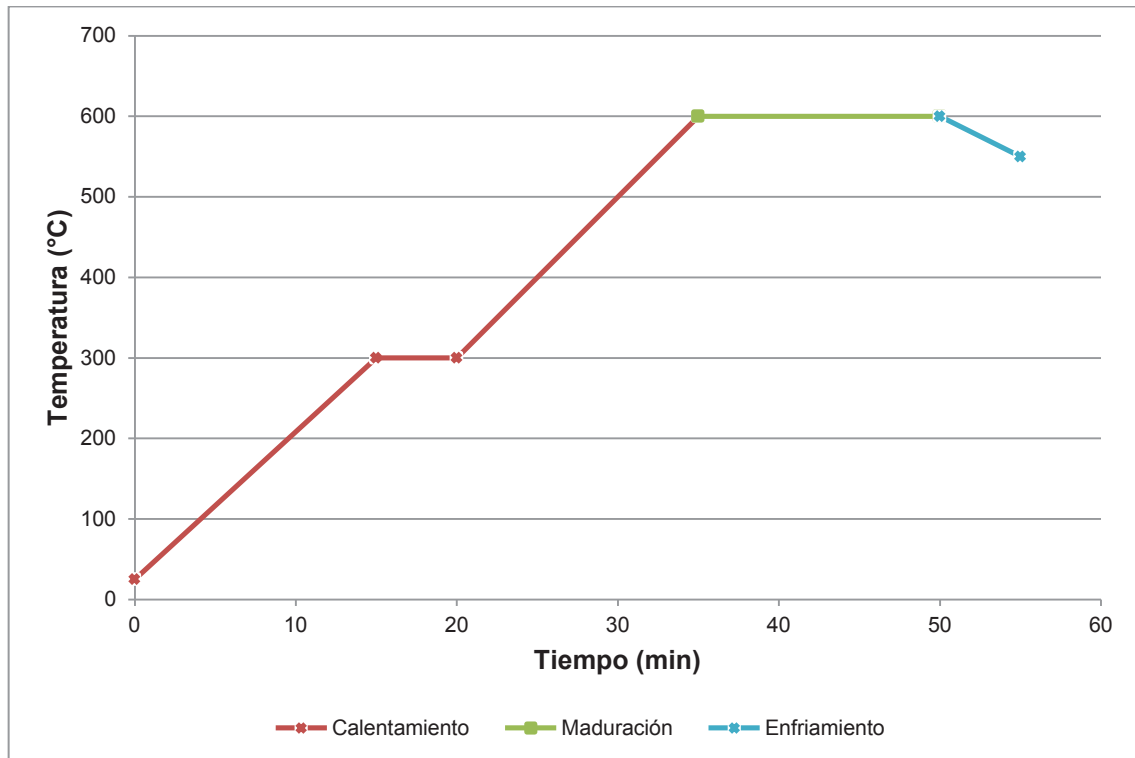


Figura 2.10. Ciclo de cocción B aplicado a los esmaltes EF-5d y EF-5e

2.4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE DOSIFICACIÓN Y MEZCLA DE MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA ELABORACIÓN DE ESMALTES PORCELÁNICOS

2.4.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Para determinar las dimensiones de las tolvas de dosificación para cada una de las materias primas, se realizó el siguiente procedimiento:

- Se consideró el procesamiento de 15 kg/h de mezcla total de materias primas.
- Se tomó de referencia una mezcla vitrificable compuesta por 10 materias primas.
- Para el dimensionamiento de todas las tolvas se tomó como base la materia prima que entra en mayor porcentaje en la mezcla total, que para este caso es el bórax.
- Para el procesamiento de 15 kg/h de mezcla se requiere de 7 kg/h de bórax.

- Se realizaron dos cargas de 3,50 kg de bórax cada media hora con un tiempo óptimo de mezcla de 30 minutos.
- Se consideraron aspectos tales como:
 - a) Carga para el diseño de las tolvas igual a 4 kg.
 - b) Tipo de geometría: se eligió la forma cónica.
 - c) Se tomó como densidad aparente de las materias primas la del cemento cuyo valor es de 1,10 kg/L, porque sus características son semejantes al promedio de las materias primas.
- Se determinó el ángulo medio θ_c de la tolva, para lo cual se estableció el ángulo de fricción de pared, utilizando la Tabla AIII.1, que se presenta en el Anexo AIII.
- Se obtuvo el ángulo medio de tolva para geometría cónica a partir de la Figura AIII.1 que se presenta en el Anexo AIII.
- Se calculó el volumen total requerido a partir de la ecuación [2.1].

$$V_{\text{tot}} = \frac{m_{\text{tot}}}{\delta_a} \quad [2.1]$$

Donde:

V_{tot} : volumen total requerido

δ_a : densidad aparente

m_{tot} : masa total

- Se asume un diámetro de boquilla de 0,03 m y una altura de 0,02 m.
- El diámetro mayor de la tolva se determinó mediante la herramienta matemática: Análisis Si, Buscar Objetivo (Microsoft Excel 2010).
- El diseño del tanque de almacenamiento y descarga se lo realizó de manera similar al dimensionamiento de las tolvas de dosificación de las materias primas.
- Se dimensionó mecanismos complementarios, para el funcionamiento integral del sistema.

2.4.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE MEZCLADO

Para determinar las dimensiones del mezclador para los 7,50 kg de mezcla de materias primas se realizó el procedimiento que se detalla a continuación:

- Se consideraron aspectos tales como:
 - a) Carga de mezcla igual a 7,50 kg (realizando dos cargas cada media hora)
 - b) Se tomó como referencia un porcentaje de llenado para el mezclador tipo V de 60 % (McCabe et al., 2002, p. 1032-1033).
 - c) Se tomó como densidad aparente de las materias primas la del cemento, cuyo valor es de 1,10 kg/L.
 - d) Se tomó un ángulo de 70° que corresponde al formado por los ejes de los cilindros laterales del mezclador tipo “V”.
- Se calculó la carga total del mezclador aplicando la ecuación [2.2].

$$W_{tM} = \frac{W_M}{f_{LL}} \quad [2.2]$$

$$V_{tM} = \frac{W_{tM}}{\delta_a} \quad [2.3]$$

Donde:

W_{tM} : Carga total

W_M : Carga a mezclar

f_{LL} : Porcentaje de llenado

V_{tM} : Volumen total

δ_a : densidad aparente

- Se dividió el mezclador en 3 partes y se calculó el volumen total requerido a partir de la ecuación [2.3].
- Se consideró que el $V_{R1} = V_{R2} = 40\%$ y que $V_{R3} = 20\%$ del total del mezclador.

- Se calcularon los semiejes de la elipse mediante la herramienta matemática: Análisis Si, Buscar Objetivo (Microsoft Excel 2010).
- Se calculó el centro de gravedad del mezclador con un programa de Inventor Autodesk, para posicionar el eje de rotación.
- Se calculó la potencia del motor del mezclador con la relación teórica entre el consumo de energía y la cantidad de carga ($\frac{5 \text{ kW}}{1000 \text{ kg}}$) (Morataya, 1997, p. 37).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DEFINICIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS QUE SERÁN UTILIZADAS EN LA ELABORACIÓN DE ESMALTES PORCELÁNICOS PARA RECUBRIR PIEZAS DE ALUMINIO

Se realizaron pruebas preliminares para determinar el efecto de los óxidos fundentes sobre la temperatura de fusión de la mezcla vitrificable.

3.1.1. INFLUENCIA DEL ÓXIDO DE LITIO EN LA DISMINUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE FUSIÓN DE LOS ESMALTES E-1 y E-2


La fórmula molecular del esmalte E-1 se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Fórmula molecular del esmalte E-1

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,37	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,69
K ₂ O	0,08			B ₂ O ₃	1,11
MgO	0,05				
ZrO ₂	0,32				
CaO	0,18				
Li ₂ O	0				

El resultado del esmaltado con E-1, a la temperatura de maduración de 600 °C y con tiempo de maduración de 10 min tomado con una cámara se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Superficie lograda con el esmalte E-1
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
E-1		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 0 % ❖ El esmalte no funde.

Se puede observar en la Tabla 3.2, que el esmalte E-1 no ha alcanzado la temperatura de maduración, no logra el desarrollo de la fase vítrea y que se requiere el uso de una mayor cantidad de óxidos fundentes.


A la formulación E-1 se reemplazó el 30 % del Na_2O por Li_2O , obteniendo el esmalte E-2.

La fórmula molecular y los resultados del esmaltado con E-2, se presentan en las Tablas 3.3 y 3.4, respectivamente.

Tabla 3.3. Fórmula molecular del esmalte E-2

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,26	Al_2O_3	0,046	SiO_2	1,69
K_2O	0,08			B_2O_3	0,8
MgO	0,05				
ZrO_2	0,32				
CaO	0,18				
Li_2O	0,11				

Tabla 3.4. Superficie lograda con el esmalte E-2
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
E-2		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 0 %. ❖ El esmalte no funde.

Al evaluar la superficie obtenida, se observa que no se logró mejorar su calidad, a pesar que se adicionó 0,11 moles de Li_2O a la fórmula. El esmalte no funde, no existe adherencia y se observa un pandeo en la placa.

Se reformularon los esmaltes E-1 y E-2 con la adición de 0,10 g de NaF que corresponde a un 12,50 % del peso del esmalte. Se obtuvo los esmaltes E-1a y E-2a. Los resultados de las superficies obtenidas se presentan en las Tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5. Superficie lograda con el esmalte E-1a
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

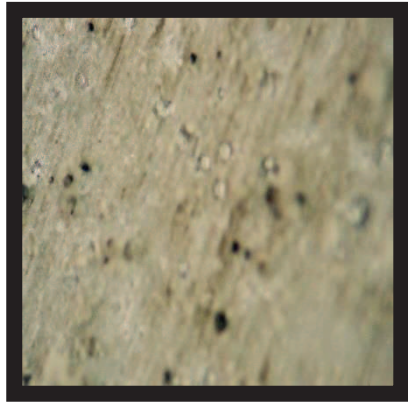
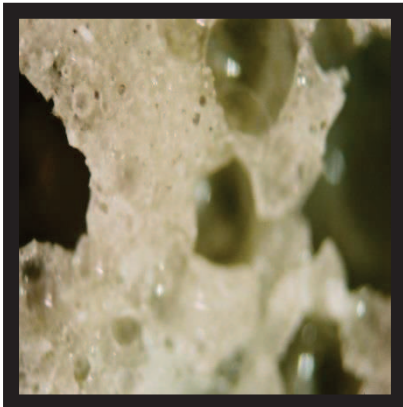
ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
E-1a		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Pequeñas áreas vítreas.

Tabla 3.6. Superficie lograda con el esmalte E-2a
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
E-2a		❖ Pequeñas áreas vítreas.

La fotografía que se observa en la Tabla 3.5, fue tomada con microscopio petrográfico, muestra que la adición del NaF en el esmalte E-1, provoca la aparición de pequeñas áreas vítreas, que se ven como gotas de líquido.

Al comparar las fotografías de los esmaltes E-1a y E-2a se ve que el esmalte que contiene Li_2O , al añadir NaF, presenta mayor cantidad de fase vítrea, debido probablemente a la parcial formación de alguna solución con temperatura mínima de fusión. Los resultados muestran su importante influencia en la formación de fase vítrea.

A partir de estos resultados se concluye que un esmalte con baja temperatura de maduración debe incluir, en su composición química, Li_2O y NaF.

3.1.2. INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE ÓXIDOS FUNDENTES EN LA TEMPERATURA DE MADURACIÓN DEL ESMALTE

Se formularon esmaltes porcelánicos con distintas relaciones entre los óxidos fundentes.

3.1.2.1. Formulación de esmaltes con óxidos de: sodio, litio y fluoruro de sodio

Se formularon 6 esmaltes en los que se fue cambiando la cantidad en moles de Na_2O . Se consideró que por cada mol de NaF se formará 0,50 moles de Na_2O .

En las fórmulas moleculares que se presentan, a la cantidad en moles de Na_2O se le ha restado la cantidad en moles que serán aportadas por el NaF .


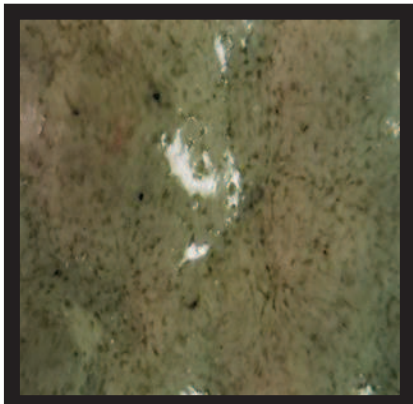
Las fórmulas moleculares y las correspondientes superficies logradas para los esmaltes E-A hasta E-F se presenta en las Tablas 3.7 a la 3.18.

Tabla 3.7. Fórmula molecular del esmalte E-A

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,29	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,69
K_2O	0,10			B_2O_3	0,80
ZrO_2	0,18				
CaO	0,10				
Li_2O	0,22				
NaF	0,22				

Tabla 3.8. Superficie lograda con el esmalte E-A

$T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-A		



Como se puede ver en la Tabla 3.8, los resultados logrados con el esmalte E-A indican que con una cantidad de 0,22 moles de Li_2O y la misma cantidad de NaF, el esmalte logra fundir en la placa de aluminio, existen áreas vitrificadas y se observa la presencia de burbujas.

En el esmalte E-B se incrementa la cantidad en moles del ZrO_2 de 0,18 a 0,26 y del CaO de 0,10 a 0,14 pero se mantiene la relación de 0,56 entre ellos como en el esmalte E-1. La fórmula molecular y los resultados del esmaltado con E-B, se presentan en las Tablas 3.9 y 3.10.

Tabla 3.9. Fórmula molecular del esmalte E-B

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,43	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,69
K_2O	0,10			B_2O_3	0,80
ZrO_2	0,26				
CaO	0,14				
Li_2O	0,05				
NaF	0,05				

Tabla 3.10. Superficie lograda con el esmalte E-B
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-B		


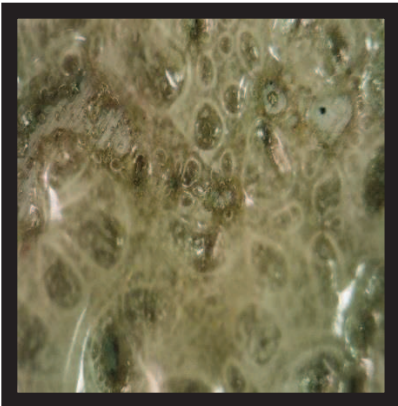
La disminución en la cantidad de moles de óxido de litio y fluoruro de sodio en la fórmula molecular, como nos muestran los resultados de la Tabla 3.10, con el esmalte E-B, provoca una falta de fusión del esmalte, no se observan áreas vitrificadas.

El esmalte E-C se lo formuló con mayor contenido de Li_2O al igual que de NaF . La fórmula molecular y los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 3.11 y 3.12.

Tabla 3.11. Fórmula molecular del esmalte E-C

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,35	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,69
K_2O	0,10			B_2O_3	0,80
ZrO_2	0,26				
CaO	0,14				
Li_2O	0,10				
NaF	0,10				

Tabla 3.12. Superficie lograda con el esmalte E-C
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-C		

El incremento en la cantidad de moles de Li_2O y NaF y la consecuente disminución de Na_2O en la fórmula molecular, como nos muestran los resultados en la Tabla 3.12, con el esmalte E-C, provoca la presencia de área vitrificada.



De acuerdo con los resultados se decide cambiar la cantidad de los óxidos de litio, sodio y fluoruro de sodio para mejorar la fusión.

La fórmula molecular y los resultados del esmaltado con E-D, se presentan en las Tablas 3.13 y 3.14.

Tabla 3.13. Fórmula molecular del esmalte E-D

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,28	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,85
K_2O	0,10			B_2O_3	0,80
ZrO_2	0,26				
CaO	0,14				
Li_2O	0,15				
NaF	0,15				

Tabla 3.14. Superficie lograda con el esmalte E-D
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-D		

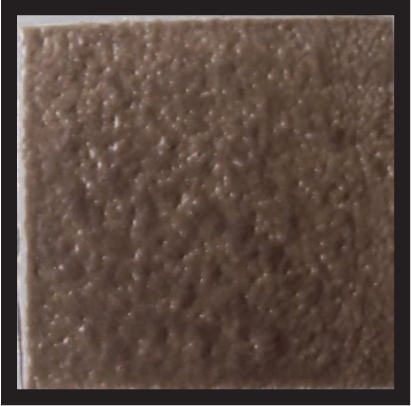
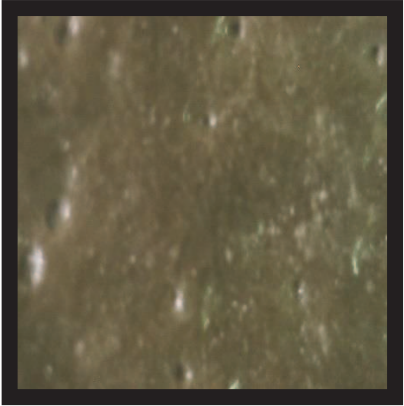
Las fotografías de la Tabla 3.14, muestran que el esmalte E-D no alcanza a fundir a pesar que el contenido en moles de óxido de litio se encuentra entre los valores del esmalte E-A y E-C. Al observar con microscopio petrográfico no se observa áreas vitrificadas en toda la placa y se nota un leve pandeo de esta.

En el esmalte E-E se decide incrementar la cantidad en moles del Li_2O de 0,15 a 0,25 y de NaF de 0,15 a 0,25, para evaluar su influencia en la temperatura de fusión del esmalte. La fórmula molecular y los resultados del esmaltado con E-E, se presentan en las Tablas 3.15 y 3.16.

Tabla 3.15. Fórmula molecular del esmalte E-E

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,13	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,85
K_2O	0,10			B_2O_3	0,80
ZrO_2	0,26				
CaO	0,14				
Li_2O	0,25				
NaF	0,25				

Tabla 3.16. Superficie lograda con el esmalte E-E
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-E		

La superficie lograda con el esmalte E-E, en cuya fórmula molecular se encuentra 0,25 moles de Li_2O , presenta muchas zonas con fase vítrea brillante con presencia de burbujas y fisuras.


Lo más destacable del resultado es que la capa de esmalte no se desprende fácilmente de la pieza de aluminio.

El esmalte E-F se lo formuló con mayor contenido de Li_2O al igual que de NaF . La fórmula molecular y los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 3.17 y 3.18.

Tabla 3.17. Fórmula molecular del esmalte E-F

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,01	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,85
K_2O	0,10			B_2O_3	0,80
ZrO_2	0,26				
CaO	0,14				
Li_2O	0,33				
NaF	0,33				

Tabla 3.18. Superficie lograda con el esmalte E-F
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-F		

De las fotografías que se presentan en la Tabla 3.18, se ve que el esmalte E-F no funde, no existe adherencia y se nota un pandeo en la placa. Se atribuye a que la cantidad en moles de Na_2O ha disminuido notablemente en comparación con los esmaltes E-A y E-C.

En el esmalte E-F la cantidad en moles de Li_2O y NaF es mayor que en los esmaltes E-A, E-B, E-C y E-D elaborados; sin embargo, no se visualiza formación de fase vítrea. Se atribuye a que existe un rango en el cual la relación entre estas sustancias actúa de forma positiva en la temperatura de fusión del esmalte.

En la Tabla 3.19, se resume la cantidad en moles de cada uno de los óxidos utilizados en la elaboración de los esmaltes E-A hasta E-F.

Tabla 3.19. Esmaltes porcelánicos formulados con variaciones del Na_2O , Li_2O y NaF

Esmaltes Formulados	Moles de Li_2O	Moles de NaF	Relación $\text{Li}_2\text{O}/\text{NaF}$
E-A	0,22	0,22	1:1
E-B	0,05	0,05	1:1
E-C	0,10	0,10	1:1
E-D	0,15	0,15	1:1
E-E	0,25	0,25	1:1
E-F	0,33	0,33	1:1

Una mayor cantidad de fluoruro de sodio provoca el apareamiento de burbujas en el seno del esmalte y la falta de adherencia entre el esmalte y la placa de aluminio. El aumento de Li_2O ayuda a disminuir la temperatura de fusión del esmalte, pero dentro de un rango estrecho en la concentración debido a que se encuentra cercano algún eutéctico.

Se concluye que los mejores resultados se obtienen en el esmalte E-E, por lo que se decide formular esmaltes manteniendo constante las moles de Na_2O y variar el Li_2O y el NaF .

3.1.2.2. Formulación de esmaltes con diferentes concentraciones de óxido de litio y fluoruro de sodio

La fórmula molecular y la correspondiente superficie lograda para el esmalte E-G se presentan en las Tablas 3.20 y 3.21.

Tabla 3.20. Fórmula molecular del esmalte E-G

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,23	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,10			B ₂ O ₃	0,80
ZrO ₂	0,26				
CaO	0,14				
Li ₂ O	0,25				
NaF	0,05				

Tabla 3.21. Superficie lograda con el esmalte E-G
T_m= 600 °C, t_m=10 min

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-G		

Como se puede ver en las fotografías de la Tabla 3.21, el esmalte E-G no funde. El resultado se atribuye a la disminución en la cantidad de moles de NaF, por lo que se concluye en que existe un punto de equilibrio en el cual la relación entre el


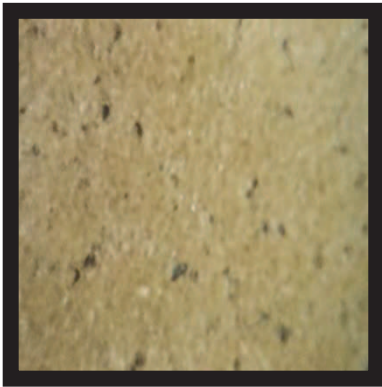
Li_2O y el NaF influyen positivamente en la disminución de la temperatura de maduración necesaria para que funda el esmalte y se logre obtener fase vítrea.

