

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RELACIÓN DE
CONCENTRACIONES DE LOS ÓXIDOS DE SODIO Y DE POTASIO
EN LA COMPATIBILIDAD DE ESMALTES PORCELÁNICOS DE
SEGUNDA CAPA CON LOS DE PRIMERA CAPA**

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

MARÍA FERNANDA LUJE BRIONES

ayudante1ldia@gmail.com

DIRECTOR: ING. LUIS FERNANDO MERA SILVA

luis.mera@epn.edu.ec

Quito, abril 2014

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

DECLARACIÓN

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

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

María Fernanda Lujé Briones

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María Fernanda Lujé Briones, bajo mi supervisión.

Ing. Luis Mera Silva
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PII-DIQ-001-2011, "Reutilización del vidrio de desecho para preparar esmaltes porcelánicos de segunda capa", que se ejecuta en el Departamento de Ingeniería Química.

AGRADECIMIENTOS

*“Yahvé es mi pastor; nada me falta.
En verdes pastos me hace reposar.
Aunque fuese por valle tenebroso,
Ningún mal temería,
Pues Tú vienes conmigo;
Tu vara y tu cayado me sosiegan”*

Salmo 23

Misericordioso es el Señor que en mi derrama bendiciones, gracias Dios Todopoderoso porque eres el que guía mi vida y permite que este gran día llegue, gracias porque me sostienes y me cuidas. Virgen Santísima María gracias porque intercediste por mí para que pueda cumplir esta meta.

Las palabras que pueda escribir quedan cortas para los ángeles gigantes que me han acompañado en esta aventura, a mis queridos Padres: Ricardo y Elen porque con su esfuerzo me enseñaron a luchar y con su amor me enseñaron a perdonar.

A mis suegros: Jorge y M^a Isabel porque cuidaron de mis tesoros mientras luchaba por un sueño, porque los recibieron con amor y con amor los cuidaron.

A mis hermanos Kate, Lili, Mari, Mauri, Cris, Dani, Isra, Vero y mis sobrinos Gabo, Kike, Leo, Rebe, Ainoa porque compartieron el tiempo de sus mamás con mis tesoros.

A mis queridos amigos casi hermanos (casi angeles digo yo...) Ely Manangón, Magy Caiza, Fer Montero, Fer Salazar, Anita Terán, Mariuxi Mejía, Mercedes Cueva, Verito Arcos, Cynthy Espinoza, Silvi Beltrán, Janeth Gómez por su cariño y porque fueron quienes me animaron a seguir, cuando tontamente creí en mis fuerzas y me sentía abatida.

A mis amigos de batalla Pauli Ibújes, Sol Ibaza, Cris Almeida, Sra. Magyta, Eve Criollo, Sra. Verito, Sra. Li, Sra. Ceci, Sra. Sonita, Ing. Naty, Sra. Martita, Javi, Angelita Quishpe, Fer Iza, Majito Rivera, Verito Yopez y Dianita López porque

desde que los conocí no han dejado de preocuparse por mi y sobre todo por sus palabras de aliento en momentos en que pensaba darme por vencida.

Un especial agradecimiento al Ing. Luis Mera por su confianza al abrirme las puertas del laboratorio para la realización de este proyecto. Por la experiencia y tiempo dedicados a la revisión de los resultados del mismo.

A mis tesoros Alejandro, Esteban, Matías y Lucía. Alejito has sido el más valiente de los niños que he conocido y el más generoso con tu tiempo. Desde que te tuve en mi interior fuiste la fuerza que me impulsó a seguir estudiando, porque a pesar de ser tan pequeñito cuando naciste creciste sin el cuidado permanente de tu mamá, porque de esa forma me ayudaste y me animaste...¡¡¡Mil gracias Amor!!!

Estebitan eres el niño más inquieto que conozco y el más cariñoso mi tesoro, gracias porque al igual que tu hermanito te quedaste con la abuelita aun cuando te costo lagrimas por dos semanas. Gracias porque a pesar de no haber estado contigo el amor que tú me das es inmenso. Gracias amor porque cuando estuviste malito me recordaste que Dios es el que da la vida...¡¡¡Mil gracias Tesoro!!!

Chiquitín Matías eres uno de los soles en mi vida, cuando llegaste tenía mucho miedo de lo que podía pasar porque siempre me he sentido inútil ante tantas responsabilidades, gracias precioso porque mientras estuviste dentro de mi me enseñaste a ser paciente, a calmarme, a estar en paz. Porque sigues el legado de tus hermanos de ser valiente y permitirme estudiar. ¡¡¡Gracias mi chiquitín!!!

A mi pequeña Lucía por acompañarme en este tiempo de correcciones, por darme fuerza y nuevamente enseñarme a ser valiente y a retomar mi rumbo porque eres un angelito más en mi vida.

Al amor de mi vida, mi Jorgito, amor gracias por la vida maravillosa a tu lado porque has estado para oírme, consolarme, cuidarme y apoyarme. Porque me enseñas a servir, a ser paciente, a tener paz, a estar alegre. Gracias porque me has apoyado a cumplir mi sueño aún a costa del tuyo. Te amo Jorgito

DEDICATORIA

A Papito Dios y Mamita María por cuidar a mi familia, a mis queridos hijos Alejandro, Esteban, Matías y Lucía por su comprensión y apoyo, a mi esposo Jorge por su amor y paciencia, a mis padres: Elen y Ricardo por sus cuidados y el sacrificio que hicieron por darme lo mejor.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre las propiedades de los esmaltes porcelánicos	1
1.1.1 Introducción de los óxidos de sodio y de potasio en la preparación de esmaltes porcelánicos y efecto sobre el esmalte de primera capa	1
1.1.2 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio a altas temperaturas	4
1.1.2.1 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio en la formación de la intercapa	6
1.1.2.2 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la fusibilidad del esmalte porcelánico	8
1.1.2.3 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la viscosidad del esmalte porcelánico	10
1.1.2.4 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la tensión superficial de los esmaltes porcelánicos	12
1.1.3 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio después de la etapa de maduración	13
1.1.3.1 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la resistencia a la compresión	14
1.1.3.2 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la dureza del esmalte luego de la cocción	17
1.1.3.3 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre las propiedades químicas del esmalte luego de la cocción	19
1.2 Causas y posibles soluciones a defectos en los esmaltados porcelánicos	20
1.2.1 Defectos producidos por errores en la composición química del esmalte: impurezas	20
1.2.2 Defectos por preparación inadecuada del esmalte	23
1.2.3 Defectos producidos en la cocción del esmalte	23
1.2.4 Defectos de desconchado o saltado	24
1.2.5 Defectos de agrietamiento o cuarteado	25
1.2.6 Defectos de separación, arrollamiento o recogido	26
1.2.7 Defectos de manchas mate y pérdida de brillo	27
1.2.8 Defectos por burbujas	28
1.2.9 Defecto de puntillado	29
1.3 Normas para evaluar la calidad de esmaltes porcelánicos	30
2 PARTE EXPERIMENTAL	33
2.1 Materiales y equipos	33

2.2	Esmaltado de placas de acero con capa base	33
2.2.1	Preparación del esmalte porcelánico de primera capa	33
2.2.1.1	Materias primas que se usaron en la elaboración del esmalte de primera capa	33
2.2.1.2	Obtención del esmalte porcelánico de primera capa EB	35
2.2.2	Preparación de las placas de acero	37
2.2.3	Aplicación y cocción del esmalte de primera capa eb	40
2.3	Estudio del efecto de la relacion de concentraciones de los óxidos de sodio y de potasio	42
2.3.1	Formulación, dosificación y preparación de esmaltes de segunda capa con diferente relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$	43
2.3.1.1	Materia primas que se usaron en la elaboración de esmaltes porcelánicos de segunda capa	43
2.3.1.2	Formulación de esmaltes porcelánicos de segunda capa	44
2.3.1.3	Dosificación de materias primas para elaborar los esmaltes de segunda capa	44
2.3.1.4	Preparación de los esmaltes porcelánicos de segunda capa	44
2.3.2	Aplicación y cocción de los esmaltes porcelánicos de segunda capa con diferente relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$	44
2.3.3	Selección de los esmaltes porcelánicos de segunda capa con diferente relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$	46
2.3.4	Determinación de las condiciones de cocción de los esmaltes porcelánicos de segunda capa seleccionados	47
2.4	Determinación de la resistencia al impacto	48
2.5	Determinación de la resistencia al choque térmico	50
2.6	Determinación de la resistencia al ataque químico	51
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
3.1	Estudio del efecto de la relación de concentraciones de los óxidos de sodio y de potasio	54
3.1.1	Formulación de los esmaltes de segunda capa con diferente relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$	56
3.1.2	Dosificación de materias primas para preparar esmaltes de segunda capa con diferente relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$	57

3.1.3	Aplicación de los esmaltes porcelánicos de segunda capa con diferente relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$	59
3.1.4	Cocción de los esmaltes porcelánicos de segunda capa con diferente relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$	60
3.1.5	Selección de los esmaltes porcelánicos de segunda capa con mejores propiedades de acabado luego de aplicar el ciclo de cocción común	75
3.1.6	Determinación del ciclo de cocción de los esmaltes porcelánicos de segunda capa que se seleccionaron	76
3.1.6.1	Determinación de las condiciones de cocción: temperatura y tiempo de maduración	76
3.1.6.2	Efecto de la relación entre los óxidos de sodio y de potasio sobre las propiedades de las superficies con esmalte de segunda capa	98
3.2	Resultados de la determinación de la resistencia al impacto	100
3.3	Determinación de la resistencia al choque térmico	103
3.4	Determinación de la resistencia al ataque químico	104
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
4.1	Conclusiones	106
4.2	Recomendaciones	108