En el esmalte E-H se incrementa el número de moles de NaF de 0,05 a 0,17. La fórmula molecular y los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 3.22 y 3.23.

Tabla 3.22. Fórmula molecular del esmalte E-H

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,17	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,85
K_2O	0,10			B_2O_3	0,80
ZrO_2	0,26				
CaO	0,14				
Li_2O	0,25				
NaF	0,17				

Tabla 3.23. Superficie lograda con el esmalte E-H
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-H		

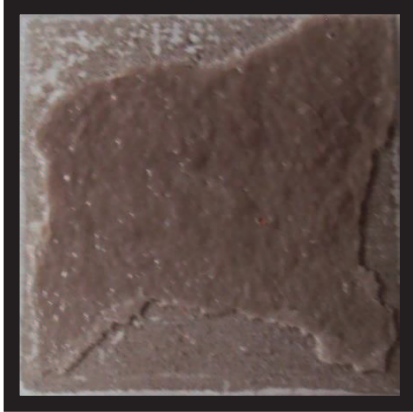
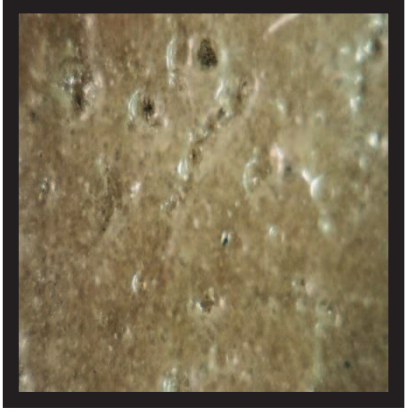
La fotografía sin aumento que se presenta en la Tabla 3.23, muestra que el esmalte E-H no funde, sin embargo, la fotografía con microscopio petrográfico se observan pequeños puntos brillantes, que corresponde a minúsculas áreas que han logrado vitrificar. El esmalte no se adhiere a la placa, pero, forma una lámina

sobre esta, que no se rompe con facilidad.

Tabla 3.24. Fórmula molecular del esmalte E-I

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,25	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,10			B ₂ O ₃	0,80
ZrO ₂	0,07				
CaO	0,04				
Li ₂ O	0,54				
NaF	0,27				

Tabla 3.25. Superficie lograda con el esmalte E-I
T_m= 600 °C, t_m=10 min

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-I		

En el esmalte E-I para incrementar la cantidad de óxido de litio se disminuyó la cantidad de los óxidos de calcio de 0,14 a 0,04, y de circonio de 0,26 a 0,07, pero se mantiene la relación de 0,56 entre ellos.

La superficie esmaltada con el E-I que se muestra en la Tabla 3.25, presenta brillo, no se notan espacios sin esmalte; la placa se muestra pandeada, la adherencia no es buena y se observan burbujas en menor cantidad que en los esmaltes E-A y E-C.

En la Tabla 3.26, se resume la cantidad en moles de cada uno de los óxidos utilizados en la elaboración de los esmaltes E-G, E-H y E-I.

Tabla 3.26. Esmaltes porcelánicos formulados con variaciones del Li_2O y NaF

Esmaltes Formulados	Moles de Li_2O	Moles de NaF	Relación $\text{Li}_2\text{O}/\text{NaF}$
E-G	0,25	0,05	0,50
E-H	0,25	0,17	1,50
E-I	0,54	0,27	2,00

Debido a los resultados obtenidos se decide mantener constantes las cantidades en moles de Na_2O , K_2O , ZrO_2 y CaO del esmalte E-I, y variar la cantidad de los óxidos litio y de boro, para estudiar su efecto sobre la temperatura de maduración.


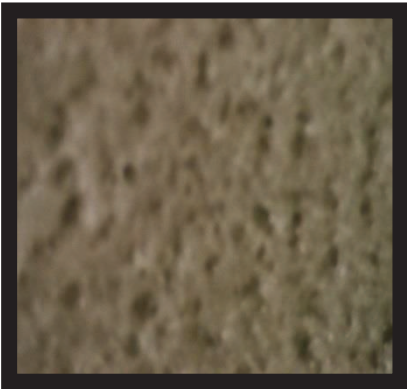
Además, se mantiene el NaF en 0,20 moles, esto se debe a que con los esmalte E-E que contenía 0,25 moles de NaF y el esmalte E-I cuyo contenido en moles de NaF es 0,27, se obtuvieron los mejores resultados, pero se pueden observar pequeñas burbujas, con esta disminución en el contenido de NaF se desea eliminar este defecto.

La fórmula molecular y los resultados obtenidos para el esmalte E-I-a se presentan en las Tablas 3.27 y 3.28.

Tabla 3.27. Fórmula molecular del esmalte E-I-a

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,15	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,85
K_2O	0,10			B_2O_3	0,38
ZrO_2	0,07				
CaO	0,04				
Li_2O	0,54				

Tabla 3.28. Superficie lograda con el esmalte E-Ia
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E-Ia		

Como se puede ver en las fotografías de la Tabla 3.28, el esmalte E-Ia que contiene 0,38 moles de B_2O_3 no funde a pesar que se mantiene el valor de 0,54 moles de Li_2O del esmalte E-I, que sí presenta área vítrea. Los resultados pueden atribuirse al bajo contenido de B_2O_3 del esmalte E-Ia.

En el esmalte E-Ib se decide incrementa el número de moles de B_2O_3 de 0,38 a 0,54. La fórmula molecular y los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 3.29 y 3.30.

Tabla 3.29. Fórmula molecular del esmalte E-Ib

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,15	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,85
K_2O	0,10			B_2O_3	0,54
ZrO_2	0,07				
CaO	0,04				
Li_2O	0,54				

Tabla 3.30. Superficie lograda con el esmalte E-Ib
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E- Ib		

Como se puede ver en las fotografías de la Tabla 3.30, el esmalte E-Ib funde pero no alcanza la fluidez necesaria para que forme una capa con espesor homogéneo.

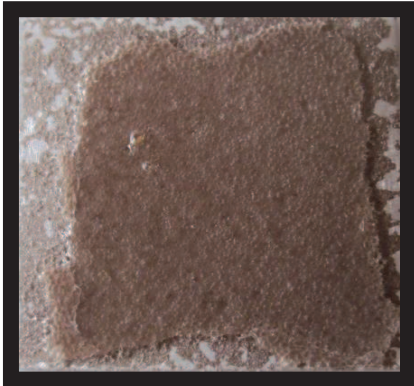
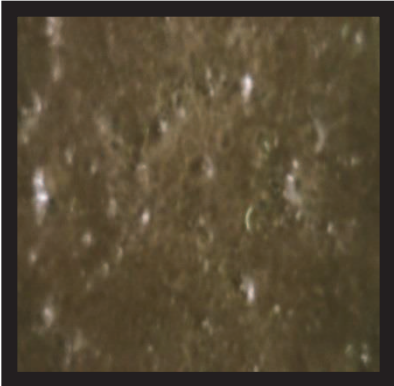
Se observan defectos, como burbujas, recogidos y se nota un pandeo en la placa de aluminio.

La fórmula molecular y los resultados obtenidos con el esmalte E-Ic se presentan en las Tablas 3.31 y 3.32.

Tabla 3.31. Fórmula molecular del esmalte E-Ic

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,15	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,10			B ₂ O ₃	0,82
ZrO ₂	0,07				
CaO	0,04				
Li ₂ O	0,54				

Tabla 3.32. Superficie lograda con el esmalte E-Ic
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E- Ic		

En la fotografía sin aumento de la Tabla 3.32, se observa que la pieza esmaltada con E-Ic funde, existe la presencia de defectos como esquirlas, burbujas y adherencia defectuosa.

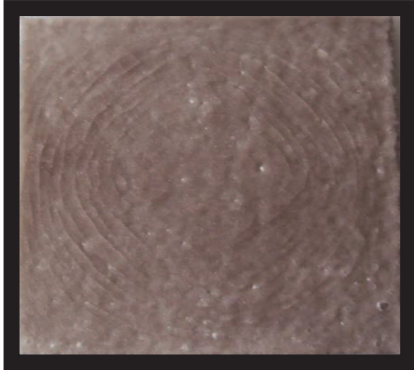
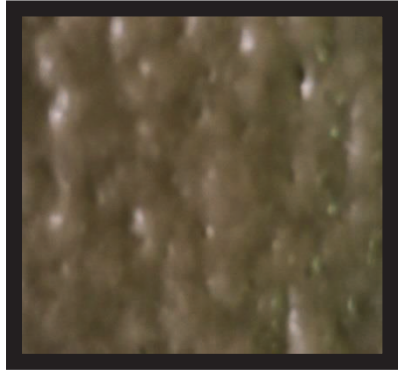
El resultado se atribuye probablemente al aumento en la cantidad en moles de Li_2O y a la disminución del B_2O_3 .

En el esmalte E-Id se incrementa el número de moles de B_2O_3 de 0,82 a 1,09 y se disminuye la cantidad de moles de Li_2O de 0,54 a 0,50 moles.

Tabla 3.33. Fórmula molecular del esmalte E-Id

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na_2O	0,15	Al_2O_3	0,05	SiO_2	1,85
K_2O	0,10			B_2O_3	1,09
ZrO_2	0,07				
CaO	0,04				
Li_2O	0,50				

Tabla 3.34. Superficie lograda con el esmalte E-Id
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	FOTO SIN AUMENTO	FOTO CON AUMENTO DE 2X
E- Id		

Para el caso del esmalte E-Id en cuya fórmula molecular existe un aumento en la cantidad de moles de B_2O_3 en comparación al esmalte E-Ic, presenta un mejor aspecto superficial no se observan poros, sin embargo, presenta fisuras. La presencia de fisuras quizás se deba al alto contenido en moles de B_2O_3 que provoca una disminución en el coeficiente de dilatación térmica del esmalte.

En los esmaltes E-Ic y E-Id se incrementó la cantidad de moles de B_2O_3 y las superficies obtenidas presentan mejores características vítreas que las obtenidas con los esmaltes E-Ia y E-Ib demostrándose el efecto fundente que presenta el B_2O_3 .

En la Tabla 3.35, se resume la diferencia en cuanto a las concentraciones del Li_2O , del B_2O_3 y del NaF presentes en los esmaltes E-Ia hasta E-Id.

Tabla 3.35. Esmaltes porcelánicos formulados con variaciones del B_2O_3 y Li_2O

Esmaltes Formulados	Moles de Li_2O	Moles de NaF	Moles de B_2O_3
E-Ia	0,54	0,20	0,38
E-Ib	0,54	0,20	0,54
E-Ic	0,54	0,20	0,82
E-Id	0,50	0,20	1,09

Para continuar con el estudio se seleccionaron 10 materias primas que se presentan en la Tabla 3.36.

Tabla 3.36. Materias primas seleccionadas

Materias Primas	Fórmula
Ácido bórico	H ₃ BO ₃
Alúmina	Al ₂ O ₃
Bórax	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O
Carbonato de litio	Li ₂ CO ₃
Carbonato de calcio	CaCO ₃
Carbonato de potasio	K ₂ CO ₃
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃
Cuarzo	SiO ₂
Fluoruro de sodio	NaF
Zircosil	ZrO ₂ ·SiO ₂

3.2. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA RELACIÓN $\frac{B_2O_3}{Li_2O}$ EN LA FUSIÓN DE LA MEZCLA DE MATERIAS PRIMAS SELECCIONADAS

Las mezclas utilizadas para la elaboración de las muestras mantienen distinta relación entre el óxido de boro y el óxido de litio; los demás óxidos se mantienen constantes.

El programa AUTOCAD 2013, permitió cuantificar el área de la fase vítrea obtenida en cada prueba de fusión de mezclas vitrificables con diferentes relaciones entre los óxidos de boro y de litio, el uso de éste se presenta en el Anexo All.

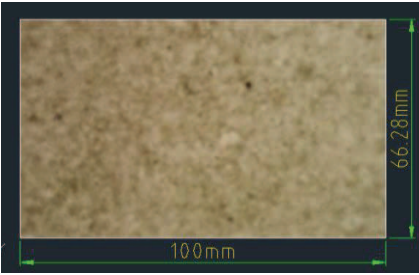
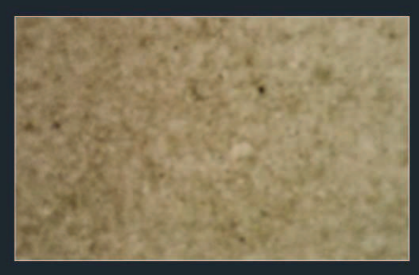

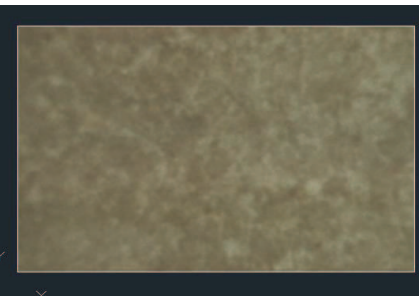
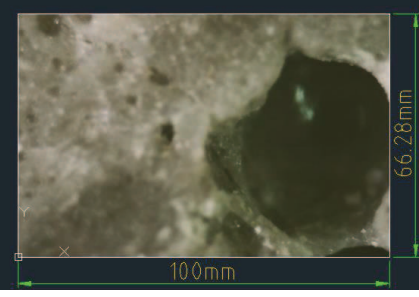
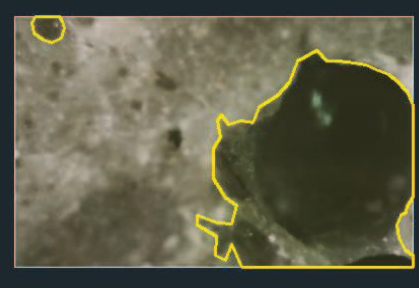
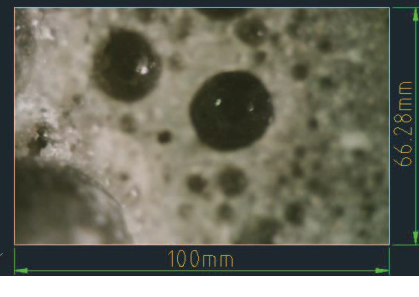
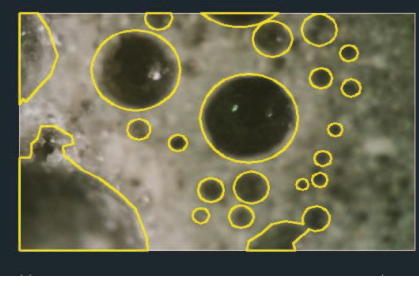
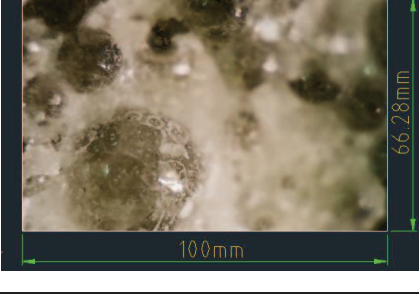

3.2.1. PRUEBAS DE FUSIÓN CON LA RELACIÓN $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{1,52}{1}$

Los pesos de las materias primas utilizadas para elaborar la mezcla vitrificable EF-1, y los resultados de las pruebas realizadas se muestran en las Tablas 3.37 y 3.38.

Tabla 3.37. Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-1

Materia Prima	Mezcla EF-1
	(g)
Ácido Bórico	0,00
Alúmina	0,23
Bórax	5,16
Carbonato de Calcio	0,17
Carbonato de Litio	1,31
Carbonato de Potasio	0,62
Carbonato de Sodio	1,14
Cuarzo	4,89
Fluoruro de Sodio	0,28
Zircosil	0,56

Tabla 3.38. Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-1 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{1,52}{1}$

		<p> Temperatura 500 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: 0,00 m^2 % Área fundida: 0,00 </p>
		<p> Temperatura 550 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: 0,00 m^2 % Área fundida: 0,00 </p>
		<p> Temperatura 600 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $2,34 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 35,34 </p>
		<p> Temperatura 650 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $2,40 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 36,23 </p>
		<p> Temperatura 700 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $3,13 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 47,28 </p>

La Tabla 3.38 permite observar cómo influye la temperatura en la fusión de la mezcla EF-1, las muestras cuya temperatura máxima de calentamiento fue 500 °C y 550°C no fundieron. A temperaturas entre 600 °C y 700 °C el área fundida evaluada va en aumento llegando a tener un 47,28 % de área fundida total a 600 °C.

Según Landolt-Börnstein (1956), el punto eutéctico del sistema $\text{Li}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3$ con la relación $\frac{\text{B}_2\text{O}_3}{\text{Li}_2\text{O}} = \frac{1,52}{1}$ se da a 680 °C. Considerando el porcentaje de masa fundida, se concluye en que la presencia de los otros componentes incrementó la temperatura de fusión (p. 174).

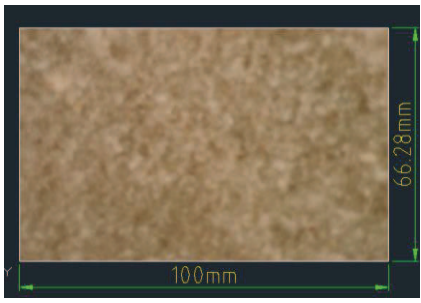
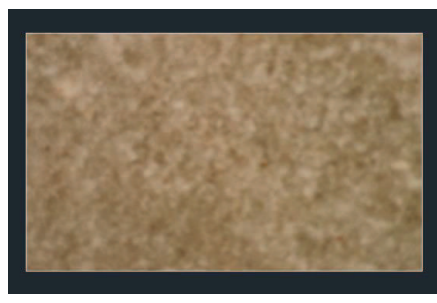
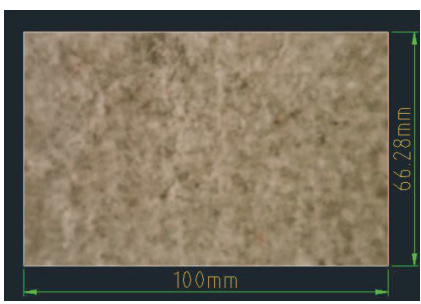
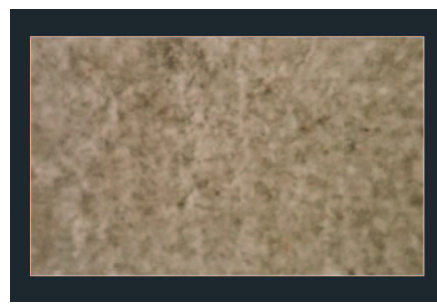
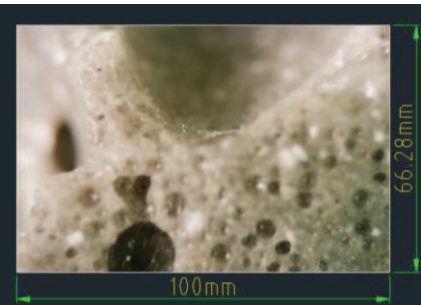
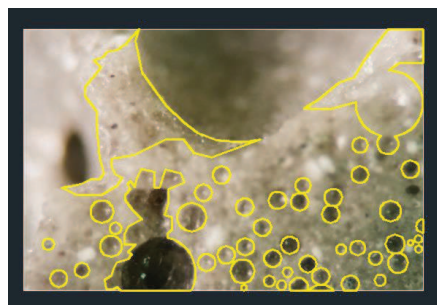
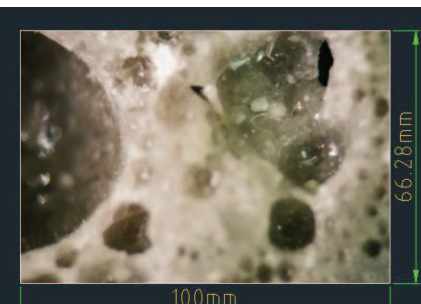

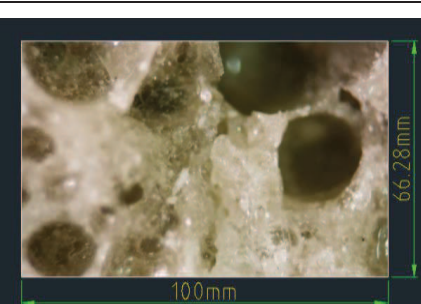
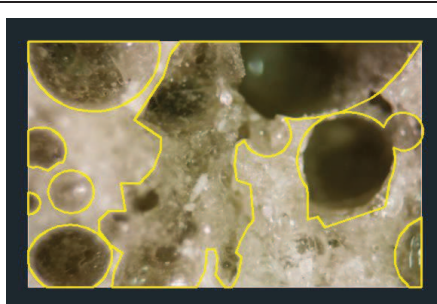
3.2.2. PRUEBAS DE FUSIÓN CON LA RELACIÓN $\frac{\text{B}_2\text{O}_3}{\text{Li}_2\text{O}} = \frac{2,22}{1}$

Los pesos de las materias primas utilizadas para elaborar la mezcla vitrificable EF-2, y los resultados de las pruebas realizadas se muestran en las Tablas 3.39 y 3.40.

Tabla 3.39. Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-2

Materia Prima	Mezcla EF-2
	(g)
Ácido Bórico	0,00
Alúmina	0,23
Bórax	5,90
Carbonato de Calcio	0,17
Carbonato de Litio	1,02
Carbonato de Potasio	0,61
Carbonato de Sodio	0,65
Cuarzo	4,79
Fluoruro de Sodio	0,28
Zircosil	0,55

Tabla 3.40. Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-2 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{2,22}{1}$

		<p> Temperatura 500 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: 0,00 m^2 % Área fundida: 0,00 </p>
		<p> Temperatura 550 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: 0,00 m^2 % Área fundida: 0,00 </p>
		<p> Temperatura 600 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $1,96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 29,63 </p>
		<p> Temperatura 650 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $3,25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 49,08 </p>
		<p> Temperatura 700 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $4,38 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 66,01 </p>

La Tabla 3.40 permite observar que a temperaturas inferiores a 600 °C el esmalte no funde no se visualizan áreas vítreas, conforme se incrementa la temperatura el área fundida aumenta.

Sin embargo, a pesar que la mezcla muestra mejor comportamiento, a 600 °C, el porcentaje de área fundida no llega al 30 % como se muestra en la Tabla 3.40, lo que nos conduce a pensar que esta relación no es la más aceptable.


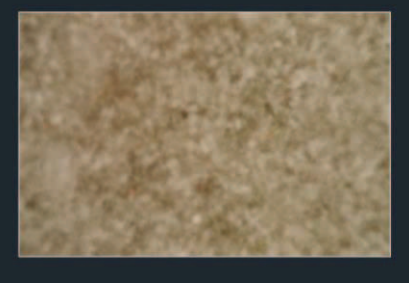

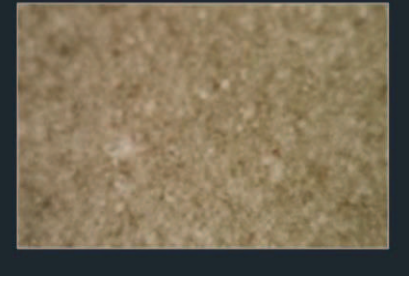
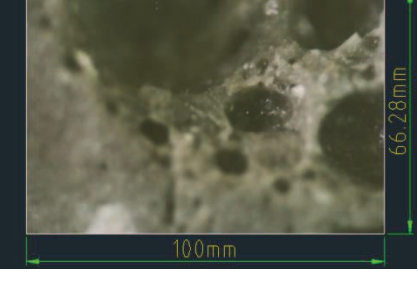
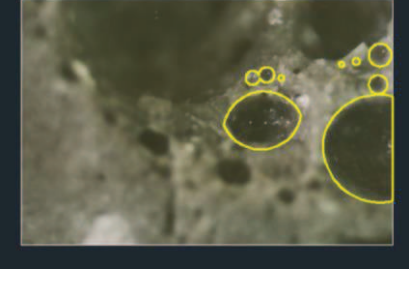
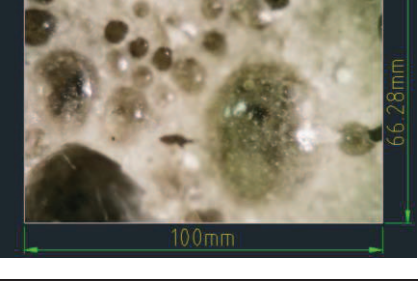
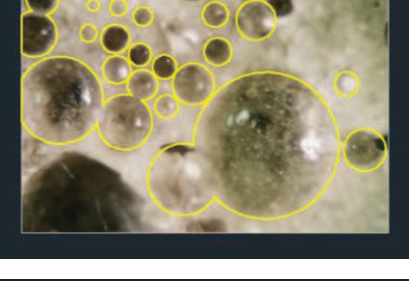
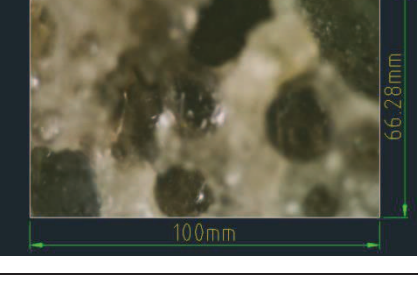
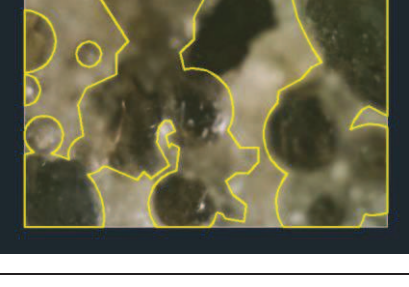
3.2.3. PRUEBAS DE FUSIÓN CON LA RELACIÓN $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{2,92}{1}$

Los pesos de las materias primas utilizadas para elaborar la mezcla vitrificable EF-3, y los resultados de las pruebas realizadas se muestran en las Tablas 3.41 y 3.42.

Tabla 3.41. Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-3

Materia Prima	Mezcla EF-3
	(g)
Ácido Bórico	0,00
Alúmina	0,22
Bórax	6,57
Carbonato de Calcio	0,16
Carbonato de Litio	0,87
Carbonato de Potasio	0,60
Carbonato de Sodio	0,17
Cuarzo	4,67
Fluoruro de Sodio	0,27
Zircosil	0,54

Tabla 3.42. Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-3 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{2,92}{1}$

		<p> Temperatura 500 °C Área foto: 6627,83 x 10⁻⁶ m² Área fundida: 0,00 m² % Área fundida: 0,00 </p>
		<p> Temperatura 550 °C Área foto: 6627,83 x 10⁻⁶ m² Área fundida: 0,00 m² % Área fundida: 0,00 </p>
		<p> Temperatura 600 °C Área foto: 6627,83 x 10⁻⁶ m² Área fundida: 765,46 x 10⁻⁶ m² % Área fundida: 11,55 </p>
		<p> Temperatura 650 °C Área foto: 6627,83 x 10⁻⁶ m² Área fundida: 2939,15 x 10⁻⁶ m² % Área fundida: 44,35 </p>
		<p> Temperatura 700 °C Área foto: 6627,83 x 10⁻⁶ m² Área fundida: 4429,05 x 10⁻⁶ m² % Área fundida: 66,83 </p>

En la Tabla 3.42 se puede observar que los porcentajes de área fundida a 600 °C, 650 °C y 700 °C son mayores en el EF-3 que en el EF-2. A temperaturas entre 600 °C y 700 °C el área fundida evaluada va en aumento así: a 600 °C fue de 11,55 % a 650 °C de 44,35 % y a 700 °C, el área fundida llegó a ser de 66,83 %. Esto comprueba la naturaleza fundente que presenta el B₂O₃, ya que al aumentar su concentración se logra mayor porcentaje de área vitrificada llegando a ser del 66,83 % a los 700 °C.

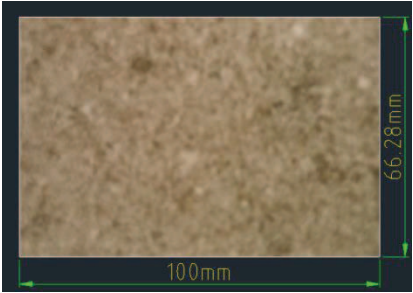

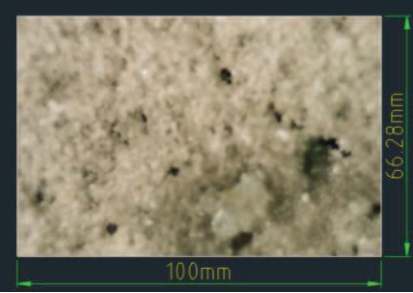
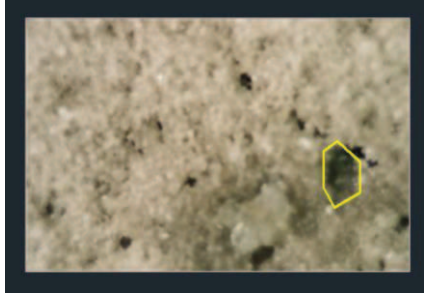
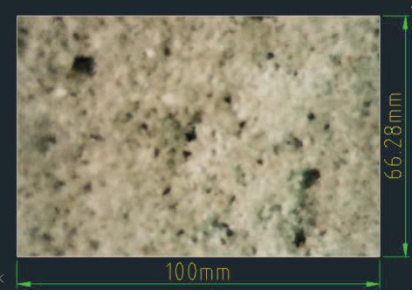

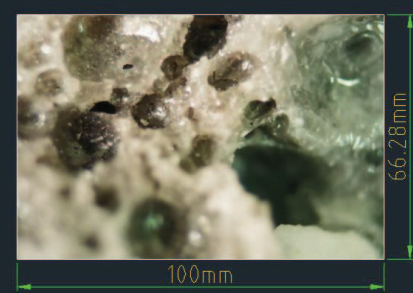
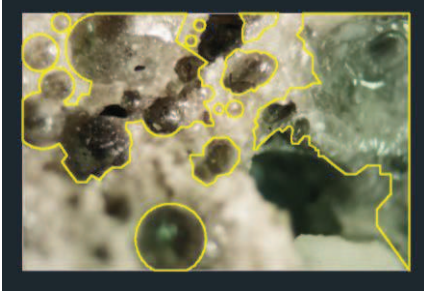
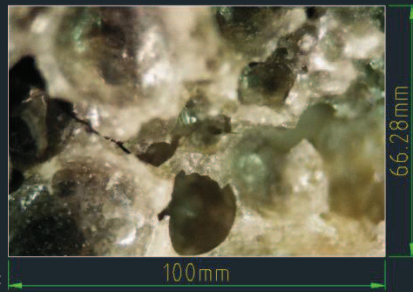
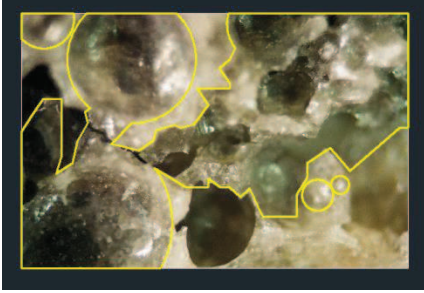
3.2.4. PRUEBAS DE FUSIÓN CON LA RELACIÓN $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{3,62}{1}$

Los pesos de las materias primas utilizadas para elaborar la mezcla vitrificable EF-4, y los resultados de las pruebas realizadas se muestran en las Tablas 3.43 y 3.44.

Tabla 3.43. Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-4

Materia Prima	Mezcla EF-4
	(g)
Ácido Bórico	0,52
Alúmina	0,21
Bórax	6,40
Carbonato de Calcio	0,16
Carbonato de Litio	0,77
Carbonato de Potasio	0,58
Carbonato de Sodio	0,17
Cuarzo	4,55
Fluoruro de Sodio	0,26
Zircosil	0,53

Tabla 3.44. Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-4 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{3,62}{1}$

		<p>Temperatura 500 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: 0,00 m^2 % Área fundida: 0,00</p>
		<p>Temperatura 550 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $0,04 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 0,66</p>
		<p>Temperatura 600 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $0,33 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 4,91</p>
		<p>Temperatura 650 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $3,31 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 49,89</p>
		<p>Temperatura 700 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $4,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 69,36</p>

Como se observa en la Tabla 3.44, a diferencia de la relaciones de las mezclas EF-1, EF-2 y EF-3, a temperaturas menores que 600 °C se ve el aporte fundente de la relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O}$ llegando a un porcentaje de 0,66 % de área vítrea a 550 °C.

La adición de 0,10 moles a la relación 2,92/1 entre el B_2O_3 y Li_2O provocó un incremento en el porcentaje de área fundida, a 650 °C tal área es de 44,35 % en la mezcla EF-3 y 49,89 % en EF-4. Se evidencia un incremento en el porcentaje de área fundida a 700 °C, de 66,83 % de la mezcla EF-3 a 69,63 % de EF-4.


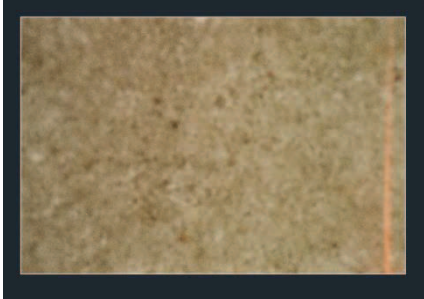
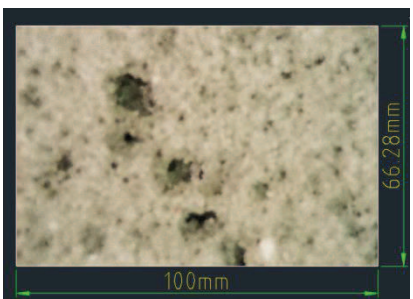
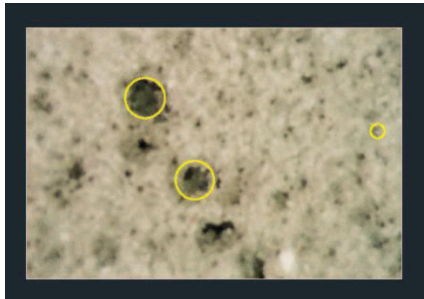
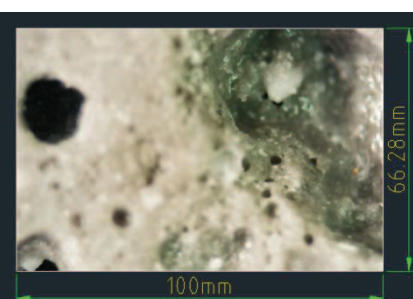
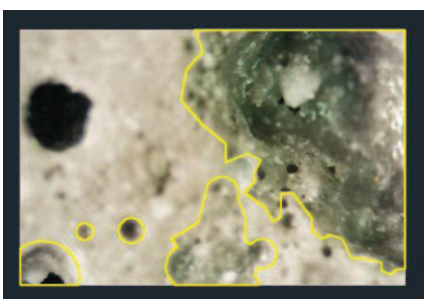
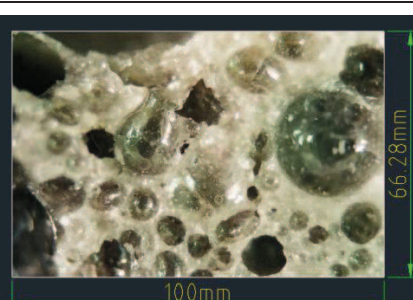
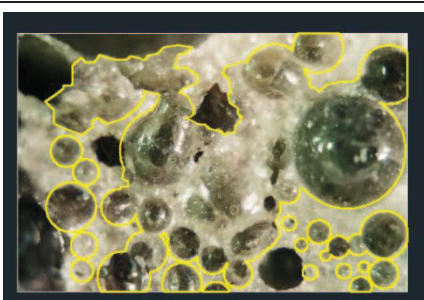

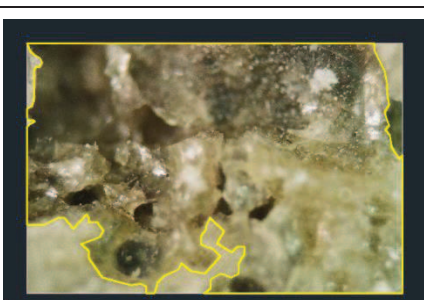
3.2.5. PRUEBAS DE FUSIÓN CON LA RELACIÓN $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{4,34}{1}$

Los pesos de las materias primas utilizadas para elaborar la mezcla vitrificable EF-5, y los resultados de las pruebas realizadas se muestran en las Tablas 3.45 y 3.46.

Tabla 3.45. Pesos de las materias primas usadas en la mezcla EF-5

Materia Prima	Mezcla EF-5
	(g)
Ácido Bórico	1,01
Alúmina	0,21
Bórax	6,23
Carbonato de Calcio	0,16
Carbonato de Litio	0,69
Carbonato de Potasio	0,56
Carbonato de Sodio	0,16
Cuarzo	4,43
Fluoruro de Sodio	0,26
Zircosil	0,51

Tabla 3.46. Resultados de las pruebas de fusión de la mezcla EF-5 $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{4,34}{1}$

		<p>Temperatura 500 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: 0,00 m^2 % Área fundida: 0,00</p>
		<p>Temperatura 550 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $0,18 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 2,71</p>
		<p>Temperatura 600 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $3,26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 49,20</p>
		<p>Temperatura 650 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $4,19 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 63,23</p>
		<p>Temperatura 700 °C Área foto: $6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área fundida: $5,91 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ % Área fundida: 89,15</p>

En la Tabla 3.46 se puede observar que el área fundida es casi completa a una temperatura de 700 °C, logrando obtenerse el 89,15 % de área vitrificada.

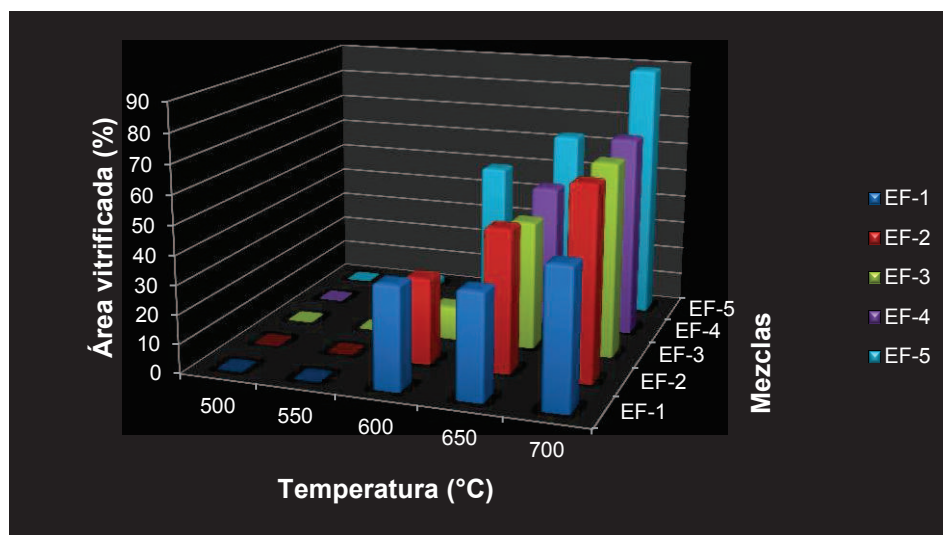


Figura 3.1. Porcentajes de las áreas fundidas de las mezclas EF-1, EF-2, EF-3, EF-4 y EF-5 a diferente temperatura

La Figura 3.1 nos muestra los resultados globales obtenidos, donde se ve que los mejores resultados se han logrado con las relaciones $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{3,62}{1}$ y $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{4,34}{1}$ correspondientes a las mezclas EF-4 y EF-5. Sin embargo, debido al limitante que es el punto de fusión del aluminio, se toma como temperatura de trabajo 600 °C y la relación $\frac{B_2O_3}{Li_2O} = \frac{4,34}{1}$, con la que se alcanza un área vitrificada del 49,20 % y se tomó la como base para formular esmaltes destinados a recubrir placas de aluminio.

3.3. FORMULACIÓN DE UN ESMALTE PORCELÁNICO PARA RECUBRIR PIEZAS DE ALUMINIO

En las fórmulas moleculares que se presentan, a la cantidad en moles de Na_2O se le ha restado la cantidad en moles que serán aportadas por el NaF, en los esmaltes se utilizó 0,15 moles de NaF.

La fórmula molecular del esmalte EF-5 se muestra en la Tabla 3.47 y la superficie lograda sobre aluminio en la Tabla 3.48.

Tabla 3.47. Fórmula molecular del esmalte EF-5

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,46	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,11			B ₂ O ₃	1,08
ZrO ₂	0,07				
CaO	0,04				
Li ₂ O	0,25				

Tabla 3.48. Superficie lograda con el esmalte EF-5
T_m= 600 °C, t_m=10 min

Esmalte	Placa obtenida	Características
EF-5		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 100 % ❖ Brillo: Bueno en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta fisuras y distorsión de las piezas

Como se observa en la fotografía de la Tabla 3.48, el esmalte EF-5, logra fundir, presenta una superficie rugosa, observándose fisuras y color aceituna. Las fisuras probablemente se deban a una diferencia entre el coeficiente de dilatación térmica entre el esmalte y la superficie o al proceso de enfriamiento.

Se formularon 3 esmaltes, en base a la composición EF-5 con incremento y disminución de la cantidad de Na₂O para ajustar el coeficiente de dilatación térmica.


Las fórmulas moleculares de los esmaltes elaborados y la evaluación de las placas recubiertas con cada uno de ellos se presentan en las Tablas 3.49 hasta la 3.54.

Tabla 3.49. Fórmula molecular del esmalte EF-5a

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,11			B ₂ O ₃	1,08
ZrO ₂	0,06				
CaO	0,03				
Li ₂ O	0,25				

Tabla 3.50. Superficie lograda con el esmalte EF-5a

$T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 10\text{ min}$

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
EF-5a		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 99 % ❖ Brillo: Malo en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta poros y distorsión de las piezas

Como se observa en la Tabla 3.50, el esmalte EF-5a no presenta un área recubierta lisa, se observan poros, no posee brillo, la adherencia es buena pero el aspecto superficial no es aceptable.

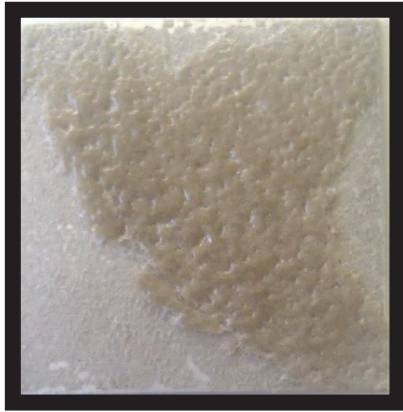
Se resuelve modificar la cantidad de moles de Na₂O de 0,55 a 0,53, para evaluar la influencia de esta disminución en la temperatura de fusión del esmalte.