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1	Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre el poder de disolución del mismo sobre el soporte	8
Tabla 1.2	Efecto de los óxidos de un esmalte sobre su intervalo de fusión	9
Tabla 1.3	Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la viscosidad del mismo	12
Tabla 1.4	Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la tensión superficial del mismo	13
Tabla 1.5	Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre el coeficiente de dilatación térmica del mismo	16
Tabla 1.6	Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la resistencia al rayado en los esmaltes porcelánicos cocidos	17
Tabla 1.7	Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de esmaltes sobre la variación de la resistencia a la abrasión en los mismos	18
Tabla 1.8	Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la resistencia a los ácidos en los esmaltes porcelánicos cocidos	19
Tabla 1.9	Efecto de los óxidos de un esmalte sobre la variación de la resistencia al ataque por álcalis en esmaltes	19
Tabla 1.10	Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la resistencia al ataque por agua en el mismo	20
Tabla 2.1	Fórmula molecular del esmalte porcelánico de primera capa EB	33
Tabla 2.2	Materias primas con las que se elaboró esmalte porcelánico de primera capa EB	34
Tabla 2.3	Materiales y equipos utilizados en la preparación de materias primas	34
Tabla 2.4	Materiales y equipos que se usaron en la elaboración del esmalte porcelánico	36
Tabla 2.5	Materiales que se usaron en la limpieza mecánica de placas de acero	38
Tabla 2.6	Reactivos usados para el decapado de placas de acero	39

Tabla 2.7	Materiales que se usaron en la limpieza química	39
Tabla 2.8	Materiales para la aplicación del esmalte porcelánico de primera capa EB	40
Tabla 2.9	Ciclo de cocción CC-CB aplicado a placas con esmalte de primera capa EB	41
Tabla 2.10	Fórmula molecular del esmalte porcelánico de segunda capa E2-7	42
Tabla 2.11	Materias primas para la preparación de esmaltes porcelánicos de segunda capa	43
Tabla 2.12	Ciclo de cocción común aplicado a placas con esmalte de segunda capa	45
Tabla 2.13	Características del Horno mufla	47
Tabla 2.14	Material que se usó en la determinación de la resistencia al impacto	48
Tabla 2.15	Equipo usado en la determinación de la resistencia al choque térmico	50
Tabla 2.16	Materiales para la determinación de la resistencia al ataque químico	51
Tabla 3.1	Nomenclatura de los esmaltes de segunda capa seleccionados para el estudio	55
Tabla 3.2	Moles de los óxidos de sodio y de potasio en los esmaltes de segunda capa	56
Tabla 3.3	Fórmulas moleculares de los esmaltes de segunda capa que se estudiaron	56
Tabla 3.4	Dosificación de las materias primas necesarias para preparar los esmaltes porcelánicos de segunda capa E2-3, E2-4	57
Tabla 3.5	Dosificación de las materias primas necesarias para preparar los esmaltes porcelánicos de segunda capa E2-5, E2-8	58
Tabla 3.6	Dosificación de las materias primas necesarias para preparar los esmaltes porcelánicos de segunda capa E2-9, E2-10	58
Tabla 3.7	Dosificación de las materias primas necesarias para preparar los esmaltes porcelánicos de segunda capa E2-14, E2-22	59
Tabla 3.8	Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-3	61
Tabla 3.9	Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-3	61

Tabla 3.10	Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-4	63
Tabla 3.11	Contenido de óxidos de sodio y de potasio en el esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-4	63
Tabla 3.12	Placa recubierta con el esmalte E2-5	65
Tabla 3.13	Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-5	65
Tabla 3.14	Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-8	66
Tabla 3.15	Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-8	67
Tabla 3.16	Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-9	68
Tabla 3.17	Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-9	69
Tabla 3.18	Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-10	70
Tabla 3.19	Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-10	71
Tabla 3.20	Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-14	72
Tabla 3.21	Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-14	72
Tabla 3.22	Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-22	73
Tabla 3.23	Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-22	74
Tabla 3.24	Puntaje de las propiedades de acabado en los esmaltes de segunda capa luego de aplicar el ciclo de cocción CC-CM	75
Tabla 3.25	Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-5	77
Tabla 3.26	Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-5 a diferentes temperaturas de maduración	79
Tabla 3.27	Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-8	80
Tabla 3.28	Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-8 a diferentes temperaturas de maduración	82

Tabla 3.29	Determinación del tiempo de maduración para el esmalte E2-8 a la temperatura de maduración de 760 °C	83
Tabla 3.30	Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-8 a diferentes tiempos de maduración con una temperatura de maduración de 760 °C	84
Tabla 3.31	Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-10	85
Tabla 3.32	Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-10 a diferentes temperaturas de maduración	87
Tabla 3.33	Determinación del tiempo de maduración para el esmalte E2-10 a la temperatura de maduración de 800 °C	88
Tabla 3.34	Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-10 a diferentes tiempos de maduración con una temperatura de maduración de 800 °C	89
Tabla 3.35	Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-22 con un tiempo de maduración de 10 min	90
Tabla 3.36	Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-22 a diferentes temperaturas de maduración con un tiempo de maduración de 10 min	91
Tabla 3.37	Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-22 con tiempo de maduración de 20 min	92
Tabla 3.38	Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-22 a diferentes temperaturas de maduración con un tiempo de maduración de 20 min	94
Tabla 3.39	Determinación del tiempo de maduración para el esmalte E2-22 a 780 °C	95
Tabla 3.40	Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-22 a diferentes tiempos de maduración con una temperatura de maduración de 780 °C	98
Tabla 3.41	Propiedades de acabado para esmaltes de segunda capa con diferente relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$ para 780 °C y 10 min	99
Tabla 3.42	Placa con esmalte de segunda capa E2-7	101
Tabla 3.43	Condiciones de las pruebas para determinar la resistencia al impacto	101
Tabla 3.44	Placa con esmalte de segunda capa E2-7 sometidas a la prueba de impacto con esfera de 110,4 g	102

Tabla 3.45	Placa con esmalte de segunda capa E2-7 sometida a la prueba de impacto con esfera de acero de 229,7 g	102
Tabla 3.46	Tabla de resultado de la prueba de resistencia al choque térmico	104
Tabla 3.47	Resultado de la prueba de resistencia al ataque químico con ácido cítrico al 6% en ebullición	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1.1 Inclusión del óxido de sodio en estructura de un vidrio de sílice. R representa al catión sodio	2
Figura 1.2 Ejemplo de Ciclo de cocción aplicado a esmaltes porcelánicos	5
Figura 1.3 Esquema de formación de la intercapa	6
Figura 1.4 Adherencia del esmalte porcelánico sobre el soporte metálico	7
Figura 1.5 Variación de la expansión térmica de tres composiciones distintas de fritas porcelánicas en función de la temperatura durante el ciclo de cocción	11
Figura 1.6 Etapas de fusión de un esmalte a través de microscopio de fusión	13
Figura 1.7 Formación de tensiones durante el ciclo de cocción	15
Figura 1.8 Placa con defecto de manchas punteadas por presencia de impureza	21
Figura 1.9 Placa con defecto de Eflorescencia	22
Figura 1.10 Placa con defecto de sobre cocción	23
Figura 1.11 Objeto con defecto de saltado	24
Figura 1.12 Placa con defecto de agrietamiento	25
Figura 1.13 Placa con defecto de separación	26
Figura 1.14 Placa con defecto de piel de naranja	26
Figura 1.15 Placa con defecto de hervido	28
Figura 1.16 Placa con defecto de puntillado	29
Figura 2.1 Horno de atronado que consta de: 1.- Crisol de atronado. 2.-Cámara de atronado.3.- Ventilador. 4.- Tubería de ingreso de la mezcla aire-gas. 5.- Recipiente de cobre. 6.- Tanque de gas.	36
Figura 2.2 Ciclo de cocción aplicado a placas de acero de 3cm x 3 cm, con esmalte porcelánico de primera capa EB en polvo con el horno mufla Wise Therm	41
Figura 2.3 Ciclo de cocción CC-CM que se aplicó a placas con esmaltes de segunda capa	46

Figura 2.4	Horno mufla WiseTherm con placas recubiertas sobre base cerámica	47
Figura 2.5	Impactómetro para determinar resistencia al impacto	49
Figura 2.6	Esquema del equipo para determinación de la resistencia al choque térmico. Elementos: 1.- Termostato Thomas Scientific (Tmax100 [°C] apreciación 2 [°C]) 2.- Base cerámica. 3.- Baño termostático	50
Figura 2.7	Equipo para la determinación de la resistencia al ataque químico con ácido cítrico en ebullición el 6% en peso. 1.- Refrigerante. 2.- Camisa de calentamiento. 3.- Erlenmeyer	52
Figura 3.1	Moles de los óxidos de sodio y de potasio en función de la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}} \right]$	54
Figura 3.2	Placas luego de la prueba de resistencia al choque térmico	103
Figura 3.3	Placas a las que se realizó la prueba de resistencia al ácido cítrico	105

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Dosificación de materias primas para la elaboración de esmalte de primera capa EB	116
ANEXO II	
Cálculo de las relaciones de concentración entre los óxidos de sodio y de potasio	119
ANEXO III	
Dosificación de materias primas para la preparación del esmalte porcelánico de segunda capa	122
ANEXO IV	
Ciclo de cocción (CC-C10) del esmalte de segunda capa E2-7	127
ANEXO V	
Ciclos de cocción de los esmaltes porcelánicos de segunda capa	128
ANEXO VI	
Análisis de adherencia: Ensayo resistencia al impacto por impacto de un objeto esférico	131
ANEXO VII	
Ciclo de temperaturas y tiempos para determinar la resistencia al choque térmico de piezas con esmalte porcelánico	132
ANEXO VIII	
Cálculo de la resistencia al ataque químico: pérdida de peso por área y porcentaje de pérdida por peso de esmalte que se aplicó	133

GLOSARIO

Ciclo de cocción: es la trayectoria térmica que se aplica a un esmalte porcelánico, se representa mediante la gráfica del perfil de temperatura en función del tiempo. (Un aumento de temperatura indica un aumento en la cantidad de calor al que se somete a la pieza) (Amorós, Beltrán, Blasco, Enrique, Escardino, Negre. 1991, p. 1).