La fórmula molecular y los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 3.51 y 3.52.

Tabla 3.51. Fórmula molecular del esmalte EF-5b

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,40	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,11			B ₂ O ₃	1,08
ZrO ₂	0,11				
CaO	0,06				
Li ₂ O	0,25				

Tabla 3.52. Superficie lograda con el esmalte EF-5b
T_m= 600 °C, t_m= 10 min

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
EF-5b		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 60 % ❖ Brillo: Bueno en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta esquirlas, burbujas, recogidos y distorsión de las piezas

De acuerdo con el análisis de la placa esmaltada con EF-5b que se presenta en la Tabla 3.52, la disminución de la cantidad de Na₂O mejora el aspecto superficial de la placa, incrementa el brillo pero disminuye la adherencia entre la placa y el esmalte. Inmediatamente después de la salida del horno el esmalte se desprende de la placa.

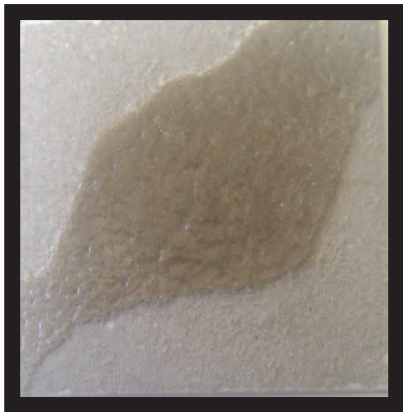
Se elaboró un esmalte EF-5c, donde se disminuye el número de moles de Na₂O de 0,47 a 0,44.

La fórmula molecular y los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 3.53 y 3.54.

Tabla 3.53. Fórmula molecular del esmalte EF-5c

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,37	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,11			B ₂ O ₃	1,08
ZrO ₂	0,13				
CaO	0,07				
Li ₂ O	0,25				

Tabla 3.54. Superficie lograda con el esmalte EF-5c
T_m= 600 °C, t_m=10 min

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
EF-5c		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 50 % ❖ Brillo: Bueno en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta esquirlas, burbujas y distorsión de las piezas

La placa esmaltada con EF-5c presenta un buen aspecto superficial con brillo, sin embargo la adherencia disminuyó con relación a la de los esmaltes EF-5a y EF-5b. Se observan burbujas en el seno del esmalte y algunas imperfecciones como fisuras, menos grandes que las del esmalte EF-5a.

La disminución de óxido de sodio en los esmaltes EF-5b y EF-5c con relación al esmalte EF-5 como se puede ver en las Tablas 3.51 y 3.53 provocó una disminución en la cantidad de fisuras, se redujo la adherencia y el porcentaje de área recubierta.

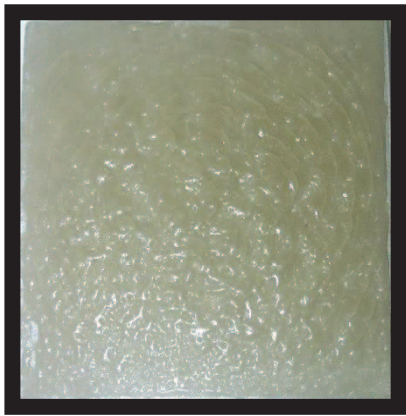
De acuerdo con los resultados expuestos se decide cambiar la cantidad de los óxidos de litio y boro para mejorar la fusión y tratar de evitar la presencia de esquirlas y fisuras.

Las fórmulas moleculares de los tres esmaltes preparados y la evaluación de las placas recubiertas se presentan en las Tablas 3.55 hasta la 3.60.

Tabla 3.55. Fórmula molecular del esmalte EF-5d

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,46	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,11			B ₂ O ₃	1,10
ZrO ₂	0,07				
CaO	0,04				
Li ₂ O	0,25				

Tabla 3.56. Superficie lograda con el esmalte EF-5d
T_m= 600 °C, t_m=10 min

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
EF-5d		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 100 % ❖ Brillo: Regular en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta esquirlas, fisuras y distorsión de las piezas

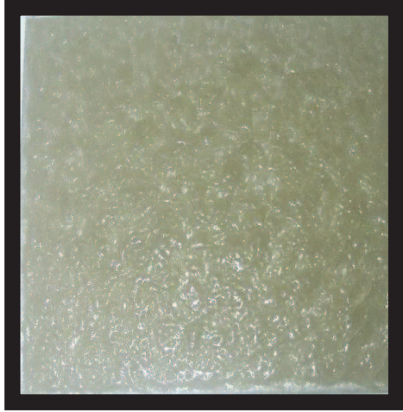
En la Tabla 3.56 se ve que la placa esmaltada con EF-5d no presenta buen brillo, se observan esquirlas, fisuras y distorsión de las piezas. Se decide reducir las moles de óxido de boro de 1,10 a 0,90.

La fórmula molecular del esmalte elaborado y la evaluación de la placa recubierta se presentan en las Tablas 3.57 y 3.58.

Tabla 3.57. Fórmula molecular del esmalte EF-5e

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,46	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,11			B ₂ O ₃	0,90
ZrO ₂	0,10				
CaO	0,05				
Li ₂ O	0,21				

Tabla 3.58. Superficie lograda con el esmalte EF-5e
T_m= 600 °C, t_m=10 min

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
EF-5e		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 99 % ❖ Brillo: Regular en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta esquirlas, recogidos y distorsión de las piezas


Se observa que en el esmalte EF-5e cuyo contenido de B₂O₃ es menor no presenta brillo que es característico en un esmalte. Además, se ve una mayor cantidad de recogidos, la superficie es más rugosa que la de la placa esmaltada con EF-5d.

En el esmalte EF-5f se cambió las moles de óxido de boro de 0,90 del esmalte EF-5e a 0,70. La fórmula molecular del esmalte elaborado y la evaluación de la placa recubierta se presentan en las Tablas 3.59 y 3.60.

Tabla 3.59. Fórmula molecular del esmalte EF-5f

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos Intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,46	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,10			B ₂ O ₃	0,70
ZrO ₂	0,12				
CaO	0,07				
Li ₂ O	0,18				

Tabla 3.60. Superficie lograda con el esmalte EF-5f
T_m= 600 °C, t_m=10 min

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
EF-5f		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 80 % ❖ Brillo: Regular en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta esquirlas, recogidos y distorsión de las piezas

La placa esmaltada con EF-5f muestra características mucho menores que la de los esmaltes EF-5d y EF-5e, con lo que se concluye que una disminución de B₂O₃ y consecuentemente de Li₂O no permite mejorar las características del esmalte.

El análisis de los resultados muestra que el esmalte EF-5d, presenta mayor área vitrificada que los esmaltes EF-5e y EF-5f debido a que la cantidad de B₂O₃ y la del Li₂O que están presentes es mayor, ratificando su poder fundente. A pesar de ello, el área no está totalmente recubierta, presenta brillo se observan fisuras.

Debido a que los mejores resultados, sin llegar a la perfección, se lograron con los esmaltes EF-5d y EF-5e se decidió realizar el estudio de los tiempos de maduración de éstos, tomando como temperatura de maduración 600 °C.

3.3.1. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MADURACIÓN DE LOS ESMALTES EF-5d Y EF-5e

Se aplicaron 2 ciclos de cocción, que empiezan con un calentamiento desde la temperatura ambiente hasta los 600 °C, se mantienen en esta temperatura 5 y 15 min, para después empezar el enfriamiento.

El ciclo de cocción aplicado se presenta en la Figura 3.2.

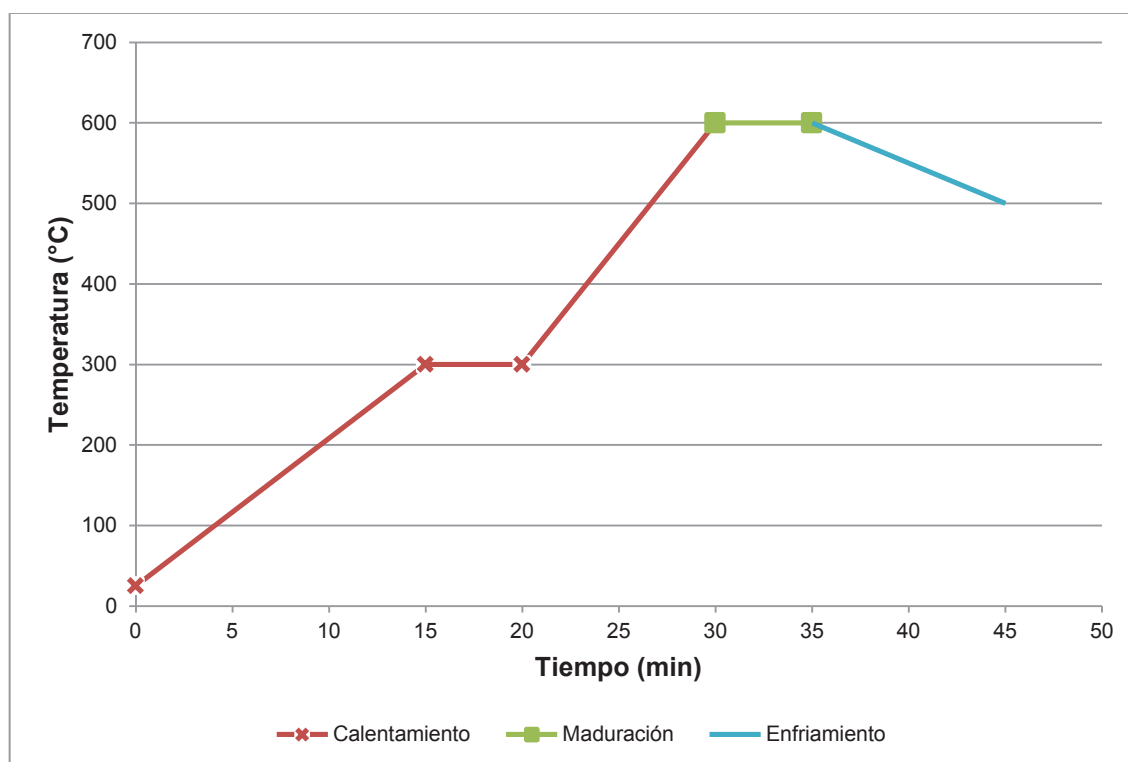

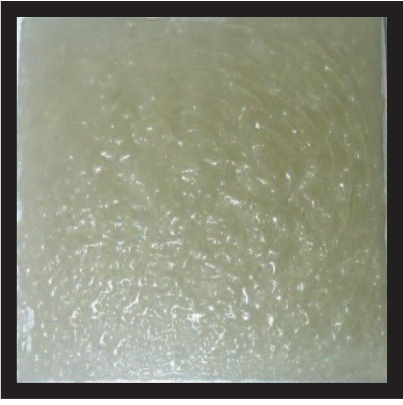
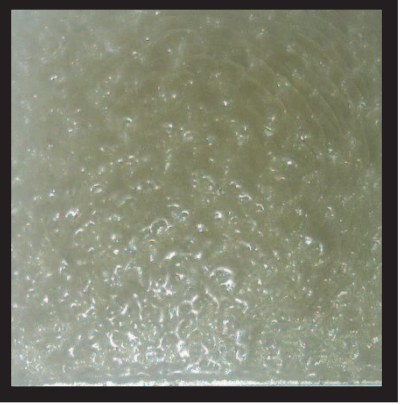


Figura 3.2. Ciclo de cocción aplicado a los esmaltes EF-5d y EF-5e, $t_m=5$ min


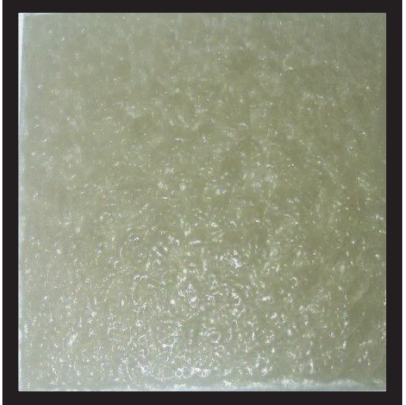
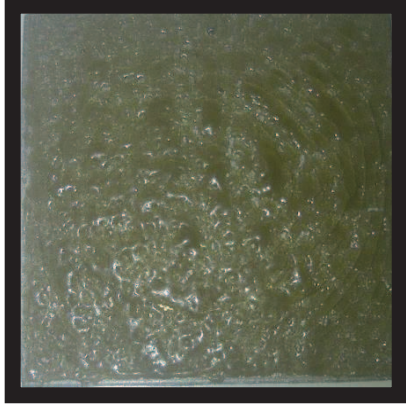
Los resultados del estudio de la determinación del tiempo de maduración de los esmaltes EF-5d y EF-5e, se presentan en las Tablas 3.61 y 3.62, para tiempos de maduración de 5, 10 y 15 minutos.

Tabla 3.61. Superficie lograda con el esmalte EF-5d
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 5, 10 \text{ y } 15 \text{ min}$

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
$t_m = 5 \text{ min}$		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 100 % ❖ Brillo: Malo ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta fisuras, recogidos y distorsión de las piezas
$t_m = 10 \text{ min}$		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 100 % ❖ Brillo: Regular en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta fisuras, recogidos y distorsión de las piezas
$t_m = 15 \text{ min}$		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 100 % ❖ Brillo: Regular en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta fisuras, recogidos y distorsión de las piezas

Como se puede ver en la Tabla 3.61, los resultados obtenidos con un tiempo de maduración de 5 minutos muestran un área menos fundida que con un tiempo de 10 y 15 min, incluso el brillo es menos evidente.

Tabla 3.62. Superficie lograda con el esmalte EF-5e
 $T_m = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 5, 10 \text{ y } 15 \text{ min}$

ESMALTE	PLACA OBTENIDA	CARACTERÍSTICAS
$t_m = 5 \text{ min}$		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 100 % ❖ Brillo: Malo ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta fisuras, recogidos y distorsión de las piezas
$t_m = 10 \text{ min}$		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 99 % ❖ Brillo: Regular en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta esquirlas, recogidos, y distorsión de las piezas
$t_m = 15 \text{ min}$		<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cobertura: 100 % ❖ Brillo: Regular en toda la superficie ❖ Homogeneidad: Buena ❖ Fallas: Presenta esquirlas, fisuras, recogidos y distorsión de las piezas

Como se puede ver en la Tabla 3.62, los resultados obtenidos con un tiempo de maduración de 15 minutos muestran área fundida, brillo, se ve la presencia de defectos como líneas, recogidos. Conforme se incrementa el tiempo de maduración el color del esmalte se hace más oscuro.

De acuerdo con los resultados presentados en las Tablas 3.61 y 3.62, los mejores resultados en cuanto a área fundida se consiguieron en las placas cuyo tiempo de maduración fue 15 minutos. Esto ocurrió con las dos formulaciones, se ve una mejor fusión del esmalte sobre la superficie; sin embargo, se visualiza un incremento en la cantidad de fisuras y recogidos. Por lo que se concluye que el mejor ciclo es aquel cuyo tiempo de maduración es 15 min.

3.4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE DOSIFICACIÓN Y MEZCLA DE MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS EN LA ELABORACIÓN DE ESMALTES PORCELÁNICOS

El sistema de dosificación y mezcla de las 10 materias primas se presentan en el plano del Anexo AIV, en donde se pueden observar cada una de las piezas de las que está conformado.

La dosificación de las materias primas utilizadas para obtener la mezcla vitrificable fuente de los óxidos que forman un esmalte porcelánico, se reporta en la Tabla AIII.1 del Anexo AIII.

3.4.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

El sistema de dosificación de las materias primas consta de tolvas instaladas como se observan en la Figura AIII.1 del Anexo AIII y en el plano del Anexo AIV.

Se diseñó una tolva cónica con tapa, y un acople bridado con el que se une al recipiente de descarga. El esquema se presenta en la Figura 3.3.

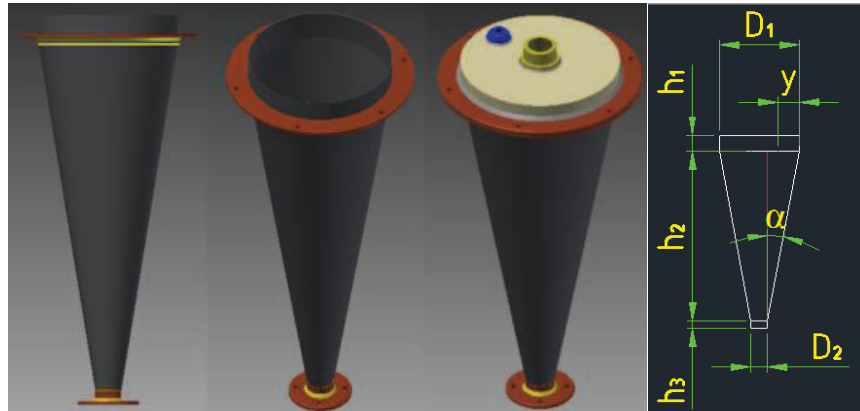


Figura 3.3. Tolva de alimentación

Donde:

- D₁**: diámetro mayor
- D₂**: diámetro menor
- h₁**: altura de la tapa
- h₂**: altura de la tolva
- h₃**: altura de la boquilla
- α**: ángulo medio de tolva

Parámetros considerados para el diseño:

- Cantidad de materia prima a almacenar (W_{MP})= 3,50 kg
- Carga de diseño (W_{MPD})= 4 kg
- Densidad promedio de las materias primas (δ_{MP})= 1,10 kg/L
- Volumen de la materia prima a almacenar(V_{MP})= 3,60 L

3.4.1.1. Cálculo del ángulo medio de tolva

El valor de este ángulo se obtuvo de la Figura AIII.1 que se encuentra en el Anexo AIII. Para poder utilizar la Figura se tomó el ángulo de rozamiento máximo con la pared igual a 29° que corresponde al cemento, material con similares características que las materias primas.

Resultado

$\alpha = 10^\circ$, con el cual el flujo obtenido es de tipo laminar.

3.4.1.2. Diseño de las tolvas

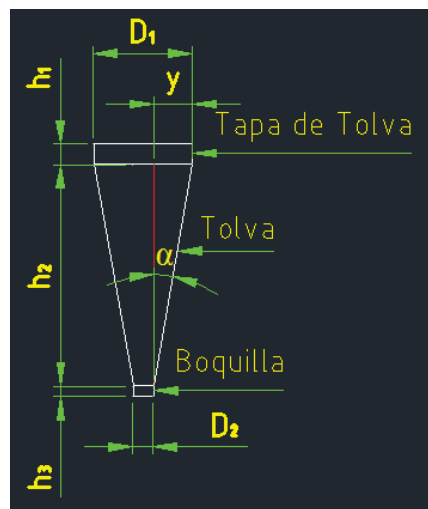


Figura 3.4. Partes de la tolva

Se asume:

$$D_2 = 0,03 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,03 \text{ m}$$

$$h_3 = 0,02 \text{ m}$$

D_1 se calculó aplicando la ecuación [3.1].

$$V_T = \frac{\pi \times (D_1^2 + D_2^2 + D_1 \times D_2)}{12} \times \frac{D_1 - D_2}{2 \tan \alpha} \quad [3.1]$$

Para resolver la ecuación [3.1] se utilizó una herramienta matemática de Microsoft Excel 2010 (Análisis Si, Buscar Objetivo), en donde se ingresa el dato de la celda que deseamos analizar (V_T), la respuesta requerida (3,60 L) y el dato de la celda con el valor que deseamos obtener (D_1). La celda a analizar debe ser dependiente del dato a obtener en función de la ecuación [3.1]; a través de prueba y error el

programa cambia el valor de D_1 hasta obtener la respuesta requerida en la celda analizada correspondiente al volumen deseado.

En la Figura 3.5 se presenta la captura de la pantalla que ejemplifica la utilización del programa, se observa los parámetros de entrada y la respuesta entregada.

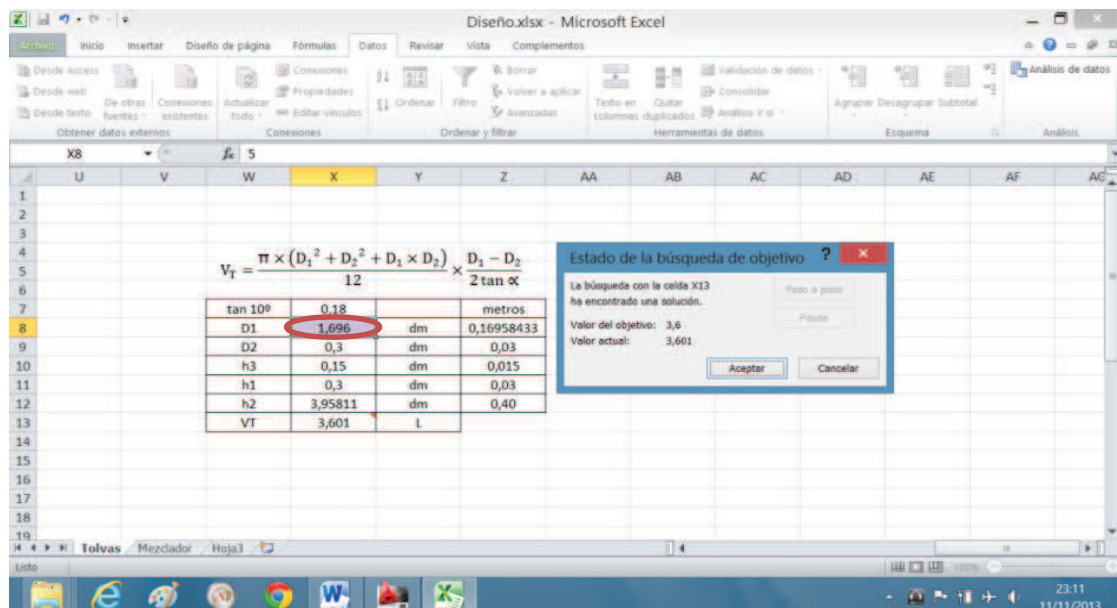


Figura 3.5. Cálculo de D_1

Resultado

$$D_1 = 0,17 \text{ m}$$

Con el valor de D_1 se despeja la altura de la tolva de la ecuación [3.2].

$$\tan \alpha = \frac{y}{h_2} \quad [3.2]$$

La variable y se observa en la Figura 3.4.