Red vítrea (Retículo vítreo): combinación tridimensional de las unidades de óxido formador de vidrio que puede formar una estructura desordenada (Cantavella, 2007, p. 25).

Intervalo de fusión: intervalo de temperaturas en el que se produce el proceso de fusión de la mezcla materias primas (Vielhaber, 2002, p. 2).

Temperatura de reblandecimiento: Es la temperatura inferior del intervalo de fusión a la cual las materias primas inician el proceso de fusión, no se encuentran totalmente líquidas (Vielhaber, 2002, p. 3).

Tiempo de cocción/maduración: es el tiempo en el que se aplica la máxima temperatura del ciclo de cocción al esmalte porcelánico (Amorós et al., 1991, pp. 152, 153, 154).

Temperatura de cocción/maduración: es la máxima temperatura y por ende la mayor cantidad de calor a la que se somete al esmalte porcelánico durante el proceso de fusión del mismo (Amorós et al., 1991, pp. 152, 153, 154).

Solución: es un sistema homogéneo de soluto en el solvente (Buchelli, 2003, p. 83).

Higroscópico: compuesto soluble en agua (Hevia, Centritto, Novaes Bernardín, y Durán, 2002, p. 46).

Frita: es el producto de cocción, atronado y molienda de un vidrio de composición específica que se usa como componente de esmaltes porcelánico (ASTM, 2007, p. 5).

Permeabilidad: es la medida del flujo de un líquido o un gas a través de un material (ASTM, 2007, p. 7).

Vitrificación: es la eliminación y reducción progresiva de la porosidad de una composición cerámica con formación de un vidrio como resultado del tratamiento calórico (ASTM, 2007, p. 10).

Esmalte capa base: es el esmalte de primera capa, se aplica sobre el soporte a esmaltar.

RESUMEN

A través del presente proyecto se estudió el efecto de la variación de las relaciones de concentración de los óxidos de sodio y de potasio en la compatibilidad de esmaltes porcelánicos de segunda capa con los de primera capa.

Se formularon 8 esmaltes porcelánicos con relación entre los óxidos de sodio y de potasio de 3, 4,5, 8, 10, 14 y 22 respectivamente. Se prepararon los esmaltes, aplicaron y cocieron bajo idéntico ciclo de cocción con condiciones de maduración de 820 °C y 10 minutos. La evaluación de la calidad de las superficies logradas permitió seleccionar a los esmaltes E2-5, E2-8, E2-10 y E2-22.

Se determinaron las condiciones de maduración que mejores resultados reportaron los análisis visuales realizados a la superficie lograda con cada esmalte que se seleccionó.

Se determinó que los esmaltes porcelánicos cuya fórmula molecular es similar al esmalte E2-7, lograda en un proyecto anterior (Gómez, 2011) y con relación molar óxido de sodio a óxido de potasio entre 5 y 8 pueden ser utilizados como segunda capa sobre acero recubierto con el esmalte capa base EB por presentar mejora en las propiedades de acabado de las placas esmaltadas.

Se determinó que la adherencia de la capa total del esmaltado que se midió a través de la energía que descarga el impacto de una esfera de acero es de alrededor de 2,59 J y que reporta un choque térmico entre 275 °C y 20 °C. Además de presentar una pérdida de $0,00434 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right]$ por ataque con ácido cítrico al 6%.

INTRODUCCIÓN

El material de mayor uso en la industria, sea esta de petróleo, química, construcción, manufactura, papel, es el acero al carbón sin aleación por su menor costo en comparación con aquellos que si la tienen. El uso de equipos conformados de este material hace necesario, sino imprescindible, procurar mantener sus propiedades físicas, químicas y mecánicas lo más intactas posibles (Port y Herro, 1997, p. 253).

Uno de los procesos por los que propiedades tales como impermeabilidad, fuerza mecánica, integridad dimensional y propiedades físicas de equipos elaborados con acero al carbón se ven afectadas, es la corrosión. Este proceso de deterioro es de especial interés debido a que provoca paradas en plantas de producción, pérdida de productos y eficiencia y contaminación en la línea de producción (Ahmad, 2006, pp. 3, 5).

Una verdadera ingeniería en la elaboración de productos incluye técnicas de diseño que permitan usar materiales que eviten o ralenticen la oxidación del material (corrosión). Actualmente, la investigación de formas de protección se encuentra enfocada en la aplicación de materiales de bajo coste como lo son los recubrimientos vitrocerámicos, que usan materias de desecho como virutas, cenizas, desecho de vidrio y que, a la vez, son materiales relativamente nuevos usados en diferentes aplicaciones por sus excelentes características técnicas como elevada resistencia mecánica y química (Hevia et al., 2002, pp. 91, 92).

Las características que los recubrimientos deben poseer para perdurar en el tiempo son poseer una mínima porosidad, alta resistencia al flujo de electrones, baja velocidad de difusión y alta adhesión (Ahmad, 2006, p. 7).

La alta adhesión o acople del esmalte porcelánico con el soporte debido a la formación de una intercapa, depende de propiedades como viscosidad, tensión superficial, temperatura y tiempo de maduración. La adherencia del esmalte sobre el soporte puede estimarse por el coeficiente de dilatación térmica que varía por la

composición de las materias primas.

El óxido de sodio modifica la red vítrea disminuyendo su temperatura de ablandamiento, en exceso incrementa la dilatación térmica y disminuye la elasticidad. Por otro lado, el óxido de potasio tiene un efecto menos intenso que el de sodio por lo que suele usarse para la elaboración de esmaltes más viscosos (Hevia et al., 2002, pp. 25, 133; Vielhaber, 2002, p. 77).

En ese sentido el presente estudio permitió formular esmaltes en los que se pudo determinar experimentalmente el efecto que produce la variación de la proporción de estos óxidos en un esmalte porcelánico de segunda capa. A la vez, dentro de esa formulación se usó como parte de la materia prima vidrio de desecho de botellas consideradas de descarte, para contribuir a la creciente tendencia actual de reciclar.

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 EFECTO DE LOS ÓXIDOS DE SODIO Y DE POTASIO SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS

Los óxidos de sodio y de potasio ingresan en la red vítrea como modificadores, deformándola y permitiendo que la misma se relaje, por ello la concentración de estos influye tanto en las propiedades químicas como físicas del esmalte.

1.1.1 INTRODUCCIÓN DE LOS ÓXIDOS DE SODIO Y DE POTASIO EN LA PREPARACIÓN DE ESMALTES PORCELÁNICOS Y EFECTO SOBRE EL ESMALTE DE PRIMERA CAPA

El esmalte porcelánico es una masa vítrea con alta viscosidad compuesta por una mezcla de óxidos inorgánicos, que se adhiere a la superficie del metal por un proceso de fusión o sinterizado. Puede formar una o varias capas más fusibles que el soporte que protege sin dañar su estructura, mejorando aspectos tecnológicos (impermeabilidad, resistencia mecánica y química), estéticos (textura, acabado y brillo) y funcionales (fácil limpieza). Por ello es un material especializado de ingeniería y de aplicación industrial (Majumdar y Jana, 2001, p. 70; Vielhaber, 2002, p. 1; Nebot, 2001, pp. 14-17).

La mezcla de materias primas contiene componentes no combinados químicamente que a altas temperaturas actúan como una solución y, al enfriarse, solidifican como mezcla sobre-enfriada conformada por una o varias fases inmiscibles.

Existen innumerables materias primas que se usan en la elaboración de esmaltes. Se debe considerar que las impurezas que contengan o se introduzcan en la molienda pueden afectar las características del acabado de las piezas esmaltadas. Las materias primas aportan óxidos, los que se pueden agrupar por la función que realizan en el esmalte (Hevia et al., 2002, p. 15, 21; Pagliuca, 2008, p. 2; Vielhaber, 2002, p. 3).

Entre ellos se citan los óxidos formadores que, por si solos, pueden formar una red vítrea, y los óxidos modificadores que pueden actuar como opacificantes, adhesivos, fundentes, etc.

Los óxidos fundentes son aquellos que aceleran el proceso de sinterización y maduración puesto que tienen mayor facilidad para relajar la red vítrea. Entre estos óxidos se encuentran los que pertenecen a los elementos alcalino y alcalino térreos, que además disminuyen la temperatura de reblandecimiento del esmalte (Cantavella, 2008, p. 11; Forsbacka, 2007, p. 4).

Óxido de Sodio (Na_2O)

Modifica el retículo vítreo insertándose entre los tetraedros de la sílice porque rompe la red parcialmente, disminuye la cohesión y estabilidad de modo que la estructura se relaja como se observa en la figura 1.1, y disminuye el punto de ablandamiento y fluidez del esmalte. En exceso, limita el intervalo de fusión, disminuye elasticidad y resistencia a los ácidos, al rayado y a los agentes atmosféricos.