Resultado

$$h_2 = 0,40 \text{ m}$$

3.4.2. DIMENSIONAMIENTO DE VÁLVULAS

Las válvulas fueron seleccionadas en base a catálogos, de modo que el diámetro de la tubería debe sujetarse al diámetro de la válvula seleccionada.

Válvula de mantenimiento

Se escogió una válvula tipo bola ya que ésta permite el paso del flujo másico debido a su completa abertura, y cierra al realizar el mantenimiento del mecanismo de pesado cuando la tolva esté cargada. El esquema se presenta en la Figura 3.6.

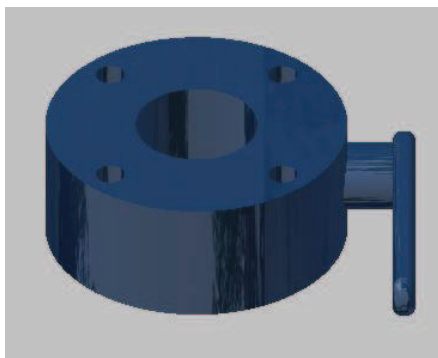


Figura 3.6. Válvula de mantenimiento

Resultado

Tipo: Válvula de bola

Diámetro interno: 0,03 m

Válvula de ingreso al sistema de dosificación de materias primas

Se requiere de una válvula accionada neumáticamente que permita el cierre rápido y que dosifique eficazmente. El esquema se presenta en la Figura 3.7.

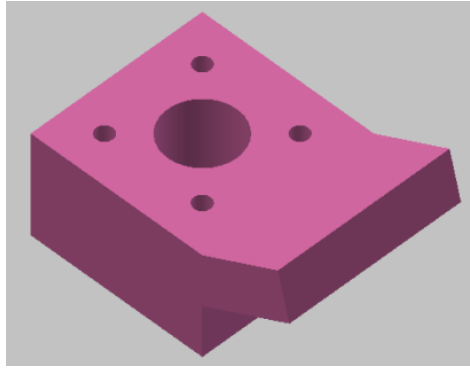


Figura 3.7. Válvula de dosificación

Resultado

Tipo: Válvula de cuchilla inclinada

Diámetro: 0,03 m

Válvulas de descarga y de entrada a la mezcladora

Se requieren válvulas que presenten seguridad al cierre. El esquema se presenta en la Figura 3.8.

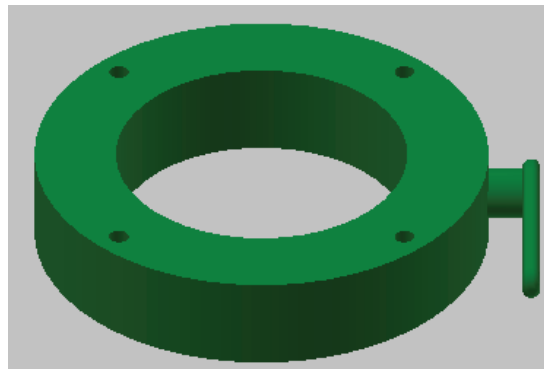


Figura 3.8. Válvula de descarga

Resultado

Tipo: Válvula mariposa

Diámetro interno: 0,09 m

3.4.3. SISTEMA DE PESADO

Consta de un sistema basculante accionado neumáticamente por un brazo y un pistón, cuyo ángulo de giro asegura la caída de la materia prima pesada previamente por el sensor de peso que se encuentra en la balanza; al llegar al peso adecuado, se cierra la válvula de dosificado y se acciona el sistema basculante que descarga la materia prima a la tolva de almacenamiento. El esquema se presenta en la Figura 3.9.

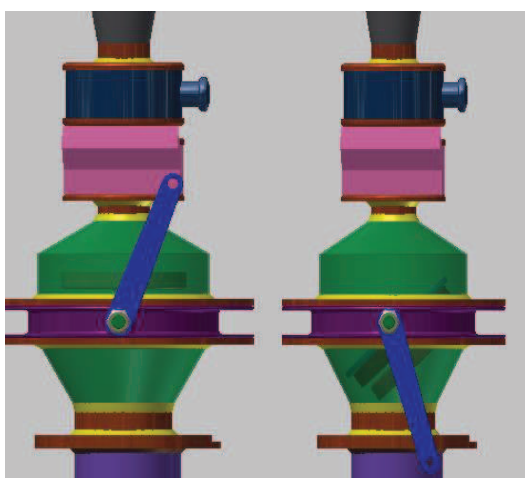


Figura 3.9. Sistema de dosificación

Resultado

Ángulo de giro= 140° , se obtuvo por medio de análisis gráfico.

3.4.4. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DESCARGA A LA TOLVA DE ALMACENAMIENTO

El sistema de descarga de las materias primas hacia la tolva de almacenamiento está formado por 5 tubos en forma de “Y”, instalados como se observa en la Figura AIII.1 del Anexo AIII y en el plano del Anexo AIV. Cada uno de los tubos fueron dimensionados individualmente, tomando en cuenta que el espacio ocupado por el sistema total sea reducido.

Y lateral derecha

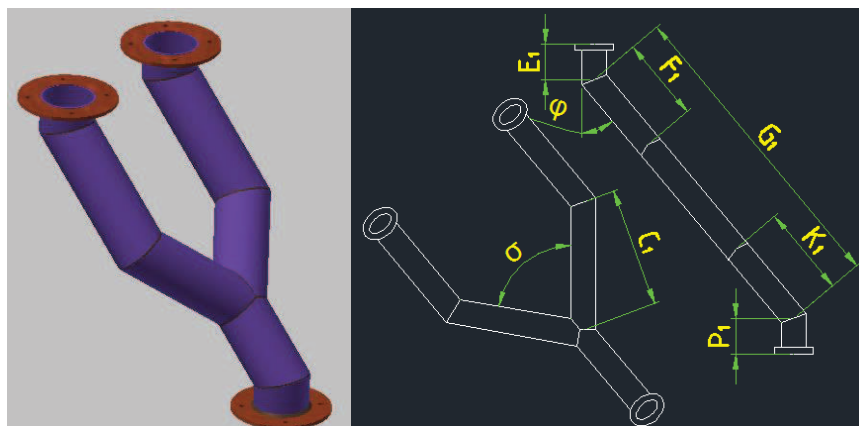


Figura 3.10. Y lateral derecha

Resultado

$$\sigma = 80^\circ, \varphi = 40^\circ, C_1 = 0,13 \text{ m}$$

$$E_1 = 0,04 \text{ m}$$

$$F_1 = 0,08 \text{ m}$$

$$G_1 = 0,34 \text{ m}$$

$$K_1 = 0,16 \text{ m}$$

$$P_1 = 0,03 \text{ m}$$

Y Frontal

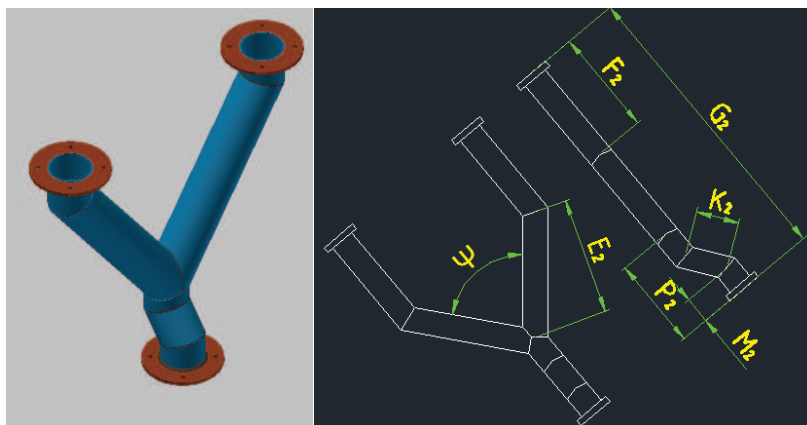


Figura 3.11. Y frontal

Resultado

$$\Psi = 80^\circ$$

$$E_2 = 0,26 \text{ m}$$

$$F_2 = 0,05 \text{ m}$$

$$G_2 = 0,33 \text{ m}$$

$$K_2 = 0,04 \text{ m}$$

$$P_2 = 0,08 \text{ m}$$

$$M_2 = 0,03 \text{ m}$$

Y lateral izquierda

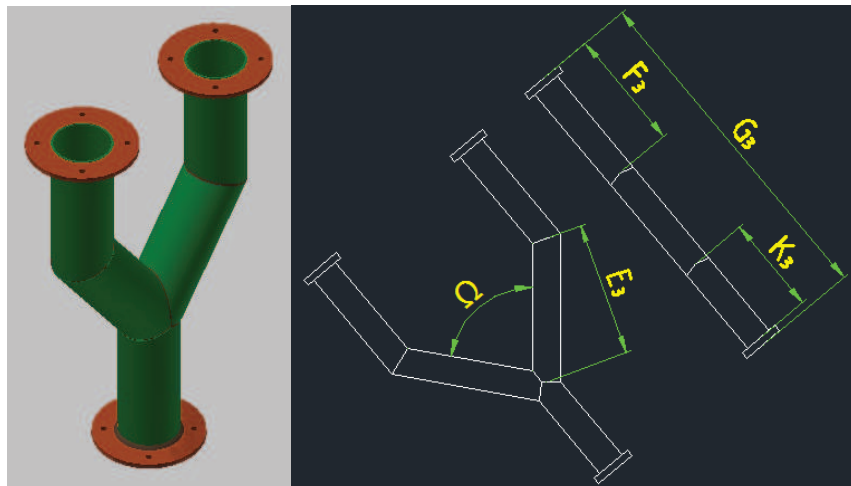


Figura 3.12. Y lateral izquierda

Resultado

$$\Omega = 80^\circ$$

$$E_3 = 0,13 \text{ m}$$

$$F_3 = 0,11 \text{ m}$$

$$G_3 = 0,33 \text{ m}$$

$$K_3 = 0,12 \text{ m}$$

3.4.5. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y DESCARGA

El diseño del sistema de almacenamiento de las materias primas consta de una tolva instalada como se observa en la Figura AIII.1 del Anexo AIII y en el plano del Anexo AIV.

Se diseñó una tolva cónica con tapa y sistema de descarga hacia el mezclador el esquema de la tolva se presenta en la Figura 3.13.

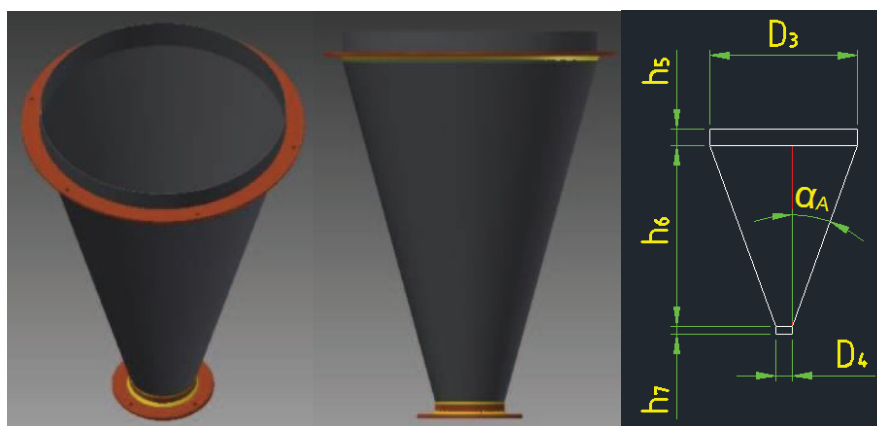


Figura 3.13. Tolva de almacenamiento

Donde:

D₃: diámetro mayor de tolva de almacenamiento

D₄: diámetro menor de tolva de almacenamiento

h₅: altura de la tapa de tolva de almacenamiento

h₆: altura de la tolva de almacenamiento

h₇: altura de la boquilla de la tolva de almacenamiento

α_A: Ángulo medio de tolva de almacenamiento

Parámetros considerados para el diseño:

- La cantidad de materia prima a almacenar (W_{MPA})= 7,50 kg

- Para que se acoplen las bridas de todas las salidas de la materia prima dosificada se debe tener un diámetro grande de tolva, por lo que se toma como carga de diseño (W_{MPDA})= 16 kg
- Densidad promedio de las materias primas (δ_{MP})= 1,10 kg/L
- Volumen de la materia prima a almacenar(V_{MPA})= 14,60 L

3.4.5.1. Cálculo del ángulo medio de tolva de almacenamiento

El valor de este ángulo se obtuvo de la Figura AIII.2 que se encuentra en el Anexo AIII.

Para utilizarla se tomó el ángulo de rozamiento máximo con la pared igual a 29°.

Resultado

$$\alpha_A = 20^\circ$$

3.4.5.2. Diseño de la tolva de almacenamiento

Se asume:

$$D_4 = 0,09 \text{ m}$$

$$h_5 = 0,03 \text{ m}$$

$$h_7 = 0,02 \text{ m}$$

Para determinar el valor de D_3 se utilizó una herramienta matemática de Microsoft Excel 2010 (Análisis Si, Buscar Objetivo). En la Figura 3.14 se presenta la captura de la pantalla que ejemplifica la utilización del programa, se observa los parámetros de entrada y la respuesta entregada.

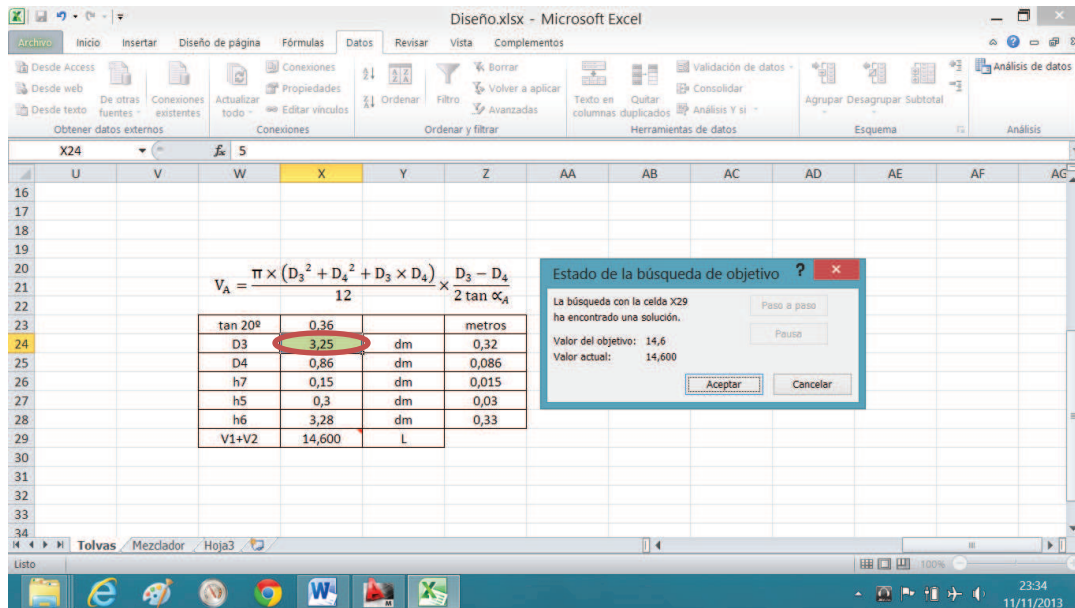


Figura 3.14. Cálculo de D_3

Resultado

$D_3 = 0,32 \text{ m}$

$h_6 = 0,33 \text{ m}$

3.4.5.3. Sistema de descarga

El sistema de descarga consta de un mecanismo que se desplaza manualmente, el cual se embona en la entrada al mezclador; al llegar al punto inferior primero se abre la válvula del mezclador y luego la válvula de la tolva de almacenamiento hasta que termine la descarga de la materia prima. Al terminar la descarga el mecanismo regresa al punto superior por efecto del resorte, donde se cierran las válvulas del mezclador y de la tolva de almacenamiento.

El esquema se presenta en la Figura 3.15.

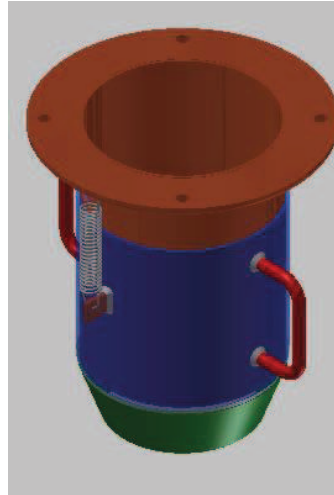


Figura 3.15. Mecanismo de descarga al mezclador

Resultado

Carrera = 0,07 m, se obtuvo por medio de análisis gráfico.

3.4.6. SISTEMA DE MEZCLADO

Se escogió un mezclador tipo V formado por dos cilindros cortados lateralmente y una pirámide truncada, con un orificio de carga y descarga el esquema se muestra en la Figura 3.16.

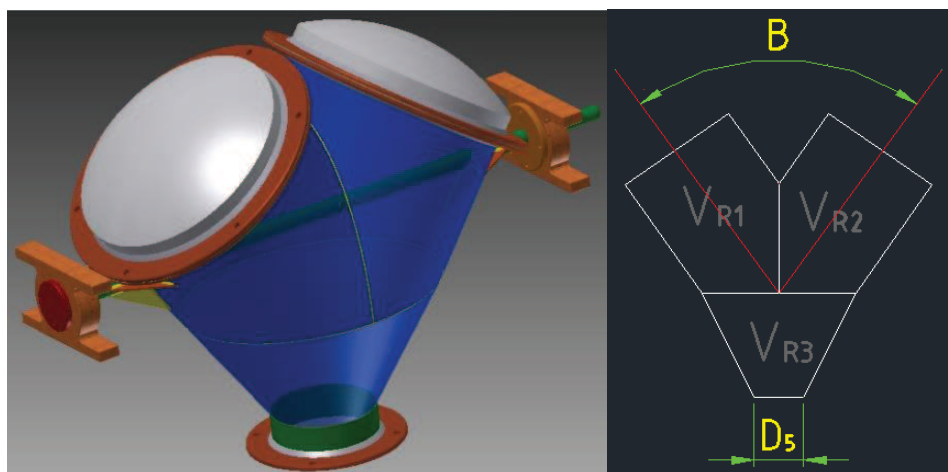


Figura 3.16. Mezclador de tipo V

Donde:

V_{R1} : volumen del recipiente 1

V_{R2} : volumen del recipiente 2

V_{R3} : volumen del recipiente 3

β : ángulo formado por los ejes de los cilindros laterales

D_5 : diámetro de carga

Parámetros considerados para el diseño:

- Cantidad de materia prima a mezclar (W_M)= 7,50 kg
- Densidad promedio de las materias primas (δ_{MP})= 1,10 kg/L
- Ángulo formado por los ejes de los cilindros laterales (β)= 70°
- Carga total del mezclador (W_{MT})= 12,50 kg considerando un porcentaje de llenado del 60 %.
- Volumen total del mezclador (V_M)= 11,40 L
- Diámetro de carga (D_5)= 0,09 m
- Se asume que $V_{R1} = V_{R2} = 40$ % del volumen total del mezclador y que $V_{R3} = 20$ % del volumen total del mezclador.

Recipiente 1, 2 y 3

En la Figura 3.17 se presentan las dimensiones del recipiente 3 (R_3).

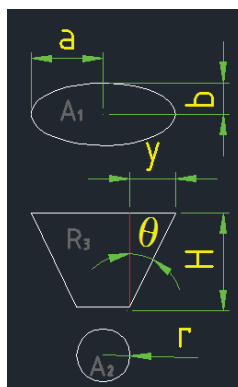


Figura 3.17. Esquema de R_3

Donde:

H: altura del cono de base elíptica

a, b: semiejes de la elipse

r: radio de A_2

A_1 : elipse A_1

Para obtener una ecuación trabajable se utilizaron los ángulos y las dimensiones del cilindro lateral C_1 , el esquema se muestra en la Figura 3.18.

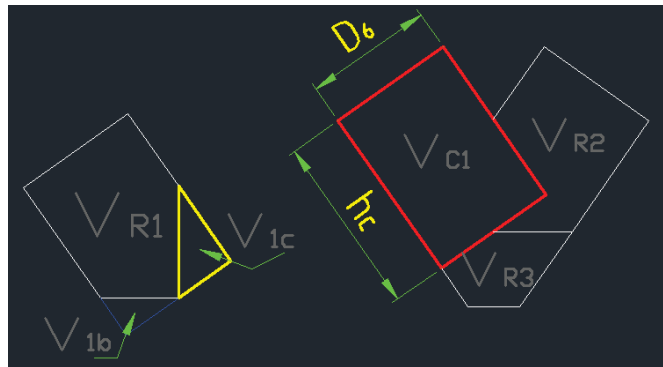


Figura 3.18. Esquema del cilindro C_1

Donde:

V_{C1} : volumen del cilindro 1

h_{1b} : altura de la cuña cilíndrica b

h_{1c} : altura de la cuña cilíndrica c

h_c : altura del cilindro V_{C1}

D_6 : diámetro del cilindro V_{C1}

“b” es semieje de la elipse A_1 , y radio del cilindro lateral, se puede obtener el semieje “a” en función de “b”.