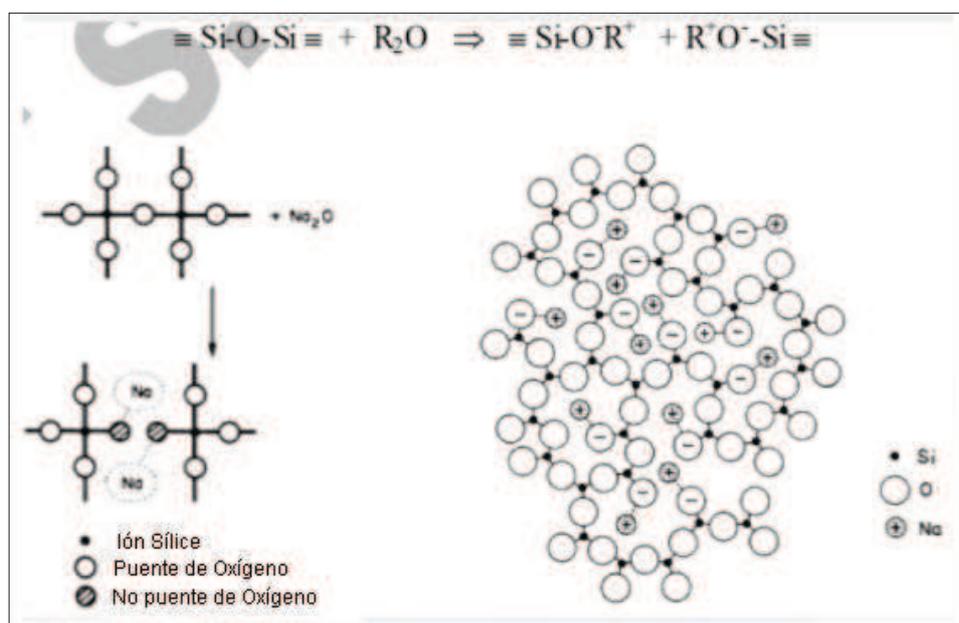


Figura 1.1 Inclusión del óxido de sodio en estructura de un vidrio de sílice. R representa al catión sodio (Cantavella, 2007, p. 25)

Se introduce a través de carbonatos, nitratos, cloruros de sodio o bórax. Recientemente se ha determinado que se puede aportar con otras materias primas como basalto, diatomitas, tobas, ceniza volcánica o vidrio de desecho molido (Hevia et al., 2002, p. 24; Hevia, 2006, pp. 14-22, 25-39; León, 2009, p. 138).

Óxido de Potasio (K_2O)

Tiene un efecto parecido al óxido de sodio pero menos fuerte, se usa si se requiere un esmalte más viscoso y con un intervalo de cocción más largo. Esto ocurre porque el ión potasio tiene mayor tamaño que el ión sodio y forma enlaces más fuertes con la estructura vítrea. Se introduce a través de nitratos y carbonatos que al ser solubles e higroscópicos se transforman en fritas.

En la formulación del esmalte el sodio y el potasio se expresan en forma oxídica, porque no se puede obtener una fórmula química; esto debido a las diferentes combinaciones que pueden formar la gran cantidad de materias primas que se usan para su preparación (mezcla de silicatos, boratos, y aluminatos).

Algunas materias primas aportan los álcalis y son altamente higroscópicas (carbonatos de álcalis, bórax), y en ese estado no se distribuyen de manera uniforme. Por ello es necesario fundirlas y enfriarlas bruscamente para obtener la frita, que tiene una composición homogénea (Cantavella, 2008, p. 13; Hevia et al., 2002, pp. 24, 25, 46, 132, 211; Vielhaber, 2002, pp. 1, 3).

En esta etapa de fritado, los óxidos fundentes (sodio y de potasio) permiten que durante el calentamiento se formen fases líquidas que disuelven a las materias primas que no han reblandecido (por ser mas refractarias).

Las materias primas que se usan en el fritado se someten previamente a un proceso de molienda, luego del cual deben poseer un tamaño de partícula homogéneo; de otro modo, en la fusión partículas de mayor tamaño quedarán sin

fundir en el seno del esmalte y afectarán las propiedades finales de la pieza esmaltada.

Los óxidos de sodio y de potasio disminuyen la temperatura de reblandecimiento y varían el coeficiente de dilatación del esmalte que se aplica sobre el metal; una adecuada proporción de ellos logra la transición elástica entre la pieza y el esmalte. Además la adherencia al soporte metálico estará determinada por la cantidad y tipo de óxido de hierro que se queda en la superficie de la pieza, esto ocurre porque reduce al óxido adherente del esmalte a su estado metálico (óxido de níquel o cobalto), mientras el óxido de hierro se disuelve en el esmalte líquido (Baldwin y Feldman 2007, p. 6; Hevia et al., 2002, pp. 22-25; Sánchez, 1994, p. 19; Vielhaber, 2002, p. 31).

1.1.2 EFECTO DE LOS ÓXIDOS DE SODIO Y DE POTASIO A ALTAS TEMPERATURAS

Es necesario definir la etapa dentro del proceso de cocción en la que el esmalte porcelánico se encuentra a altas temperaturas, para ello se establece el ciclo de cocción. Un ejemplo de éste se puede observar en la figura 1.2.

Entre la temperatura ambiente y los 760 °C se produce el calentamiento de la masa vítrea, luego se mantiene a 760 °C para homogeneizar la temperatura en toda la masa del esmalte porcelánico y en el soporte. En esta etapa ocurren procesos de oxidación a 700 °C (etapa 2) que debe concluir antes de que la capa de esmalte sea impermeable a los gases que se forman (Amorós et al., 1991, pp. 153, 114; Cantavella, 2008, p. 5).

A 760 °C se alcanza el reblandecimiento o maduración del esmalte porcelánico. Se mantiene un período con temperatura constante para que toda la masa de esmalte alcance la suficiente viscosidad para distribuirse homogéneamente sobre el soporte, propiedad que se ve favorecida por la presencia del óxido de potasio.

En esta fase del ciclo de cocción el efecto de los óxidos de sodio y de potasio, que se insertaron en la red vítrea durante el fritado, radica en que con el aumento de la temperatura se produce facilidad de distensión de la red vítrea y con ello el proceso de sinterización.

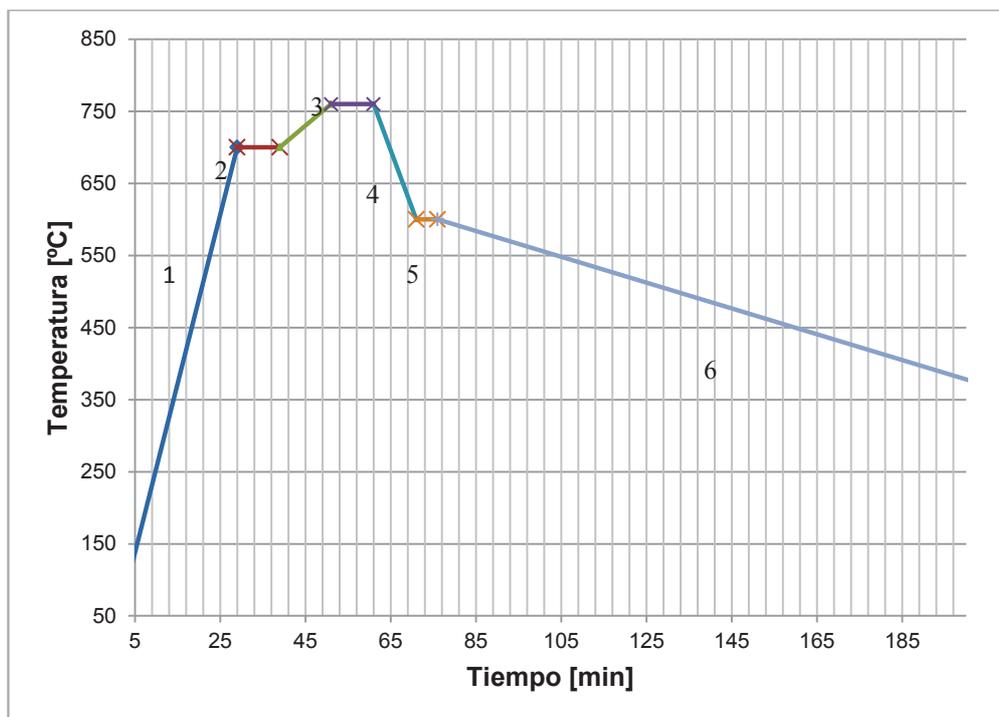


Figura 1.2 Ejemplo de Ciclo de cocción aplicado a esmaltes porcelánicos
(Gómez, 2011, p. 100)

La fusión de la capa de esmalte es la parte fundamental del proceso de esmaltado. Ocurre la reacción de componentes de la mezcla en estado sólido, la eliminación de gases y la homogeneización de la masa fundida (Hevia et al., 2002, p. 144).

Las propiedades de un esmalte a altas temperaturas se las puede deducir a partir de la composición química de las materias primas con que se elaboran, especialmente dando el contenido de los óxidos de sodio y de potasio se pueden establecer límites de adición de las mismas y, con ello, predecir las propiedades. Esto debido a que las fórmulas que se usan no dan resultados exactos, pues necesitan una comprobación experimental (Hevia et al., 2002, p. 145; Vielhaber, 2002, p. 158).

Las propiedades básicas de los esmaltes en estado fundido son la fusibilidad, la viscosidad y la tensión superficial. Además, ocurren fenómenos como formación de la intercapa entre el esmalte fundido y el soporte y volatilización de componentes del esmalte fundido, como pueden ser los óxidos alcalinos de sodio y de potasio en los que dicha evaporación depende de la temperatura y el tiempo de maduración que se apliquen, del resto de la composición y del orden en que reaccionan o funden los componentes del esmalte. De este modo se pueden afectar las propiedades que se esperan en un esmalte (Cantavella, 2008, pp. 6, 7; Hevia et al., 2002, pp. 155, 156).

1.1.2.1 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio en la formación de la intercapa

En las etapas de reblandecimiento y de maduración del esmalte, se produce una reacción química entre éste y la superficie del soporte de modo que se forma una fase intermedia de unión llamada intercapa, que se observa en la figura 1.3. Una excesiva reactividad entre el esmaltado y el soporte puede producir efectos indeseados en la superficie del esmalte.

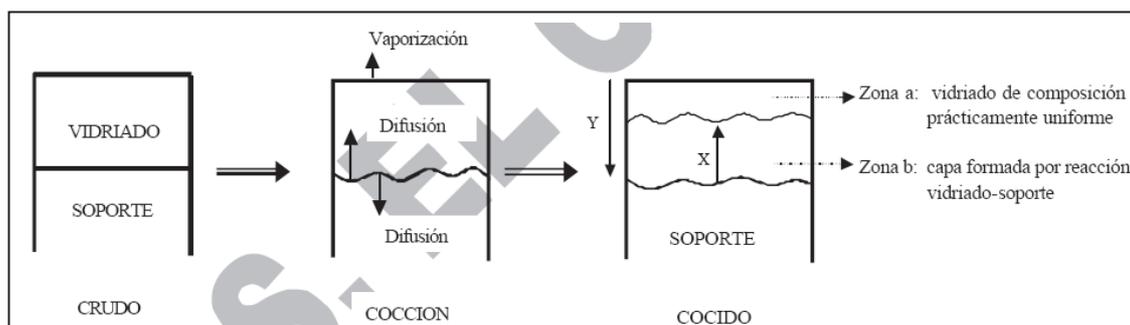


Figura 1.3 Esquema de formación de la intercapa
(Cantavella; 2008, p. 10)

En la intercapa se disuelven los óxidos del esmalte que están en mayor porcentaje y que no se encuentran en el soporte. El incremento en la temperatura de maduración del esmalte provoca una mayor reactividad entre el esmalte y el soporte de modo que esta disolución es mayor, y provoca aumento en el espesor de la intercapa de modo que los óxidos que se encuentran en el soporte se

difunden hacia la capa de esmalte, así se afectan las propiedades de acabado del esmalte por variación en la concentración de óxidos (Cantavella, 2008, pp. 10, 11; Hevia et al., 2002, pp.133, 156, 157).

Cuando el esmalte es la primera capa que recubre el soporte metálico, la intercapa entre el acero y el esmalte se forma como se indica en la figura 1.4 por intercambio iónico.

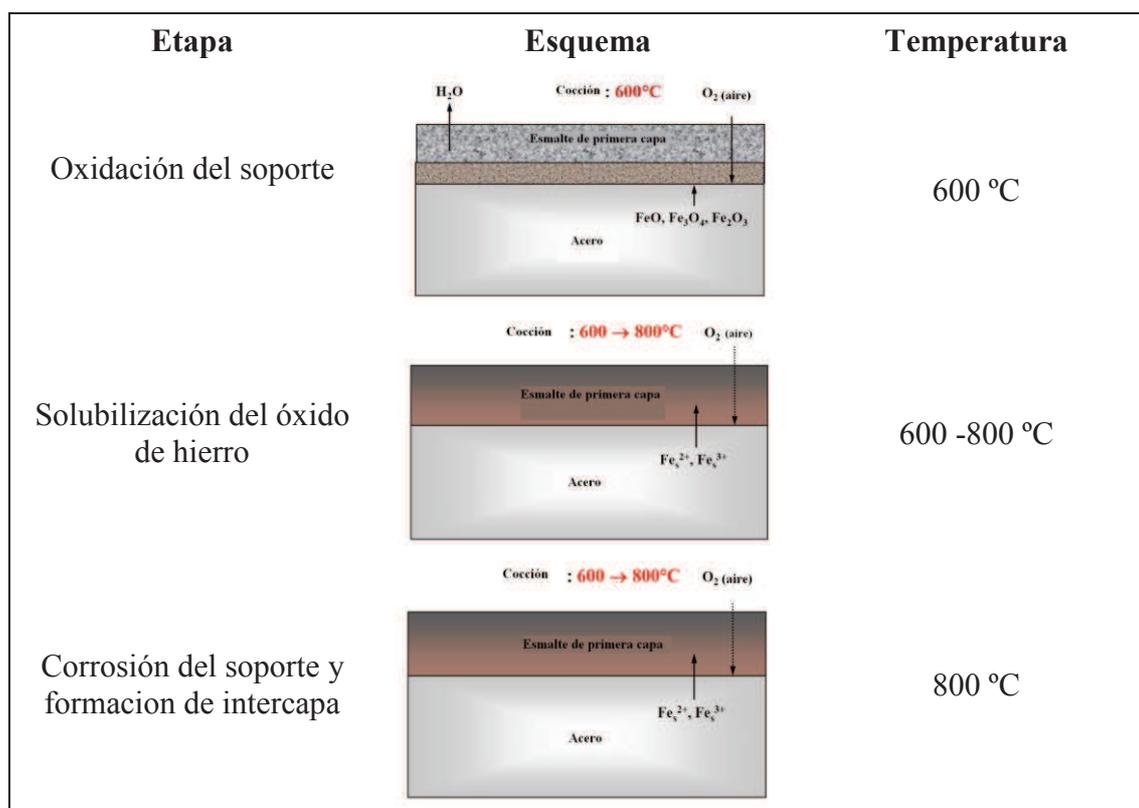


Figura 1.4 Adherencia del esmalte porcelánico sobre el soporte metálico (Pagliuca, 2008, pp. 13, 14, 15)

El espesor de la intercapa que se forma depende de la tensión superficial, viscosidad del esmalte, temperatura y tiempo de maduración.

Para que un esmalte se adhiera adecuadamente debe poseer buena capacidad de mojado, baja viscosidad y buen poder disolvente sobre el soporte.

El efecto de los distintos óxidos sobre el poder de disolución de la capa de esmalte sobre el soporte se observa en la tabla 1.1, en ésta los óxidos se agrupan

según la acción que ejercen: aumentar, disminuir o tener poco efecto sobre la característica mencionada.

Tabla 1.1 Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre el poder de disolución del mismo sobre el soporte

← Poder de disolución		Poder de disolución →
Disminuyen	Poco efecto	Aumentan
Al ₂ O ₃ , SnO ₂ , SiO ₂ , ZrO ₂ , TiO ₂	MgO, ZnO, CaO, B ₂ O ₃	BaO, PbO, K ₂ O, Na ₂ O, Li ₂ O

(Hevia et al., 2002, p. 157)

Se observa que los óxidos de sodio y de potasio aumentan la solubilidad del esmalte sobre el soporte, de ellos el de sodio tiene mayor capacidad de aumentar el poder de disolución del esmalte mientras que el de potasio lo hace con menor intensidad (Hevia et al., 2002, p. 157).

1.1.2.2 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la fusibilidad del esmalte porcelánico

La fusibilidad expresa la capacidad de fluir de un esmalte porcelánico cuando se encuentra en estado líquido, es decir, cuando las partículas sólidas se han disuelto por completo en la fase vítrea fundida (Hevia et al., 2002, p. 145).

Para determinar la fusibilidad del esmalte se miden los puntos de reblandecimiento y de completa fusión, lo que se logra con el método de caída de cono, ensayo de cilindro o de bloque. En estos ensayos la determinación de las temperaturas se realiza mediante observación directa de los cambios de estado, con el uso de termoelementos o por relación con el desplazamiento en superficies cerradas como en el caso del bloque (Vielhaber, 2002, pp. 76, 77).

Si la formulación de un esmalte es compleja por la cantidad de óxidos que posee, entonces disminuye su intervalo de fusión, en comparación con un esmalte cuya composición oxídica es más simple, con menor cantidad de óxidos.

Mientras menor es el tamaño de partícula de las materias primas mayor será la superficie de contacto entre éstas y se necesitará una menor temperatura para que el esmalte fluya, es decir, un menor tamaño de partícula permite una alta fluidez.

La fusibilidad de un esmalte porcelánico depende también de la velocidad de calentamiento, si esta es lenta se producirán las reacciones químicas necesarias a menor temperatura, mientras que con calentamiento rápido se deberán alcanzar temperaturas más altas para que se den las mismas reacciones entre las masas fundidas y las materias refractarias (Hevia et al., 2002, p. 147).

La variación de la fusibilidad del esmalte porcelánico ocurre por modificación de la red vítrea. Cuando se añaden óxidos alcalinos y/o alcalino térreos, aumenta la relación de oxígeno con lo que se distiende el retículo vítreo y baja la temperatura de reblandecimiento. Esto se explica también si se considera que un catión modificador de menor tamaño, como el de sodio, disminuye la viscosidad del esmalte y con ello su intervalo de fusión.

El catión potasio es de mayor tamaño que el de sodio por ende disminuye en menor proporción la temperatura de reblandecimiento del esmalte. Este efecto se confirma en la tabla 1.2, en la que se especifica cómo afectan los óxidos componentes del esmalte a dicha propiedad (Cantavella, 2007, pp. 25, 26; Hevia et al., 2002, p. 146).

Tabla 1.2 Efecto de los óxidos de un esmalte sobre su intervalo de fusión

< Temperatura de reblandecimiento ←		→ > Temperatura de reblandecimiento
Disminuyen	Poco efecto	Aumentan
Li ₂ O, K ₂ O, Na ₂ O, B ₂ O ₃ , PbO, SrO	BaO, ZnO, CaO, TiO ₂	ZrO ₂ , SnO ₂ , MgO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃

(Hevia et al., 2002, p. 212)

Un esmalte de segunda capa o de recubrimiento debe fundir dentro del intervalo de fusión del esmalte de fondo, a una temperatura menor, para que no exista

excesiva disolución de la capa de fondo en el de cubierta (Hevia et al., 2002, pp. 145, 147; Vielhaber, 2002, pp. 29, 76, 77; Wachtman, 2009, pp. 101, 103).

1.1.2.3 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la viscosidad del esmalte porcelánico

La viscosidad es la propiedad del esmalte en estado fundido que se opone al movimiento relativo de porciones inmediatas de fluido produciendo fricción interna y con ella resistencia al flujo. Esta propiedad determina cuánto puede extenderse un esmalte porcelánico a altas temperaturas para formar una capa con espesor homogéneo (Baldwin y Feldman, 2007, .p. 1).

En comparación con un vidrio constituido en su mayoría por sílice que funde a temperaturas cercanas a 1 400 °C los esmaltes de primera capa funden entre 700 °C y 800 °C, esto indica que la fusibilidad de éstos disminuye por la adición de fundentes y por ende la viscosidad. Investigadores consideran que el esmalte al tiempo de cocción debe tener su viscosidad aproximadamente en 4 000 dPa.s (Vielhaber, 2002, p. 29; Kazanov, Nis y Filatova, 1994, p. 35).