Se obtiene la ecuación [3.3], como se puede ver en el Anexo AIII.

$$V_{R3} = \frac{\pi}{3} \left(\frac{b^2}{\cos \theta} + rb \sqrt{\frac{1}{\cos \theta} + r^2} \right) \left(b \sin \theta + \frac{r}{\tan \theta} \right) \quad [3.3]$$

Se asume un valor de $r = 0,045$ m y a través de la herramienta matemática de Microsoft Excel 2010 (Análisis Si, Buscar Objetivo) se obtiene los resultados como se observa en la Figura 3.19.

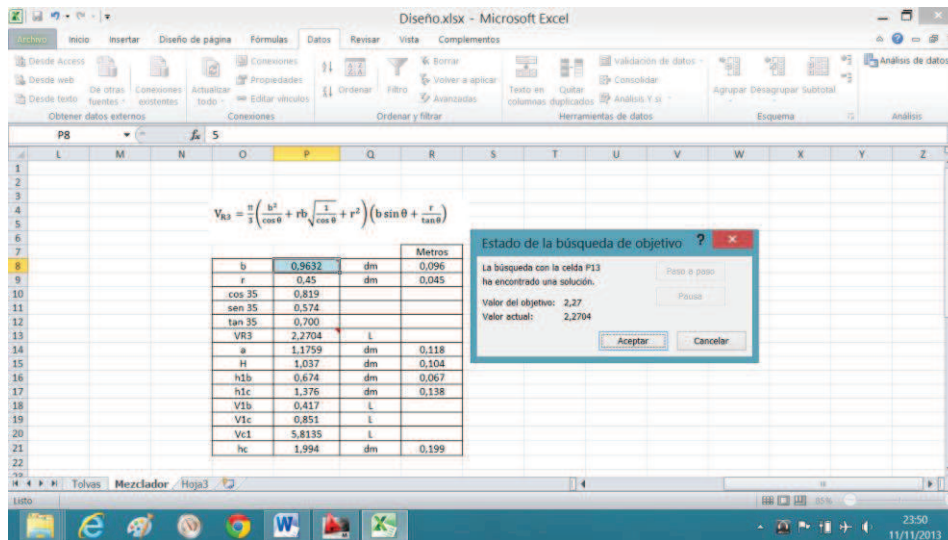


Figura 3.19. Cálculo de b

Resultado

$b = 0,01$ m, $a = 0,12$ m

$H = 0,10$ m

En la Figura 3.20 se muestra un esquema del recipiente R_1 .



Figura 3.20. Esquema del recipiente R_1

Donde:

V_{1b} :volumen de la cuña cilíndrica b

V_{1c} :volumen de la cuña cilíndrica c

Con los valores de b, a y H se determina las dimensiones requeridas, como se presenta en el ejemplo de cálculo del Anexo AIII.

Resultados

$$h_{1b} = 0,07 \text{ m}$$

$$h_{1c} = 0,14 \text{ m}$$

$$h_C = 0,20 \text{ m}$$

$$D_6 = 0,19 \text{ m}$$

$$V_{C1} = 5,816 \text{ L}$$

$$V_{1b} = 0,418 \text{ L}$$

$$V_{1c} = 0,852 \text{ L}$$

3.4.6.1. Determinación del centro de gravedad del mezclador

La posición exacta donde se colocará el eje del mezclador se lo determinó a través del programa Inventor Autodesk, con el cual se encontró el centro de gravedad. El ejemplo de cálculo se presenta en el Anexo AIII.

En la Figura 3.21 se presenta la captura de la pantalla que ejemplifica la utilización del programa y la respuesta entregada.

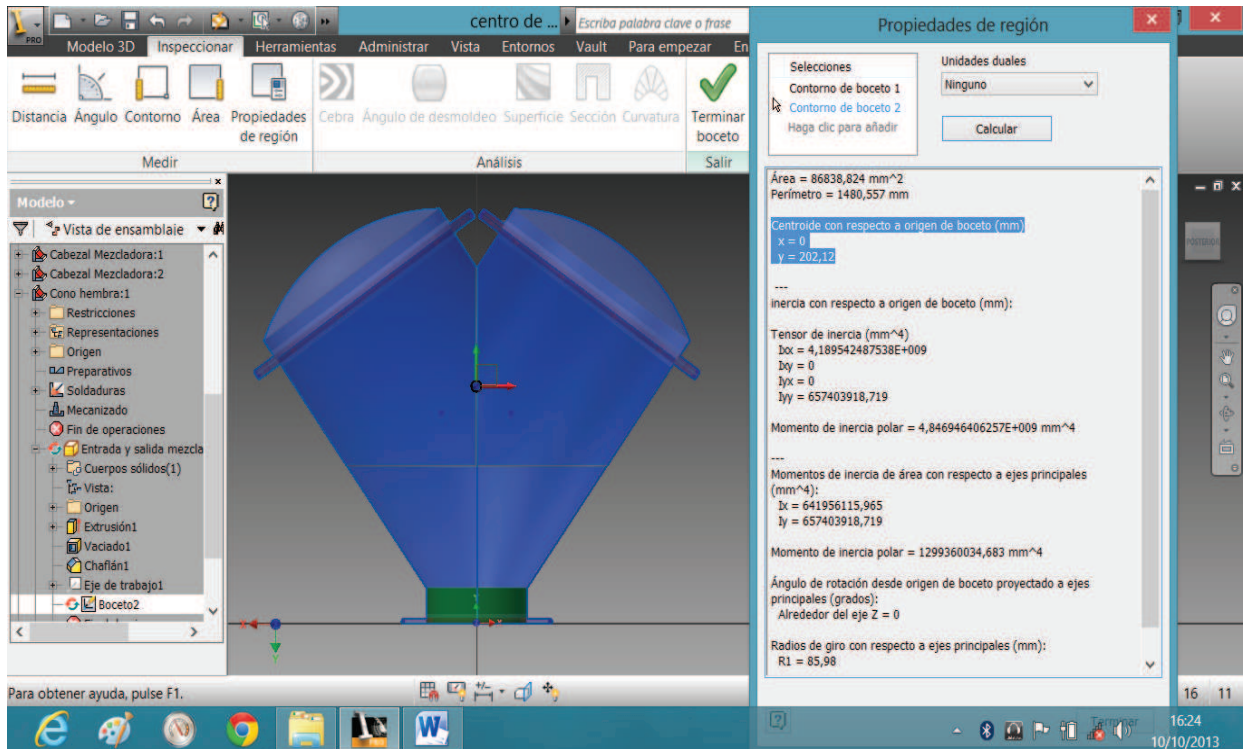


Figura 3.21. Centro de gravedad del mezclador

$$\begin{array}{l}
 x = 0 \text{ m} \\
 \text{Centro de gravedad} \\
 z = 0 \text{ m}
 \end{array}
 \left\{ \text{Centroide} \right\}
 \left\{ \begin{array}{l}
 y = 0,202 \text{ m}
 \end{array} \right.$$

Se obtuvo además la potencia necesaria del mezclador, El ejemplo de cálculo se presentan en el Anexo AIII.

Resultado

$$P = 75 \text{ W}$$

De modo que se concluye que el consumo de potencia para el mezclador diseñado tipo "V" es bajo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

1. Se definió el uso de 10 materias primas como fuentes de los óxidos componentes del esmalte. Los resultados obtenidos permitieron concluir que: el NaF y el Li_2CO_3 tiene influencia directa en la disminución de la temperatura de maduración del esmalte.
2. Los resultados de las pruebas de cocción de los esmaltes con diferentes concentraciones de NaF permitieron definir el rango de utilización de este químico, encontrándose entre 0,10 y 0,27 moles. Fuera de este aparecieron defectos o no se alcanza la temperatura de fusión total.
3. En las mezclas vitrificables preparadas utilizando como parte de sus materias primas bórax y carbonato de litio, se ve que conforme aumenta la concentración de éstas la temperatura de fusión disminuyó, aunque no se logró formular una mezcla con temperatura menor que la de fusión del aluminio.
4. La evaluación del efecto de la relación molar entre los óxidos de boro y de litio dentro de la fórmula molecular de los esmaltes, permitió determinar que con la presencia de los otros componentes no se logró reproducir el eutéctico que aparece en el sistema formado con estos dos óxidos y que según la bibliografía se encuentra a 620 °C.
5. La fusión de la mezcla EF-5 cuya relación $\frac{\text{B}_2\text{O}_3}{\text{Li}_2\text{O}}$ es $\frac{4,34}{1}$ permitió, bajo condiciones de cocción de 600 °C y 10 min, obtener un porcentaje de área vítrea de 49,20 %. El mayor porcentaje de área vítrea se obtuvo a 700 °C y relación entre óxido de boro y óxido de litio de 4,34, el porcentaje de fase vítrea obtenida fue de 89,15 %.
6. Las piezas esmaltadas con el EF-5 a temperatura de maduración de 600 °C y tiempo de 10 min, presentaron superficies brillantes totalmente recubiertas, sin embargo se observaron fisuras.

7. El incremento del óxido de sodio en la fórmula molecular del esmalte EF-5a, de 0,53 a 0,55 moles influyó positivamente en la disminución de fisuras y mejoró la adherencia, sin embargo disminuyó el brillo y aparecen poros.
8. La disminución en moles de Na_2O en la formulación EF-5b y EF-5c de 0,55 a 0,47 y 0,44 respectivamente mejoró el aspecto superficial de la placa se incrementó su brillo pero disminuyó la adherencia y el porcentaje de área recubierta.
9. Una disminución de la cantidad de moles de B_2O_3 en los esmaltes EF-5e y EF-5f de 1,10 a 0,90 y 0,70 provocó una desvitrificación del esmalte, disminuyó la adherencia y la formación de fisuras. Se concluye que la disminución en moles de B_2O_3 y la consecuente del Li_2O no permiten mejorar las características del esmalte.
10. Los defectos comunes que presentaron las piezas esmaltadas fueron la presencia de fisuras, esquirlas, recogidos, poros, falta de brillo, además superficies rugosas. Dichos defectos no pudieron ser corregidos en un 100 %, en el estudio no se llegó a la perfección en los resultados.
11. Se diseñó el sistema de dosificación y mezcla de las 10 materias primas.

4.2. RECOMENDACIONES

1. Ampliar el presente estudio mediante la formulación de nuevos esmaltes con la adición de óxidos capaces de disminuir la temperatura de maduración y aumentar la adherencia.
2. Se recomienda el uso de otras aleaciones de aluminio, y estudiar distintos métodos de limpieza para evaluar el efecto en la adherencia del esmalte con la superficie.
3. Analizar la posibilidad de formular nuevos esmaltes porcelánicos para superficies de aluminio a través del uso de vidrio de desecho con lo que se reduciría su efecto contaminante y se apoyaría al medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Allendes, F. (2007). *Estudio sobre la alimentación de materiales finos en un sistema de transporte neumático horizontal*. (Tesis). Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/62021172/Estudio-sobre-la-alimentacion-de-materiales-finos-en-un-sistema-de-transporte-neumatico-horizontal>(Octubre, 2012)
2. Amitava, M. y Sunirmal, J. (2001). Glass and Glass-Ceramic Coatings, Versatile Materials for Industrial and Engineering Applications. *Bull. Mater. Sci.*, 24(1), 69-77. Recuperado de <http://www.ias.ac.in/matlerscibmsfeb200169.pdf> (Marzo, 2012)
3. Aragón, J. Yugo, M. y Palancar, M. (2005).El flujo en la descarga de sólidos (y II): Un repaso a la metodología del diseño de tolvas. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/busquedadoc?t=El+flujo+en+la+descarga+de+s%C3%B3lidos+%28y+II%29%3A+Un+repaso+a+la+metodolog%C3%ADa+del+dise%C3%B1o+de+tolvas&db=1&td=todo> (Octubre, 2012)
4. Avner, S. (2008). *Introducción a la Metalúrgica Física II y Diseño*. (2da. ed.). México: McGraw-Hill. (Abril, 2013)
5. Bender, J. y Hellerstein, J. (2000). Vidrio, Cerámica y Materiales Afines. Recuperado de http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=vidrio%2C%20cer%C3%A1mica%20y%20afines&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.insht.es%2FInshtWeb%2FContenidos%2FDocumentacion%2FTextosOnline%2FEnciclopediaOIT%2Ftomo3%2F84.pdf&ei=DpTMUaCbBI_29gS93IGQCg&usg=AFQjCNHqdtKRBGVbXjBZmtw305gWDgTG3Q (Abril, 2013)

6. Bunte, C., Zamboni, L., Glassel, M. y Zalzman, D. (2007). *Desarrollo de Aleaciones de Aluminio para Aplicaciones en la Industria Eléctrica*. (Parte I). En 7° Congreso Binacional SAM/CONAMET, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de [http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/CONAMETSAM2007/sam%20conamet%2007/pdf/T%C3%B3pico%2021%20%20Sesi%C3%B3n%20especial%20del%20aluminio/0242%20E%20C%20Bunte%20\(Aluminio\)%20\(P\).pdf](http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/CONAMETSAM2007/sam%20conamet%2007/pdf/T%C3%B3pico%2021%20%20Sesi%C3%B3n%20especial%20del%20aluminio/0242%20E%20C%20Bunte%20(Aluminio)%20(P).pdf) (Abril, 2013)
7. Canepa, L. (2011). Operación de plantas convencionales y de tecnología apropiada. Recuperado de http://www.ingenieriasanitaria.com/web15/manual4/ma4_cap2.pdf (Abril, 2013)
8. Cangas, J. y Chaguamate, C. (2007). *Diseño y Construcción de una Máquina Semiautomática Gravimétrica para el Llenado con Tierra de Bolsas Usadas en Viveros Forestales*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
9. Cantavella, M. (2008). Composición de Esmaltes Cerámicos. Recuperado de <http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=composici%C3%B3n%20de%20esmaltes%20cer%C3%A1micos&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ieselcaminas.org%2Fapuntes%2Fceramica%2Fcomposiciones%2FEsmaltes%2520ceramicos.pdf&ei=05PMUc68HYbq8wTv0IGwCg&usg=AFQjCNFIItAmh7NnhmtS1qZdotJuNicwBg> (Abril, 2013)
10. Cerdeo, J. (2009). Aluminio en Alimentos y Envases. Recuperado de <http://www.asocaluminio.es/DocsPublicos/DocsMedioAmbiente/doc6alimentosyenvases.pdf> (Abril, 2013)

11. Coca, P. (2004). *Manual del Aluminio*. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=BOncbMz-uzAC&printsec=frontcover&dq=manual+del+aluminio&hl=es&sa=X&ei=IVG6Ubl8NrG-4APEIoDACQ&ved=0CC4Q6AEwAA#v=onepage&q=manual%20del%20aluminio&f=false> es del manual del aluminio (Febrero, 2013)
12. DeGarmo, E., Black, J. y Kohser, R. (2002). *Materiales y Procesos de Fabricación*. Recuperado de http://books.google.es/books?id=m2swZYTsrVIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Febrero, 2013)
13. Díaz, A. y Lescano, E. (2012). *Diseño y Construcción de una Máquina Dosificadora de Malvaviscos para la Empresa EMPAG S.A.* (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
14. EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION. (2007). HACIA EL ALUMINIO: Fuerte, ligero y rentable. Recuperado de http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/09/eea_movingup_brochure_es1.pdf (Abril, 2013)
15. Fernández, J. (1989). Características de las materias primas para la fusión de diferentes tipos de vidrios. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 28(6), 449-459. Recuperado de <http://boletines.secv.es/areas/home.php?id=28> (Febrero, 2013)
16. Fernández, J. y Ferrandis, V. (2011). Los compuestos de litio y sus aplicaciones en vidriados, esmaltes y vidrios. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 3(2), 121-140. Recuperado de

http://boletines.secv.es/areas/resultados_busqueda.php (Mayo, 2012)

17. Fernández, P. y Restrepo, O. (2008). Análisis microestructural de una aleación de aluminio A356-T6 en conectores de alta tensión. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, (44), 20-29. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n44/n44a02.pdf> (Febrero, 2013)

18. Ferraro, A. (2006). Enamelling of Aluminium Alloys, With a High Content of Magnesium. Recuperado de <http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=enamelling%20of%20aluminium%20alloys&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CDUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.aluplanet.com%2Fdocumenti%2FInfoAlluminio%2Fleghe%2520smaltabili%2520ing.pdf&ei=W5TMUafSGZDm8wTt3oGYBQ&usg=AFQjCNEoK-yPd4Dk-20CobN7kOBViCQALg> (Mayo, 2012)

19. García, E. (2012). *Diseño y construcción de un prototipo con sistema scada aplicado al control del micro clima y dosificación del producto almacenado en silos.* (Tesis). Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1902/5/04%20Diseno%20construccion%20dosificadores.pdf>(Febrero, 2013)

20. Gennaro, A. (2003). *Remington Farmacia.* Recuperado de <http://books.google.es/books?id=Av4IlsyHqcC&pg=PA252&lpg=PA252&dq=mezcla+de+solidos+Gennaro&source=bl&ots=VnatR1Poec&sig=qphA4coiDxwQvUCc86w9Ym5qeUk&hl=es&sa=X&ei=SmK6UePcJY24AODyIFY&ved=0CDUQ6AEwAQ#v=onepage&q=mezcla%20de%20solidos%20Gennaro&f=false> (Febrero, 2013)

21. Gómez, J. (2011). *Estudio de la relación entre los óxidos de calcio y de circonio sobre la opacidad y de la influencia del óxido de zinc sobre el brillo de esmaltes porcelánicos de segunda capa.* (Proyecto de

titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

22. Gómez, S., Jasso, R., Maldonado, S. y Haro, S. (2008). Mejoramiento de propiedades de aluminio reciclado de latas mediante reciclado de pistones automotrices. *Revista Investigación Científica*, 4(2), 1-7. Recuperado de <http://www.uaz.edu.mx/cippublicaciones/ricvol4num2tom1/Ingenierias/MEJORAMIENTO.pdf> (Febrero, 2013)
23. González, J., Escudero, E., López, V., Simancas, J. y Morcillo, M. (2009). Durabilidad del aluminio desnudo y anodizado en atmósferas de muy diferentes corrosividades .I. Aluminio desnudo. *Revista De Metalurgia*, 40(2004), 259-269. Recuperado de (Marzo, 2013)
24. Guillén, J. (2008). El aluminio en el mundo actual: tecnología, aplicaciones y reciclado. Recuperado de http://ingenierosdeminas.org/documentos/61204_aluminio.pdf (Marzo, 2013)
25. Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2002). *Manufactura Ingeniería y Tecnología*. http://books.google.com.ec/books?id=gilYI9_KKAoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Febrero, 2013)
26. Kirk, R. y Othmer, P. (2005). Enamels, Porcelain or Vitreous. Recuperado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471238961.0514011306012119.a01.pub2/abstract> (Febrero, 2013)
27. Landolt-Börnstein. (1956). *Zahlenwerte und funktionen aus physic, chemie, astronomie, geophysik und technik: Schmelzgleichgewichte und grenzflächenerscheinungen*. Berlín: Springer-Verlag.

28. Leveaux, M., Crevits, N., Lips, K., Schepers, B., Aerts, A. y Verboom, E. (2001). *Bonding of vitreous enamels onto aluminium alloys: the horizon extends*. En 19th International Enamellers' Congress, Venice, Italia. Recuperado de http://www.ieiworld.org/pagine/congress/19/congress_19_09.asp (Octubre, 2012)
29. López, V., Otero, E., Escudero, E. y González J. (2001). *Comportamiento del aluminio anodizado en exposiciones atmosféricas de muy larga duración*. En Jornadas SAM – CONAMET – AAS 2001, Madrid, España. Recuperado de <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/posadas/trabajos/1509.pdf>(Abril, 2013)
30. McCabe, W., Smith, J. y Harriot, P. (2002). *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. (6ta. ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.
31. Mankoc, C. (2007). Flujos en medios granulares en la descarga de silos bajo la acción de la gravedad. Recuperado de <http://dspace.unav.es/dspace/handle/10171/11873>(Octubre, 2012)
32. Marcos, A. (2002). Aluminio. Recuperado de <http://grupos.unican.es/gidai/web/asignaturas/CI/Aluminio.pdf>(Abril, 2013)
33. Morataya, M. (1997). *Diseño y construcción de un mezclador para sólidos de cascos gemelos*. (Proyecto de Titulación). Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis0808_0225_M.pdf (Octubre, 2012)
34. Mulero, M. y Franquesa, R. (2010). Mejora del defecto de pinhole en la porcelana sanitaria. Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10333/2/Mem%C3%B2ria.pdf> (Abril, 2013)

35. Nañez, M. (1998). *Comportamiento de una aleación de aluminio tratada térmicamente bajo carga de compresión*. (Tesis). Recuperado de <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020123025.PDF> (Febrero, 2013)
36. Nisbett, R. y Budynas, J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. (8va. ed.). México: McGraw-Hill. (Abril, 2013)
37. Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, International Aluminium Institute. (2009). *Global Aluminium Recycling: Cornerstone of sustainable Development*. Recuperado de http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/fi0000181.pdf (Abril, 2013)
38. Ortega, H. y Carrillo, D. (2011). *Diseño y Construcción de una Máquina Dosificadora de Masa para la Elaboración de Humitas para la Empresa (DEL VALLE LOJANO)*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
39. Ortolá, S. (2009). *Manual del Aluminio y sus Aleaciones*. Recuperado de <http://ingeneriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/> (Febrero, 2013)
40. Pernich, A. (2010). *Predicción numérica de los campos de tensiones durante el llenado y la descarga de silos de almacenamiento de materiales granulares*. (Tesis Doctoral). Recuperado de http://www.efn.uncor.edu/archivosdoctorado_cs_ingpernichTesis_Doctoral_Adriana_Pernich.pdf (Septiembre, 2012)
41. Ravenet, J. (2004). *Diseño de un silo cilíndrico para el almacenamiento de productos granulares*. (Tesis). Recuperado

dehttp:upcommons.upc.edupfcbistream2099.131801312984(Septiembre, 2012)

42. Rincón, J. (2011). Materias primas para la Industria del Vidrio. Recuperado de [http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=\(Materias%2Bprimas%2Bpara%2Bla%2Bindustria%2Bdel%2BVidrio\)&source=web&cd=1&ved=0CDYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ehu.es%2Fsem%2Fseminario_pdf%2FSEMINARIO_SEM_2_049.pdf&ei=jsHMUdPsLoTY9ATn7oDIDQ&usg=AFQjCNFiP5rFOR2Soq-MJvqW_qYGw_A5XA](http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=(Materias%2Bprimas%2Bpara%2Bla%2Bindustria%2Bdel%2BVidrio)&source=web&cd=1&ved=0CDYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ehu.es%2Fsem%2Fseminario_pdf%2FSEMINARIO_SEM_2_049.pdf&ei=jsHMUdPsLoTY9ATn7oDIDQ&usg=AFQjCNFiP5rFOR2Soq-MJvqW_qYGw_A5XA) (Octubre, 2012)
43. Rodríguez, F., Calles, J. Cañizares, P., López, B., Santos, A. y Serrano, D. (2002). *Ingeniería de la industria alimentaria: Operaciones de procesado de alimentos*. Madrid, España: Síntesis.
44. Romero, J. (2009). *Formulación de una frita de baja temperatura para mejorar el esmalte transparente para piezas terracota en la planta de cerámica CER-ART UTPL*. (Tesis). Recuperado de <http://rapi.epn.edu.ecpage=record&op=view&path%5B%5D=71271> (Septiembre, 2012)
45. Ruiz, E., Delgado, M. y Torralba, J. (2008). Aluminio pulvimetalúrgico: desarrollo y mejora de sus aleaciones y materiales compuestos. *Revista De Metalurgia*, 44(3), 206-215. Recuperado de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewArticle/108> (Octubre, 2012)
46. Saidman, S. y Bessone, J. (2001). *Morfología de ataque del aluminio y sus aleaciones. Efecto de aleantes y variables experimentales*. En Jornadas SAM – CONAMET – AAS 2001, Posadas, Argentina. Recuperado de

<http://www.materialessam.org.ar/sitio/biblioteca/posadas/trabajos/0814.pdf>(Abril, 2013)

47. Sánchez, E., García -Ten, J. y Regueiro, M. (2006). Materias para la industria cerámica española. Situación actual y perspectivas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 45(1), 1-12. Recuperado de [http://boletines.secv.esupload20070220165155.45\[1\]1-12.pdf](http://boletines.secv.esupload20070220165155.45[1]1-12.pdf) (Octubre, 2012)
48. Santos, E. (2011). *Comportamiento térmico de aleaciones de aluminio de la serie 2xxx sinterizadas. Estudio de la influencia de la aleación mecánica y adiciones de SN y TICN*. (Tesis). Recuperado de http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/114141/PFC_final_Enrique_Santos_Sanchez.pdf (Febrero, 2013)
49. Santoyo, F., Guatemala, G., Orozco, I. y Arriola, E. (2010). La válvula-s: modelado del flujo de sólidos granulares utilizando números adimensionales. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(2), 179-188. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62016248005> (Febrero, 2013)
50. Surace, P. (2003). Aluminio. Recuperado de <http://materias.fi.uba.ar/7106/Resumen%200302/Texido/ResumenTPaluminio.pdf> (Febrero, 2013)
51. Valdez, S. (2013). Una amalgama idónea el material compuesto. *Revista de Divulgación Científico Tecnológica del Gobierno del Estado de Morelos*, (37), 1-2. Recuperado de http://hypatia.morelos.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&d=646&Itemid=579 (Febrero, 2013)

52. Vera, R., Schrebler, R., Layana, G., Orellana, F. y Olguín, A. (1998). Corrosión por picaduras del aluminio y de la aleación Al-6201 en soluciones de NaCl. *Comunicación de la Revista de Metalurgia*, 34(3), 268-263. Recuperado de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/793/804> (Febrero, 2013)
53. Vielhaber, L. (2002). *Tecnología de los Esmaltes*. Alemania: Reverté.
54. Vielhaber, L. (2004). Emailliertes Aluminium. *Materials and Corrosion*, 7(3), 125-127. Recuperado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/maco.19560070302/abstract> (Septiembre, 2012)
55. Zimbrón, D. (2004). Método para la elaboración de vidriados libres de plomo para mayólicas. Recuperado de http://www.cipzo.com.mx/portale107_files/downloads/esmaltes_maylica.pdf (Octubre, 2012)
56. Zuriguel, D. (2005). *Flujo y atascos de un medio granular en la descarga de silos*. (Tesis doctoral). Recuperado de http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=flujo%20y%20atascos%20de%20un%20medio%20granular%20en%20la%20descarga%20de%20silos&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Ffisica.unav.es%2Fpublicaciones%2FTesis%2FZuriguel.pdf&ei=K9fIUaG8BJLS9ASv0oGgDg&usg=AFQjCNFdSYITvFTwR-4NYGCP_u73EhJ4pg (Octubre, 2012)

ANEXOS

ANEXO I

CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS PARA ESMALTES PORCELÁNICOS

Para obtener la dosificación de las materias primas necesarias para elaborar los esmaltes porcelánicos, es necesario conocer la composición química y la fórmula molecular.

Tabla AI.1. Fórmula molecular del esmalte EF-5a

Óxidos Modificadores	Moles	Óxidos intermedios	Moles	Óxidos Formadores	Moles
Na ₂ O	0,55	Al ₂ O ₃	0,05	SiO ₂	1,85
K ₂ O	0,11			B ₂ O ₃	1,08
ZrO ₂	0,06				
CaO	0,03				
Li ₂ O	0,25				

Para realizar los cálculos requeridos se partió de la fórmula molecular del esmalte que se desea dosificar.

Se determinó el número de moles necesarias de cada materia prima para formular el esmalte EF-5a. Las moles necesarias de cada uno de los óxidos que componen el esmalte se reportan en la Tabla AI.1.

Ejemplo de cálculo de la cantidad de cada una de las materias primas

- **Cálculo de las moles necesarias del óxido de boro B₂O₃. (Fuente: Bórax y ácido bórico)**



Debido a que la cantidad necesaria de Na_2O es 0,55 no se puede satisfacer toda la cantidad de B_2O_3 con bórax, se debe tomar una cierta cantidad de este y el faltante completar con ácido bórico.

Bórax requerido:

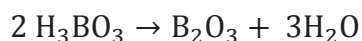
$$0,88 \text{ moles de } \text{B}_2\text{O}_3 \times \frac{1 \text{ mol bórax}}{2 \text{ mol } \text{B}_2\text{O}_3} = 0,44 \text{ moles de bórax.}$$

La cantidad necesaria de B_2O_3 es 1,08 por lo que:

$$(1,08 - 0,88) \text{ moles de } \text{B}_2\text{O}_3 = 0,20 \text{ moles } \text{B}_2\text{O}_3$$

Necesito: 0,20 moles de B_2O_3

Aporte del ácido bórico:



$$0,20 \text{ moles } \text{B}_2\text{O}_3 \times \frac{2 \text{ mol } \text{H}_3\text{BO}_3}{1 \text{ mol } \text{B}_2\text{O}_3} = 0,40 \text{ moles } \text{H}_3\text{BO}_3.$$

Moles de otros óxidos que aporta las 0,88 moles de bórax.

$$0,44 \text{ moles bórax} \times \frac{1 \text{ mol } \text{Na}_2\text{O}}{1 \text{ mol bórax}} = 0,44 \text{ moles } \text{Na}_2\text{O}.$$

– **Cálculo de las moles necesarias del óxido de sodio Na_2O . (Fuente: Bórax, carbonato de sodio y fluoruro de sodio)**

Na_2O que aportó el bórax: 0,44 moles

Necesito: 0,55 moles de Na_2O

Faltan: 0,15 moles de Na_2O

Na_2O que aporta el NaF

$$0,15 \text{ moles NaF} \times \frac{1 \text{ mol } \text{Na}_2\text{O}}{2 \text{ mol NaF}} = 0,08 \text{ moles } \text{Na}_2\text{O}$$

$$0,04 \text{ moles Na}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ mol Na}_2\text{O}}{2 \text{ mol NaF}} = 0,08 \text{ moles Na}_2\text{O}$$

La cantidad de moles de Na₂O que me falta la obtengo del carbonato de sodio.

Faltan: 0,04 moles de Na₂O

Por lo tanto requiero 0,04 moles de Na₂O



$$0,04 \text{ moles Na}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3}{1 \text{ mol}} = 0,04 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3$$

Por lo tanto se requiere 0,04 moles de carbonato de sodio.

Las fuentes para obtener éste óxido son: fluoruro de sodio, bórax y carbonato de sodio.

– **Cálculo de las moles de los óxidos de circonio y de silicio. (Fuente: Zircosil)**

Moles que aporta el zircosil

Moles necesarias de Zr₂O: 0,07

$$0,07 \text{ moles Zr}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ mol zircosil}}{1 \text{ mol Zr}_2\text{O}} = 0,07 \text{ moles zircosil}$$

SiO₂ que aporta el zircosil:

$$0,07 \text{ moles zircosil} \times \frac{1 \text{ mol SiO}_2}{1 \text{ mol zircosil}} = 0,07 \text{ moles SiO}_2$$

Si₂O que aportó el zircosil: 0,07 moles

Necesito: 1,85 moles de Si₂O

Faltan: 1,78 moles de Si₂O

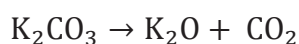
Óxido de silicio. (Fuente: Cuarzo)

Cuarzo requerido: 1,78 moles de SiO₂

– Cálculo de las moles de otros óxidos de la fórmula molecular

Moles del óxido de potasio. (Fuente: Carbonato de potasio)

Necesito: 0,11 moles de K₂O



$$0,11 \text{ moles K}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ mol K}_2\text{CO}_3}{1 \text{ mol K}_2\text{O}} = 0,11 \text{ moles K}_2\text{CO}_3$$

Por lo tanto se requiere 0,11 moles de carbonato de potasio.

Moles del óxido de calcio. (Fuente: Carbonato de calcio)

Necesito: 0,03 moles de CaO



$$0,03 \text{ moles CaO} \times \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{1 \text{ mol CaO}} = 0,03 \text{ moles K}_2\text{CO}_3$$

Por lo tanto se requiere 0,03 moles de carbonato de calcio.

Moles del óxido de aluminio. (Fuente: Alúmina)

Alúmina requerida: 0,05 moles de Al₂O₃ (alúmina)

Moles del óxido de litio. (Fuente: Carbonato de litio)

Necesito: 0,25 moles de Li_2O



$$0,25 \text{ moles } \text{Li}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ mol } \text{Li}_2\text{CO}_3}{1 \text{ mol } \text{Li}_2\text{O}} = 0,25 \text{ moles } \text{Li}_2\text{CO}_3$$

Por lo tanto se requiere 0,25 moles de carbonato de litio.

La cantidad en gramos de cada materia prima se la obtuvo multiplicando la cantidad en moles de cada una por su peso molecular.

Para el caso del Li_2CO_3 :

$$0,25 \text{ moles } \text{Li}_2\text{CO}_3 \times \frac{73,89 \text{ g } \text{Li}_2\text{CO}_3}{1 \text{ mol } \text{Li}_2\text{CO}_3} = 18,27 \text{ g } \text{Li}_2\text{CO}_3$$

Los datos de los pesos registrados de cada una de las materias primas para los esmaltes E-1 hasta EF-5f se presentan en las Tablas AI.2, AI.3, AI.4, AI.5, AI.6, AI.7, AI.8, AI.9, AI.10, AI.11 y AI.12 respectivamente.

Tabla AI.2. Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-1 y E-2

Materia Prima	E-1		E-2	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	12,44	6,84	10,81	5,76
Alúmina	1,39	0,76	1,58	0,84
Bórax	38,39	21,12	30,62	16,32
Carbonato de Calcio	4,90	2,70	5,59	2,98
Carbonato de Litio	0,00	0,00	2,54	1,36
Carbonato de Magnesio	3,01	1,66	3,43	1,83
Carbonato de Potasio	1,15	0,63	1,31	0,70
Cuarzo	22,70	12,49	25,86	13,78
Fluoruro de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00
Zircosil	16,03	8,82	18,27	9,73

Tabla AI.3. Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-A y E-B

Materia Prima	E-A		E-B	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	17,09	9,44	0,00	0,00
Alúmina	1,59	0,88	1,55	0,85
Bórax	21,17	11,69	46,43	25,33
Carbonato de Calcio	3,13	1,73	4,39	2,39
Carbonato de Litio	5,13	2,83	1,13	0,61
Carbonato de Potasio	4,31	2,38	4,21	2,30
Carbonato de Sodio	3,64	2,01	0,81	0,44
Cuarzo	28,74	15,86	26,58	14,50
Fluoruro de Sodio	4,99	2,76	1,10	0,60
Zircosil	10,22	5,64	14,35	7,83

Tabla AI.4. Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-C y E-D

Materia Prima	E-C		E-D	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	17,92	9,10	0,74	0,40
Alúmina	1,67	0,85	1,41	0,75
Bórax	22,29	11,33	44,71	23,92
Carbonato de Calcio	3,28	1,66	4,21	2,25
Carbonato de Litio	5,36	2,72	1,33	0,71
Carbonato de Potasio	4,52	2,30	4,15	2,22
Carbonato de Sodio	1,73	0,88	0,00	0,00
Cuarzo	30,12	15,31	26,36	14,11
Fluoruro de Sodio	2,36	1,20	3,25	1,74
Zircosil	10,76	5,47	13,84	7,40

Tabla AI.5. Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-E y E-F

Materia Prima	E-E		E-F	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	0,73	0,40	30,03	16,08
Alúmina	1,38	0,76	1,57	0,84
Bórax	43,76	24,24	0,59	0,31
Carbonato de Calcio	4,12	2,28	4,43	2,37
Carbonato de Litio	1,30	0,72	7,50	4,02
Carbonato de Potasio	4,07	2,25	4,25	2,28
Carbonato de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00
Cuarzo	25,80	14,29	29,85	15,99
Fluoruro de Sodio	5,30	2,93	7,30	3,91
Zircosil	13,54	7,50	14,49	7,76

Tabla AI.6. Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-G y E-H

Materia Prima	E-G		E-H	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	13,16	7,05	17,52	9,40
Alúmina	1,55	0,83	1,55	0,83
Bórax	26,11	13,98	19,30	10,36
Carbonato de Calcio	4,38	2,35	4,38	2,35
Carbonato de Litio	5,62	3,01	5,61	3,01
Carbonato de Potasio	4,20	2,25	4,20	2,25
Carbonato de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00
Cuarzo	29,53	15,82	29,48	15,82
Fluoruro de Sodio	1,10	0,59	3,64	1,96
Zircosil	14,34	7,68	14,32	7,68

Tabla AI.7. Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-I y E-Ia

Materia Prima	E-I		E-Ia	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	22,25	12,56	3,75	2,04
Alúmina	1,60	0,91	1,92	1,04
Bórax	13,69	7,73	21,54	11,68
Carbonato de Calcio	1,21	0,68	1,44	0,78
Carbonato de Litio	12,65	7,14	15,13	8,20
Carbonato de Potasio	4,35	2,46	5,21	2,82
Carbonato de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00
Cuarzo	34,16	19,28	40,87	22,15
Fluoruro de Sodio	6,16	3,48	5,42	2,94
Zircosil	3,94	2,22	4,72	2,56

Tabla AI.8. Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-Ib y E-Ic

Materia Prima	E-Ib		E-Ic	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	10,55	5,81	19,96	11,27
Alúmina	1,78	0,98	1,60	0,90
Bórax	20,02	11,04	17,92	10,11
Carbonato de Calcio	1,34	0,74	1,20	0,68
Carbonato de Litio	14,06	7,75	12,58	7,10
Carbonato de Potasio	4,84	2,67	4,33	2,44
Carbonato de Sodio	0,00	0,00	0,00	0,00
Cuarzo	37,98	20,94	33,99	19,19
Fluoruro de Sodio	5,04	2,78	4,51	2,55
Zircosil	4,38	2,42	3,92	2,21

Tabla AI.9. Dosificación de las materias primas para los esmaltes E-Id y EF-5

Materia Prima	E-Id		EF-5	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	27,58	15,88	6,76	5,11
Alúmina	1,44	0,83	1,39	1,05
Bórax	16,21	9,33	45,67	34,51
Carbonato de Calcio	1,09	0,62	1,12	0,85
Carbonato de Litio	11,38	6,56	4,99	3,77
Carbonato de Potasio	3,92	2,25	4,06	3,07
Carbonato de Sodio	0,00	0,00	1,03	0,78
Cuarzo	30,75	17,71	29,57	22,35
Fluoruro de Sodio	4,08	2,35	1,72	1,30
Zircosil	3,55	2,04	3,68	2,78

Tabla AI.10. Dosificación de las materias primas para los esmaltes EF-5a y EF-5b

Materia Prima	EF-5a		EF-5b	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	6,77	3,90	10,19	5,78
Alúmina	1,40	0,80	1,40	0,79
Bórax	45,75	26,35	40,69	23,07
Carbonato de Calcio	0,93	0,54	1,74	0,98
Carbonato de Litio	5,00	2,88	5,02	2,85
Carbonato de Potasio	4,07	2,34	4,08	2,32
Carbonato de Sodio	1,07	0,61	0,39	0,22
Cuarzo	29,62	17,06	29,08	16,49
Fluoruro de Sodio	1,72	0,99	1,73	0,98
Zircosil	3,69	2,12	5,67	3,22

Tabla AI.11. Dosificación de las materias primas para los esmaltes EF-5c y EF-5d

Materia Prima	EF-5c		EF-5d	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	13,55	7,67	6,73	3,87
Alúmina	1,40	0,79	1,39	0,80
Bórax	35,35	20,02	46,69	26,84
Carbonato de Calcio	2,03	1,15	1,08	0,62
Carbonato de Litio	5,01	2,84	5,08	2,92
Carbonato de Potasio	4,07	2,31	4,04	2,32
Carbonato de Sodio	1,55	0,88	0,29	0,17
Cuarzo	28,69	16,24	29,48	16,95
Fluoruro de Sodio	1,73	0,98	1,71	0,99
Zircosil	6,63	3,75	3,52	2,02

Tabla AI.12. Dosificación de las materias primas para los esmaltes EF-5e y EF-5f

Materia Prima	E F-5e		EF-5f	
	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)	% w/w	Peso para 40 g de esmalte (g)
Ácido Bórico	7,01	4,04	7,35	4,25
Alúmina	1,45	0,83	1,52	0,88
Bórax	37,86	21,79	28,34	16,39
Carbonato de Calcio	1,57	0,90	1,99	1,15
Carbonato de Litio	4,33	2,49	4,04	2,33
Carbonato de Potasio	4,31	2,48	4,11	2,38
Carbonato de Sodio	6,31	3,63	1,87	1,08
Cuarzo	30,26	17,42	31,33	18,11
Fluoruro de Sodio	1,79	1,03	1,87	1,08
Zircosil	5,12	2,95	6,54	3,78

ANEXO II

DETERMINACIÓN DEL ÁREA VÍTREA DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL ESTUDIO 3.2

Ejemplo de cálculo de la cantidad de área vítrea del estudio 3.2

De las fotos obtenidas del estudio realizado en 3.2 se determinó cuantitativamente la cantidad de área vítrea.

De la muestra EF-1 fundida a una temperatura final de 700 °C se obtuvo la fotografía que se presenta en la Figura AII.1.

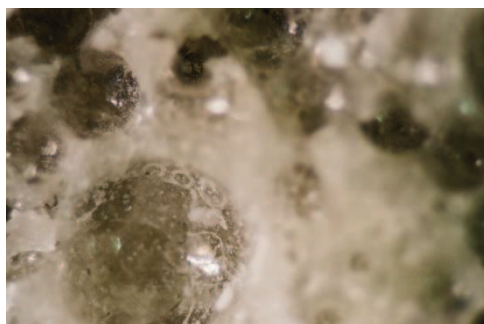


Figura AII.1. Fotografía de la muestra EF-1 con temperatura de fusión de 700 °C

La foto se la importó al programa AUTOCAD y se definió las medidas, como se puede ver en la Figura AII.2.

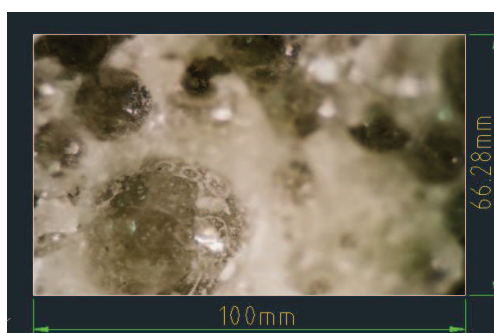


Figura AII.2. Dimensiones de la fotografía de la muestra EF-1 con temperatura de fusión de 700 °C

Se identificó las áreas fundidas y se las delimito con líneas como se ve en la Figura AII.3, el área se obtuvo directamente con un comando llamado área.