Un material vítreo se distingue de uno cristalino en el hecho de que a medida que aumenta la temperatura, cambia al estado líquido paulatinamente a medida que se rompen los enlaces más débiles mientras disminuye su viscosidad, los cristales pasan directamente del estado sólido al líquido. Esto ocurre porque un cristal es un cuerpo cuyos átomos están unidos por medio de enlaces con fuerzas interatómicas similares que con cierta cantidad de energía se rompen al mismo tiempo (Cantavella, 2007, pp. 32, 33; Hevia et al., 2002, p.147).

El esmalte tiene una temperatura de transición vítrea (T_g) en la cual se transforma en líquido sub enfriado; a medida que la temperatura supera este valor la viscosidad disminuye. Se observa en la figura 1.5 para tres fritas porcelánicas con composiciones distintas, que a medida que la temperatura del esmalte es mayor que T_g aumenta la expansión térmica de las mismas (Baldwin y Feldman, 2007, p. 2).

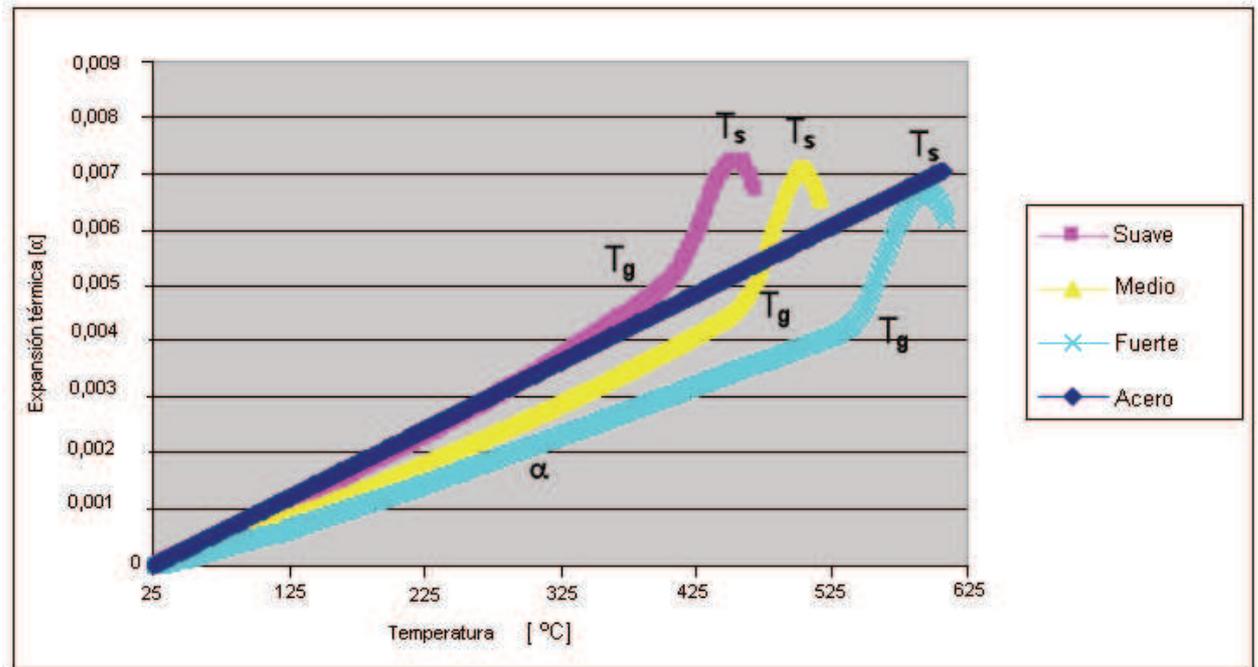


Figura 1.5 Variación de la expansión térmica de tres composiciones distintas de fritas porcelánicas en función de la temperatura durante el ciclo de cocción (Baldwin y Feldeman, 2007, p. 3)

Existen disponibles en el mercado equipos que se usan para medir la viscosidad (viscosímetros) de escorias vítreas fundidas a alta temperatura, sobre los 1 750°C. Un modelo comercial es el viscosímetro Brookfield LVDV-II+ que fue incorporado en un horno a alta temperatura.

La medición de la viscosidad está determinada por la velocidad de rotación de la aguja que se coloca en la muestra, el tamaño y forma de la misma y del crisol en el que reposa la muestra que alcanza el estado líquido en ésta (Forsbacka, 2007, p. 29).

Es posible disminuir la viscosidad de un esmalte si se mantiene la temperatura constante y se aumenta el tiempo de calentamiento, puesto que con esto se logra la ruptura de más enlaces reticulares.

La red vítrea es más estable con mayor número de puentes de oxígeno, esto en vidrios de sílice (tetraedro con todos los vértices compartidos), que explica que tengan alta viscosidad (Hevia et al., 2002, pp. 148, 149).

Los óxidos alcalinos debilitan el retículo vítreo por ruptura de los enlaces entre el oxígeno y el silicio de modo que disminuye la viscosidad de la masa fundida y se disuelven materias primas refractarias.

El óxido de potasio disminuye la viscosidad del esmalte en menor proporción que el óxido de sodio. Esta aseveración se observa en la tabla 1.3, de izquierda a derecha el efecto radica en que el uso de uno u otro óxido dentro de la formulación aumenta la viscosidad del esmalte y en sentido contrario la disminuye (Cantavella, 2007, pp. 25, 32, 33; Hevia et al., 2002, p. 148).

Tabla 1.3 Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la viscosidad del mismo

← < Viscosidad		> Viscosidad →
Disminuyen	Alargan o acortan la curva de viscosidad	Aumentan
Li ₂ O, K ₂ O, Na ₂ O, B ₂ O ₃ , PbO, SrO	BaO, ZnO, CaO, TiO ₂	ZrO ₂ , SnO ₂ , MgO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃

(Hevia et al., 2002, p. 148)

1.1.2.4 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la tensión superficial de los esmaltes porcelánicos

La superficie de un esmalte porcelánico se asemeja a la de un líquido que se comporta como una membrana elástica y tiende a contraerse como esfera. Esto ocurre por la tensión superficial que es la fuerza de cohesión de las moléculas superficiales (Cantavella, 2007, p. 34; Hevia et al., 2002, p. 150).

La capacidad de mojado entre el esmalte y el soporte es una de las características que definen la calidad de la superficie lograda; los esmaltes con alta tensión superficial no se distribuyen adecuadamente sobre el soporte (no mojan la superficie). Esta propiedad puede medirse en forma efectiva por determinación del ángulo de contacto de botones fundidos de esmalte, con el uso del microscopio de fusión con cámara que toma la secuencia de fusión como se muestra en la figura 1.6.

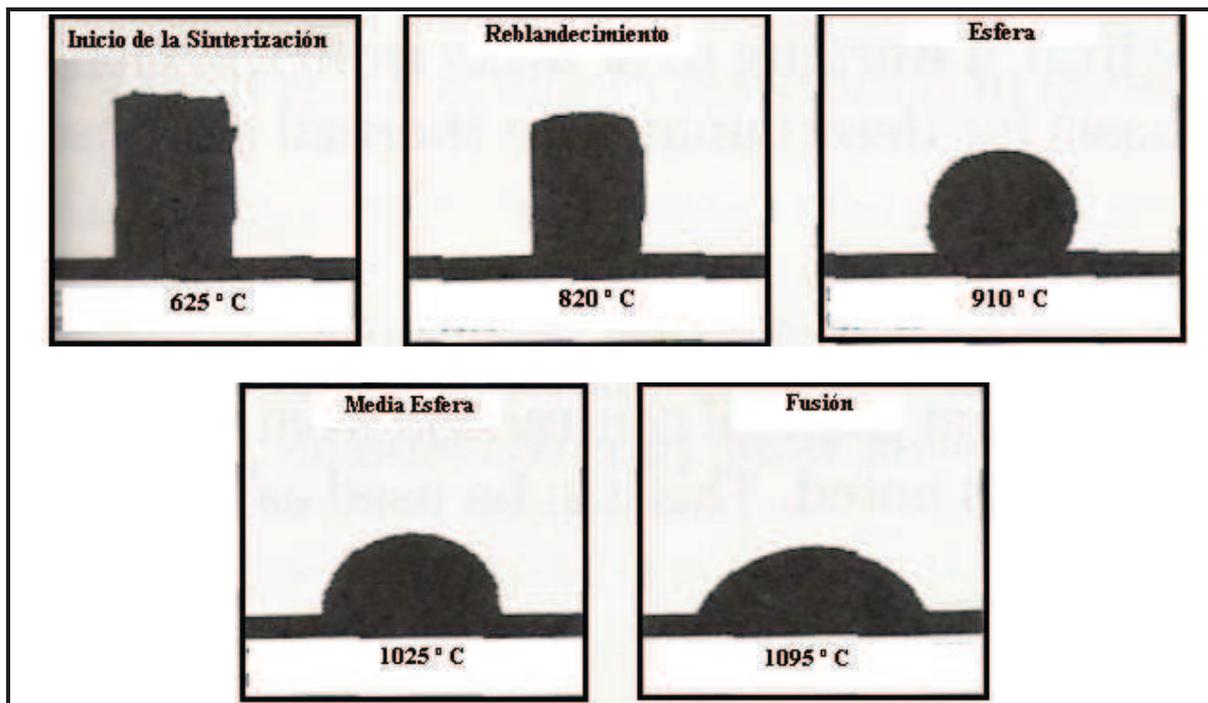


Figura 1.6 Etapas de fusión de un esmalte a través de microscopio de fusión (IEI, 2012, p. 90)

El óxido de potasio por ser más polarizable disminuye la tensión superficial en mayor grado que el óxido de sodio, como se observa en la secuencia del efecto de los óxidos sobre la tensión superficial de un esmalte, de la tabla 1.4 (Baldwin y Feldman, 2007, p. 5; Cantavella, 2007, p. 35).

Tabla 1.4 Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la tensión superficial del mismo

← Tensión superficial		Tensión superficial →
Disminuyen	No afectan	Aumentan
PbO, B ₂ O ₃ , SrO, K ₂ O, Na ₂ O, TiO ₂	SiO ₂ , SrO	BaO, SnO ₂ , CaO, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO

(Hevia et al., 2002, p. 154)

1.1.3 EFECTO DE LOS ÓXIDOS DE SODIO Y DE POTASIO DESPUÉS DE LA ETAPA DE MADURACIÓN

Durante el enfriamiento del esmalte, que es una mezcla de sustancias que actúan como una disolución, éste se solidifica y es posible que se separen porciones de

las sustancias de la mezcla, por lo que se produce un enturbiamiento. Si el enfriamiento es rápido la cantidad de sustancias separadas es menor y la pieza a elevadas temperaturas (previas al enfriamiento) es capaz de resistir el choque térmico.

Durante la primera etapa del enfriamiento, el esmalte permanece en estado viscoplástico por lo que se acopla al soporte. Mientras pierde plasticidad con el enfriamiento, por baja resistencia al choque térmico por cambio de fases como la del cuarzo, es necesario que se enfríe por convección natural para que adquiera rigidez en forma paulatina.

En esta etapa el efecto que tienen los óxidos de sodio y de potasio actúa sobre la compatibilidad de las capas de esmalte sobre el soporte. El efecto de un acople adecuado o no está dado por el coeficiente de dilatación del esmalte que es mayor cuando se adicionan mayores cantidades de óxido de sodio, dicho coeficiente determina el tipo de esfuerzo al que queda sometido el esmalte luego de enfriarse.

Las propiedades que se verifican en la capa de esmalte son: mecánicas, térmicas, superficiales, ópticas y químicas (Amorós et al., 1991, pp. 154, 155; Hevia et al., 2002, pp. 134, 159).

1.1.3.1 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la resistencia a la compresión

Al aplicar calor a un esmalte aumenta la amplitud de la vibración molecular y el distanciamiento entre sus componentes reticulares lo que hace variar sus dimensiones. Este cambio de volumen depende de su composición química y se expresa mediante el coeficiente de dilatación térmica (Hevia et al., 2002, p. 161).

La resistencia mecánica que presenta un esmalte luego de la cocción es producto de las tensiones que se generan con el soporte, y se relaciona con la adherencia de las dos fases. Tal resistencia es adecuada cuando el esmalte al enfriarse

soporta fuerzas de compresión que se generan cuando la distensión del retículo vítreo es menor que la distensión de la red cristalina del soporte (coeficiente de dilatación térmica del esmalte es menor al del soporte) (Baldwin, Evele, Mckinley, 2012, pp. 1-3).

Un esmalte resiste más las fuerzas de compresión que las de tracción, el esquema de estos procesos se observa en la figura 1.7. En esta la línea roja representa el camino térmico que atraviesa la pieza esmaltada a partir del enfriamiento, es decir, representa la temperatura en función del tiempo al que se somete (Vielhaber, 2002, p. 71)

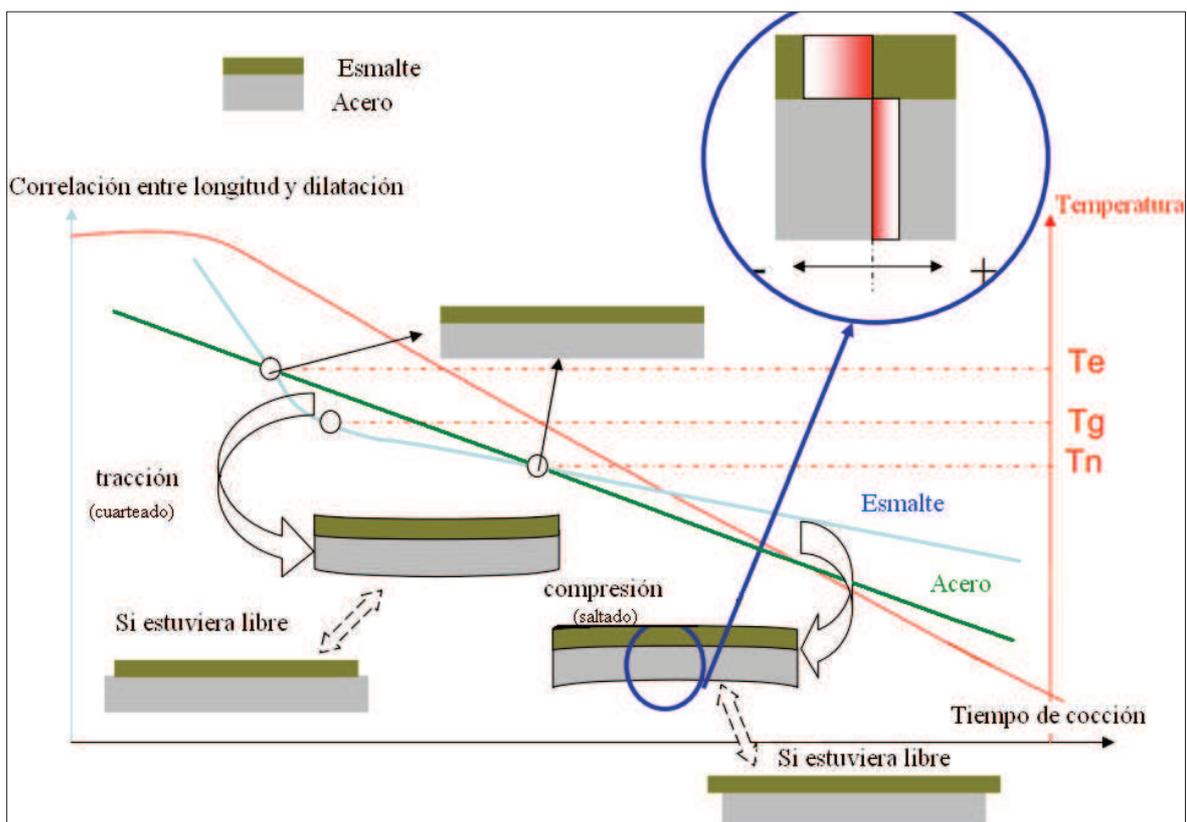


Figura 1.7 Formación de tensiones durante el ciclo de cocción
(Pagliuca, 2009, p. 29)

En el mismo gráfico además se representa la longitud (que es recíproca a la dilatación) en función del tiempo de cocción. La línea verde representa lo que ocurre con el acero (disminución de la dilatación a velocidad de enfriamiento constante) mientras que la línea celeste representa lo que ocurre con el esmalte

porcelánico (disminución de la dilatación a velocidad de enfriamiento alta hasta la temperatura de vitrificación T_g y posterior enfriamiento a menor velocidad).

En el gráfico se observa que a medida que la pieza esmaltada se enfría se producen dos tipos de esfuerzo: tensión con el cual se presenta el defecto de cuarteado donde la dilatación del esmalte porcelánico llega a ser mayor a la dilatación que alcanza el acero en un mismo tiempo durante el enfriamiento y la compresión con la que se produce el saltado, este esfuerzo aparece cuando la dilatación del esmalte es menor (Baldwin, Evele, Mckinley, 2012, pp. 1-3; Hevia et al., 2002, pp.136, 137).

A las temperaturas T_e y T_n las rectas se cortan y tanto esmalte porcelánico como acero tienen la misma dilatación de modo que no existen esfuerzos en la superficie de estos que produzcan defectos por distintas longitudes (dilataciones) que alcanza el conjunto. Es decir, que si los coeficientes de dilatación de la pieza y del esmalte son similares, estas capas mantienen las mismas dimensiones como en el cruce de las líneas verde y celeste de la figura 1.7.

El efecto de la composición química del esmalte sobre el coeficiente de dilatación se puede observar en la tabla 1.5.

Tabla 1.5 Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre el coeficiente de dilatación térmica del mismo

< <u>Coeficiente de dilatación térmica</u>		> <u>Coeficiente de dilatación térmica</u>
Disminuyen		Aumentan
B_2O_3 , SiO_2 , ZnO , P_2O_5 , SnO_2 , ZrO_2	PbO , TiO_2	CaO , SrO , K_2O , Na_2O

(Hevia et al., 2002, p. 212)

Los óxidos alcalinos producen discontinuidades en la red vítrea y la debilitan, como consecuencia de ello disminuyen la resistencia a la compresión por el aumento del coeficiente de dilatación térmica. El catión potasio forma enlaces más fuertes con la red vítrea que el de sodio, lo que aumenta pero en menor

proporción el coeficiente de expansión en comparación con el óxido de sodio (Cantavella, 2007, p. 36; Hevia et al., 2002, pp. 24, 25, 159).

1.1.3.2 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre la dureza del esmalte luego de la cocción

La dureza en una superficie esmaltada se define como la capacidad de resistir el desgaste o la producción de una fisura por contacto con otro material como el acero o uno de mayor dureza como el diamante, puede analizarse midiendo la resistencia al rayado, indentación o abrasión (Cantavella, 2007, p. 36; Hevia et al., 2002, p. 24, 25).

Resistencia al rayado: este ensayo (“scratch test”) permite evaluar la adherencia de los recubrimientos; es un ensayo estático en el que se aplica una carga con un indentador esférico de diamante que se desplaza horizontalmente una distancia corta, y se analiza la densidad de las fisuras frente al rayado.

Luego de este proceso se establece la resistencia al rayado por análisis de la carga, distancia recorrida y por observación de la huella dejada por el indentador con microscopía óptica y electrónica de barrido (Pavón, 2006, pp. 120 - 122).

La variación de esta propiedad según la composición química del esmalte porcelánico se observa en la tabla 1.6. En la misma se observa que los óxidos alcalinos disminuyen la resistencia al rayado; el óxido de sodio en menor proporción que el de potasio.