Figura AII.3. Áreas vítreas delimitadas de la fotografía de la muestra EF-1 con temperatura de fusión de 700 °C

– **Cálculo del área de la foto de la Figura AII.2**

$$\text{Área total Foto} = 66,28 * 100 = 6,63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

– **Cálculo del área de las partes vítreas como se ve en la Figura AII.3**

$$\text{Área fundida} = 66,28 * 100 = 3,13 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{Porcentaje de Área fundida} = \frac{\text{Área Fundida}}{\text{Área Total}} * 100 \%$$

– **Cálculo del porcentaje de área fundida**

$$\text{Porcentaje de Área fundida} = \frac{3\ 133,57}{6\ 627,83} * 100 \% = 47,28 \%$$

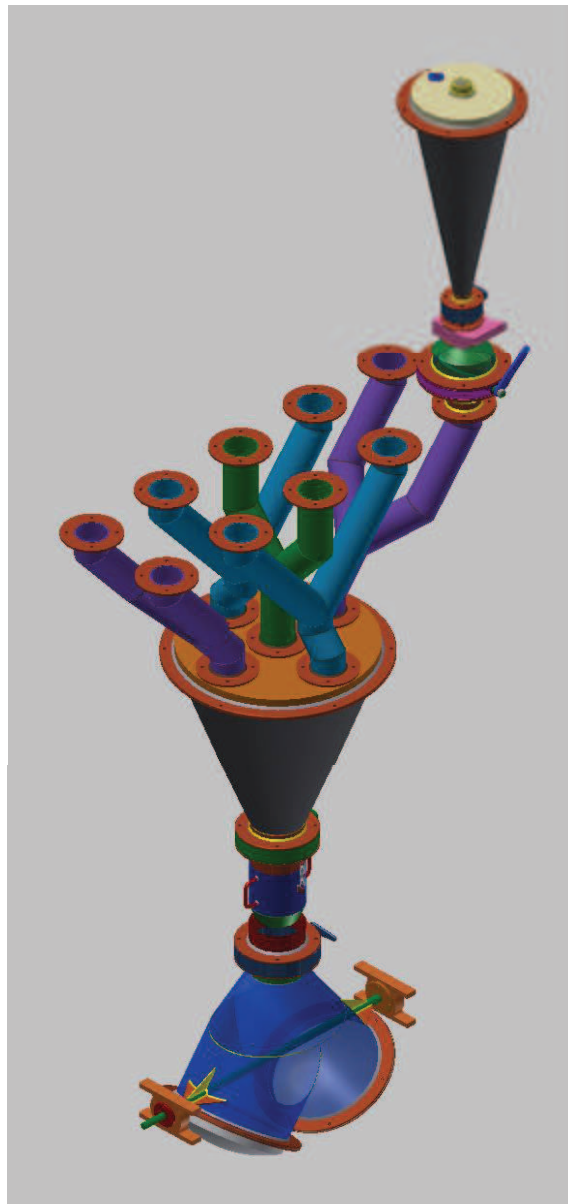
ANEXO III**CÁLCULOS USADOS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE
DOSIFICACIÓN Y MEZCLA DE MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS
EN LA ELABORACIÓN DE ESMALTES PORCELÁNICOS**

Figura AIII.1. Sistema de dosificación y mezcla de las materias primas

DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN Y MEZCLA DE LAS MATERIAS PRIMAS

El diseño del dosificador y del mezclador así como de los demás implementos requeridos, se lo realizó en base a la producción deseada que es de 15 kg/hora de mezcla de materias primas.

En la Tabla AIII.1 se reporta la dosificación de las materias primas utilizadas para obtener la mezcla vitrificable fuente de los óxidos que forman un esmalte porcelánico.

Tabla AIII.1. Dosificación de las materias primas consideradas para el diseño

Materia Prima	EF-5	
	% w/w	Peso para 15 Kg de materias primas
Ácido Bórico	6,76	974,47
Alúmina	1,39	200,93
Bórax	45,67	6 587,79
Carbonato de Calcio	1,12	134,30
Carbonato de Litio	4,99	720,21
Carbonato de Potasio	4,06	585,69
Carbonato de Sodio	1,04	153,47
Cuarzo	29,57	4 265,09
Fluoruro de Sodio	1,72	248,25
Zircosil	3,68	530,57

Ejemplo de cálculo del ángulo medio de las tolvas

Para el diseño de la tolva se determinó el ángulo de fricción de pared para el cemento, ya que en la Figura AIII.2 se requiere de este ángulo para calcular el ángulo medio. Se lo obtuvo de la Tabla AIII.2.

Tabla AIII.2. Ángulos de rozamiento con las paredes y ángulo de rozamiento interno de varios materiales

Material	Angulo de rozamiento con las paredes		Angulo de rozamiento interno	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Harina	30	40	35	45
Cemento	22,5	29	30	40
Cenizas	36	40	35	40
Coque	25	36	37	41
Mineral de hierro	36	40	43	46
Arena seca	27	38	38	45
Piedra machacada	27	38	40	45

(Ravenet, 2004, p. 27)

Ángulo de rozamiento con la pared de 29°.

El ángulo medio de la tolva para geometría cónica se determinó a partir de la Figura AIII.2 (Argón, Yugo, Palancar, 2005, p. 4).

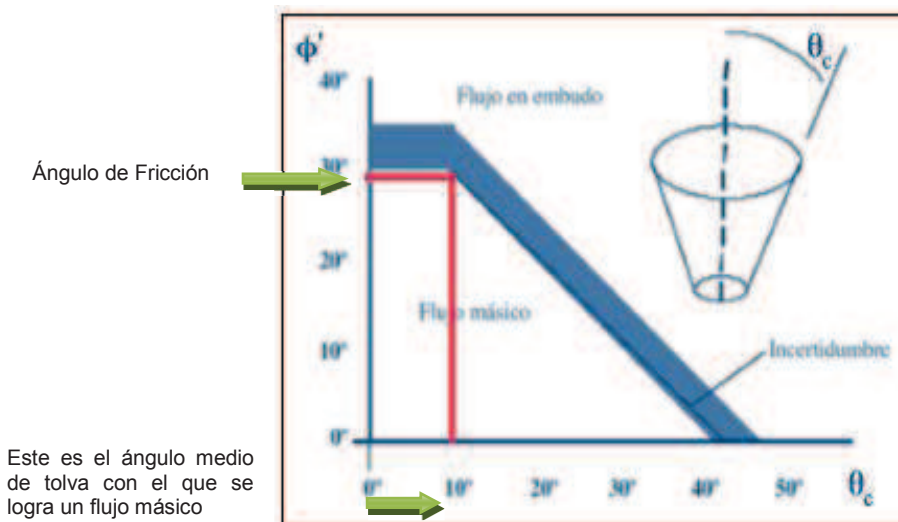


Figura AIII.2. Ángulo medio de tolva para geometría cónica

Debido a que la tolva es cónica y el flujo que se desea obtener es laminar.

Se obtiene un ángulo de 10°.

Ejemplo de cálculo de las dimensiones de la tolva

El esquema de la tolva se presenta en la Figura AIII.3.

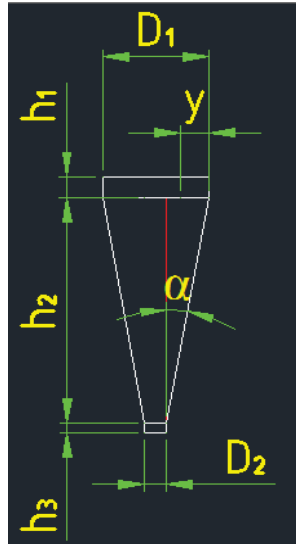


Figura AIII.3. Dimensiones de la tolva

Donde:

- D_1 : diámetro mayor
- D_2 : diámetro menor
- h_1 : altura de la tapa
- h_2 : altura de la tolva
- h_3 : altura de la boquilla
- α : ángulo medio de tolva

Se toma como punto de partida el volumen total requerido que se obtiene a partir de la ecuación [2.1].

Para una carga de 4 kg, el volumen total corresponde a:

$$V_{\text{tot}} = \frac{W_{\text{MPD}}}{\delta_{\text{MP}}} = \frac{4 \text{ kg}}{1,10 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 3,60 \text{ L}$$

Donde:

V_{MP} : volumen total requerido

δ_{MP} : densidad aparente

W_{MPD} : cantidad de materia prima para el diseño

Se asume un diámetro menor de 0,03 m, altura de boquilla 0,02 m y una altura de tapa de 0,02 m.

El (V_T) volumen de la tolva se lo obtiene a partir de la ecuación [AIII.1].

$$V_T = \frac{\pi \times (D_1^2 + D_2^2 + D_1 \times D_2)}{12} \times h_2 \quad [\text{AIII.1}]$$

De la Figura [AIII.3] se deduce:

$$y = \frac{D_1 - D_2}{2} \quad [\text{AIII.2}]$$

$$\tan \alpha = \frac{y}{h_2} \quad [\text{AIII.3}]$$

Por lo que:

$$V_T = \frac{\pi \times (D_1^2 + D_2^2 + D_1 \times D_2)}{12} \times \frac{D_1 - D_2}{2 \tan \alpha} \quad [\text{AIII.4}]$$

Para determinar el valor de D_1 se utilizó la herramienta matemática de Microsoft Excel 2010 (Análisis Si, Buscar Objetivo).

La Figura AIII.4 se muestra la captura de la hoja de cálculo.

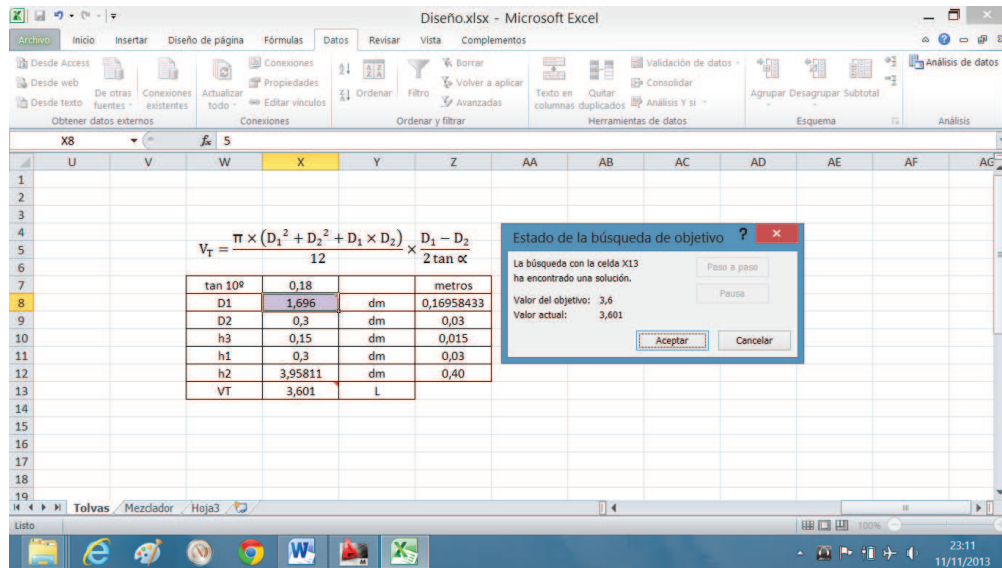


Figura AIII.4. Hoja de cálculo de D_1

$$D_1 = 0,17 \text{ m}$$

El valor de h_2 se lo encuentra a partir de la ecuación [AIII.3].

$$h_2 = 0,40 \text{ m}$$

Las dimensiones de la tolva de almacenamiento se las determinó de manera similar a lo ya descrito para la tolva de dosificación.

Ejemplo de cálculo de las dimensiones del mezclador

Se diseñó un mezclador del tipo en "V".

Los parámetros considerados para el diseño fueron:

- Cantidad de materia prima a mezclar (W_M)= 7,50 kg
- Densidad promedio de las materias primas (δ_{MP})= 1,10 kg/L
- Ángulo formado por los ejes de los cilindros laterales (β)= 70°
- Diámetro de carga (D_5)= 0,90 m

La carga total del mezclador y el volumen total del mezclador se calculó mediante la ecuación [2.2] y [2.3].

$$W_{MT} = \frac{W_M}{f_{LL}} = \frac{7,5}{0,60} = 12,50 \text{ kg}$$

$$V_M = \frac{W_{TM}}{\delta_{MP}} = \frac{12,50}{1,10} = 11,40 \text{ L}$$

Para determinar las dimensiones del mezclador se dividió en 3 partes, como se presenta en la Figura AIII.5.

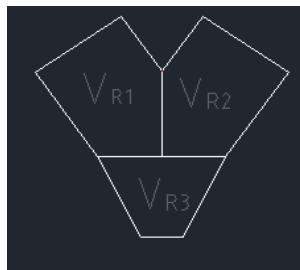


Figura AIII.5. División del mezclador

$$V_{R1} = V_{R2} = 40 \% , V_{R3} = 20 \%$$

$$V_{R1} = V_{R2} = 4,55 \text{ L}$$

$$V_{R3} = 2,27 \text{ L}$$

Ejemplo de cálculo de las dimensiones del recipiente 3

El volumen del cono elíptico se lo obtiene utilizando el esquema de la Figura AIII.6.

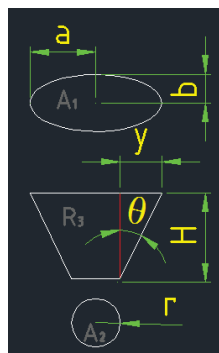


Figura AIII.6. Dimensiones de R₃

Donde:

H: Altura del cono de base elíptica

a, b: semiejes de la elipse

r: radio de A_2

$$y = a - r \quad [\text{AIII.5}]$$

$$\tan \theta = \frac{y}{H} \quad [\text{AIII.6}]$$

$$V_{R3} = \frac{\pi \times (ab + r\sqrt{ab+r^2})}{3} \times H \quad [\text{AIII.7}]$$

Al observar la Figura AIII.6 se deduce que “b” además de ser semieje de la elipse A_1 , es también radio del cilindro lateral por lo que se puede obtener el semieje “a” en función de “b”.

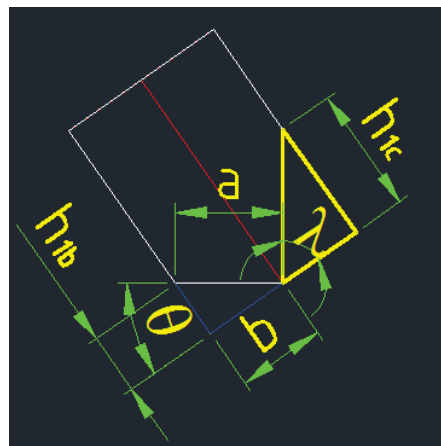


Figura AIII.7. Esquema de las alturas de las cuñas cilíndricas

$$\cos \theta = \frac{b}{a} \quad [\text{AIII.8}]$$

$$V_{R3} = \frac{\pi}{3} \left(\frac{b^2}{\cos \theta} + rb \sqrt{\frac{1}{\cos \theta} + r^2} \right) \left(b \sin \theta + \frac{r}{\tan \theta} \right) \quad [\text{AIII.9}]$$

Se asume que $r = 0,05$ m

Para encontrar el valor de b se utilizó la herramienta matemática de Microsoft Excel 2010 (Análisis Si, Buscar Objetivo).

Resultados

$b = 0,10$ m

$a = 0,12$ m

$H = 0,10$ m

Ejemplo de cálculo de las dimensiones de los recipientes 1 y 2

De la Figura AIII.8 se deduce el volumen de las cuñas cilíndricas:

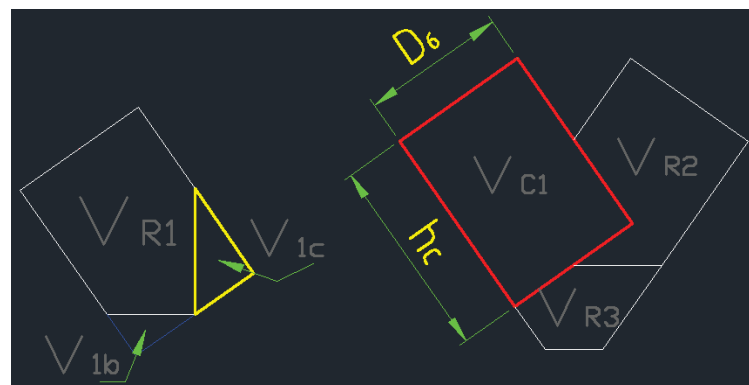


Figura AIII.8. Dimensiones del cilindro C_1

$$V_{C1} = V_{R1} + V_{1b} + V_{1c}$$

[AIII.10]

Donde:

V_{C1} : Volumen del cilindro 1

V_{1b} , V_{1c} : Volumen de las cuñas cilíndricas b y c

h_c : altura del cilindro V_{C1}

d_1 : diámetro del cilindro V_{C1}

El valor de h_{1b} se lo encuentra a partir de la ecuación [AIII.11].

$$\tan \theta = \frac{h_{1b}}{b} \quad [\text{AIII.11}]$$

$$h_{1b} = 0,68 \text{ m}$$

El valor de V_{1b} se lo encuentra a partir de la ecuación [AIII.12].

$$V_{1b} = \frac{2b^2}{3} h_{1b} \quad [\text{AIII.12}]$$

$$V_{1b} = 0,42 \text{ L}$$

El valor de h_{1c} se lo encuentra a partir de la ecuación [AIII.13].

$$h_{1c} = \frac{b}{\tan(\lambda)} \quad [\text{AIII.13}]$$

$$h_{1c} = 0,14 \text{ m}$$

El valor de V_{1c} se lo encuentra a partir de la ecuación [AIII.14].

$$V_{1c} = \frac{2b^2}{3} h_{1c} \quad [\text{AIII.14}]$$

$$V_{1c} = 0,85 \text{ L}$$

El volumen V_{C1} se lo obtiene de la ecuación [AIII.10].

$$V_{C1} = 5,82 \text{ L}$$

La altura h_c se la obtiene a partir de la ecuación [AIII.15]

$$V_{1c} = \pi b^2 h_c$$

[AIII.15]

$$h_c = 0,20 \text{ m}$$

Ejemplo de cálculo del centro de gravedad del mezclador

Se determinó el centro de gravedad del mezclador a través del programa Inventor Autodesk, se delimita el área del cuerpo en el que se desea trabajar y se pone la opción propiedades de la región. Inmediatamente se despliega una pantalla con los resultados como se muestra en la Figura AIII.9.

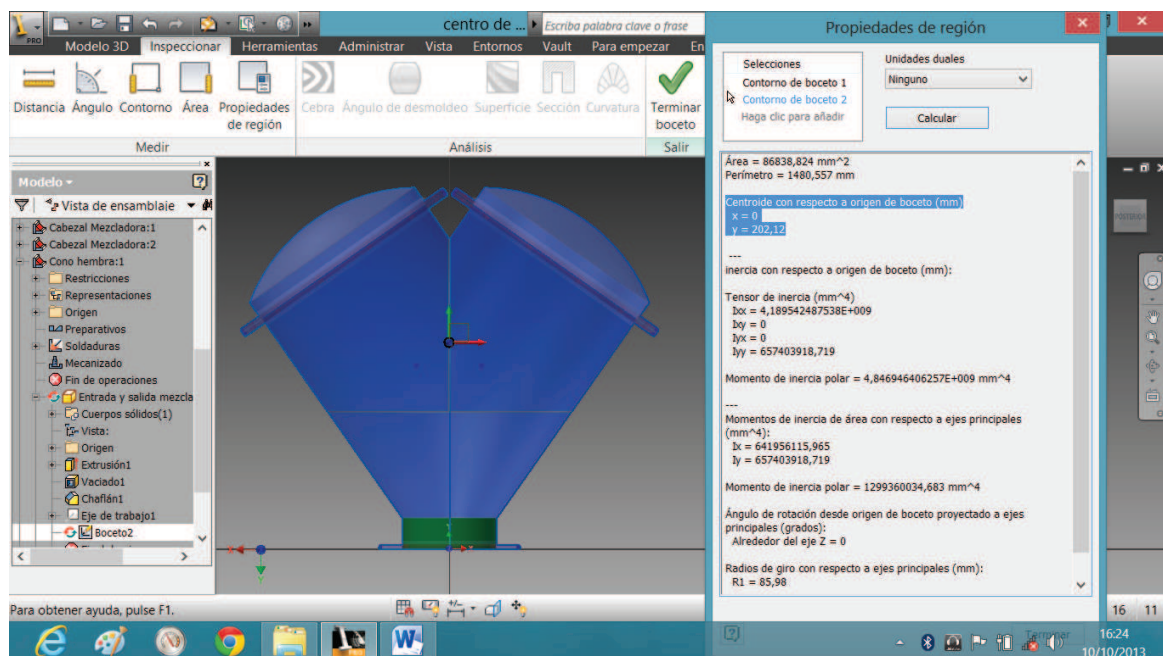


Figura AIII.9. Centro de gravedad del mezclador

Ejemplo de cálculo de la potencia del mezclador

La potencia del mezclador se calculó con la relación teórica que se presenta en (Morataya, 1997, p. 37).

$$P = \frac{5 \text{ kW}}{1000 \text{ kg}} * 15 \text{ kg} = 75 \text{ W}$$

ANEXO IV

PLANO DE CONJUNTO