Tabla 1.6 Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la resistencia al rayado en los esmaltes porcelánicos cocidos

<u>< Resistencia al rayado</u>		<u>> Resistencia al rayado</u>
Disminuyen		Aumentan
K ₂ O, Na ₂ O, Li ₂ O, PbO	B ₂ O ₃	ZnO, SrO, BaO, MgO, Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂ , SiO ₂

(Hevia et al., 2002, p. 214)

Resistencia a la indentación: este ensayo mide la intensidad de fractura en un esmalte porcelánico y las tensiones residuales luego de la indentación. Se analiza mediante el ensayo de dureza Vickers que usa un indentador puntiagudo, generalmente de diamante con diferentes cargas. De este ensayo se obtiene una pieza con una fisura, el daño provocado por ésta se analiza con microscopio óptico, analizador de imagen y microscopio electrónico de barrido (Pavón, 2006, pp. 115, 119, 120).

A más de este método existe la nanoindentación, que permite determinar durezas y módulos de elasticidad, cuenta con instrumentos que registran datos de carga y distancia continuamente.

Resistencia a la abrasión: Es la medida de la resistencia al desgaste que sufre un esmalte y para su determinación se usa un tribómetro con bola de acero de diámetro conocido que gira a velocidad angular constante, con una carga definida en un tiempo determinado.

Se calcula la pérdida de material en el cuerpo esmaltado y en la bola de acero. La determinación de esta propiedad se realiza por observación de la morfología de la huella que deja la bola (Barrena, Gómez, Soria, Menéndez, González, 2002, pp. 526, 527; Hevia et al., 2002, p. 160; Pavón, 2006, p. 124).

El efecto de la composición química sobre la resistencia a la abrasión se observa en la tabla 1.7. De ésta se deduce que los óxidos alcalinos disminuyen la resistencia a la abrasión, de ellos en mayor proporción el óxido de sodio que el de potasio.

Tabla 1.7 Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de esmaltes sobre la variación de la resistencia a la abrasión en los mismos

< Resistencia a la abrasión ←		→ Resistencia a la abrasión
Disminuyen		Aumentan
Na ₂ O, K ₂ O, Li ₂ O, PbO, ZnO, B ₂ O ₃	BaO, SrO	TiO ₂ , CaO, SnO ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , MgO

(Hevia et al., 2002, p. 214)

1.1.3.3 Efecto de los óxidos de sodio y de potasio sobre las propiedades químicas del esmalte luego de la cocción

Ataque por ácidos: tienen un mínimo efecto sobre los esmaltes porcelánicos, el único ácido que destruye la red es el ácido fluorhídrico (Hevia et al., 2002, p. 164).

El ataque se minimiza por sustitución de los iones sodio por iones potasio como se observa en la tabla 1.8. Los óxidos alcalinos disminuyen la resistencia a los ácidos, de entre ellos el que produce menor resistencia es el óxido de potasio mientras el de sodio la debilita con menor intensidad.

Tabla 1.8 Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la resistencia a los ácidos en los esmaltes porcelánicos cocidos

< Resistencia al ataque por ácidos ←		→ > Resistencia al ataque por ácidos
Disminuyen		Aumentan
K ₂ O, Na ₂ O, Li ₂ O, PbO, ZnO	MgO, BaO, CaO	TiO ₂ , SnO ₂ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , B ₂ O ₃ , SiO ₂

(Hevia et al., 2002, p. 213)

Ataque por álcalis: provocan la destrucción de la red vítrea por disolución. Se observa en la tabla 1.9 la variación en la resistencia al ataque de las bases por efecto de la composición química. Los óxidos alcalinos disminuyen la resistencia al ataque por álcalis, de ellos en menor proporción el de sodio (Hevia et al., 2002, p. 165).

Tabla 1.9 Efecto de los óxidos de un esmalte sobre la variación de la resistencia al ataque por álcalis en esmaltes

< Resistencia ataque básico ←		→ > Resistencia al ataque básico
Disminuyen		Aumentan
K ₂ O, Na ₂ O, Li ₂ O, PbO, MgO, ZnO, BaO, CaO	B ₂ O ₃	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂

(Hevia et al., 2002, p. 213)

Ataque por agua: en contacto con agua se produce el intercambio iónico entre los iones alcalinos de la capa superficial del esmalte y del agua, de modo que el esmalte tiene menor resistencia química al ataque en medios alcalinos.

En la tabla 1.10 se observa la forma en que los óxidos alcalinos disminuyen la resistencia y, de entre ellos, en menor proporción el óxido de sodio (Cantavella, 2007, p. 38; Hevia et al., 2002, p. 213; Majumdar y Jana, 2001, p. 75).

Tabla 1.10 Efecto de diferentes óxidos que forman parte de la composición de un esmalte sobre la resistencia al ataque por agua en el mismo

< Resistencia al ataque por agua ←		> Resistencia ataque por agua →
Disminuyen		Aumentan
K ₂ O Na ₂ O Li ₂ O MgO	ZnO	SrO BaO CaO Al ₂ O ₃ TiO ₂ ZrO ₂ SiO ₂

(Hevia et al., 2002, p. 213)

1.2 CAUSAS Y POSIBLES SOLUCIONES A DEFECTOS EN LOS ESMALTADOS PORCELÁNICOS

Las superficies esmaltadas pueden presentar defectos que disminuyen la calidad de la pieza; los más comunes se clasifican según la procedencia, aspectos físicos, frecuencia, gravedad, zona de la pieza afectada o procedimiento de selección (Amorós et al., 1991, p. 22).

Al conocer los procesos de obtención de la pieza y del esmaltado, es posible definir y conocer la causa de algún defecto para reproducirlo, y plantear procesos que permitan su solución.

1.2.1 DEFECTOS PRODUCIDOS POR ERRORES EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ESMALTE: IMPUREZAS

Estos defectos aparecen después de la cocción del esmalte, se deben a la selección incorrecta de las materias primas, mal control de calidad antes y durante el proceso de producción o dosificaciones inadecuadas por no tomar en cuenta la presencia de impurezas (Hevia et al., 2002, p. 178).

Entre las impurezas presentes en la materia prima se encuentran partículas de carbonatos que producen en el esmalte un cráter negro con un halo blanco-amarillento. Se evita al aumentar la molienda y al controlar que la cocción del esmalte sea uniforme.

Las partículas de hierro u óxido de hierro son impurezas que se pueden incluir en la materia prima durante el transporte. El defecto por su presencia se presenta con un punto o pequeños bultos, se previene con el uso de imanes que retengan las impurezas magnéticas. Cuando el hierro se oxida se observan tonalidades rojizas. Otra impureza que puede estar presente es la pirita, produce manchas de color marrón verdosas por calentamiento rápido en atmosfera reductora (Amorós et al., 1991, pp. 49, 51, 53, 56, 57).

Existen defectos no puntuales que se producen por la cocción incompleta de materia orgánica como el llamado corazón negro que se manifiesta por el hinchamiento de la pieza; presenta una gran cantidad de burbujas, posiblemente por la formación de monóxido de carbono en la capa de esmalte.

Se controla por sustitución de materias primas y un adecuado control del ciclo de cocción. Además se pueden producir manchas o coloración indeseada con la posterior condensación de los gases de combustión sobre partes más frías de la pieza esmaltada, como se observan en la figura 1.8 (Amorós et al., 1991, pp. 59-65).

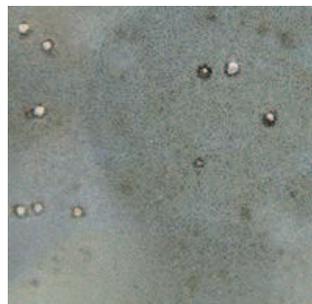


Figura 1.8 Placa con defecto de manchas punteadas por presencia de impureza (CISP, 2010b, p. 6)

Cuando las sales no disueltas salen a la superficie del esmaltado desde el soporte del esmalte, por capilaridad, se produce el defecto conocido como eflorescencia cuyo aspecto se asemeja a la figura 1.9.

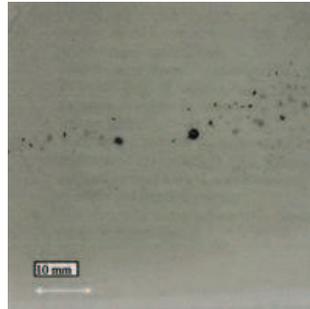


Figura 1.9 Placa con defecto de Eflorescencia
(CISP, 2010a, p. 2)

Las sales no disueltas en el soporte son impurezas presentes en la materia prima o son producto de reacciones químicas durante la cocción que puede ocurrir con los gases desprendidos o por calentamiento suave y presencia de una atmósfera reductora.

La eflorescencia se puede manifestar con manchas amarillentas o marrones, pinchados masivos, puntos negros dispersos o localizados y defectos de adherencia pues presenta zonas donde el esmalte no moja el soporte de modo que permite el saltado o recogido.

Este defecto es un fenómeno típico de esmaltes multicapa y se puede evitar por sustitución de la materia prima problema, o por modificación del ciclo de cocción para evitar un calentamiento suave (Amorós et al., 1991, p. 67; CISP, 2010a, p.1).

Los colores no uniformes se producen por espesor no uniforme de la capa del esmalte. Debido a que las manchas se desarrollan por impurezas se recomienda evitar la contaminación de la pieza o del esmalte por partículas de compuestos orgánicos, o hierro, realizar un correcto proceso de decapado de la pieza y verificar el modo de aplicación del esmalte (Hevia et al., 2002, pp. 178, 204, 205).

1.2.2 DEFECTOS POR PREPARACIÓN INADECUADA DEL ESMALTE

El proceso de molienda tiene lugar en dos partes del proceso de elaboración del esmalte: en la preparación de las materias primas y en la molienda del esmalte atronado.

La presencia de componentes de diferente tamaño cambian los rangos de temperatura del intervalo de fusión y de reacciones químicas, consecuentemente afectan las características diseñadas inicialmente. En el esmalte atronado, la molienda inadecuada tiene efecto sobre el brillo y la tersura (Hevia et al., 2002, pp. 180, 133).

1.2.3 DEFECTOS PRODUCIDOS EN LA COCCIÓN DEL ESMALTE

Los defectos más comunes debidos al proceso de cocción son: aspecto crudo y áspero, cráteres en la superficie, falta de estirado o pinchado cuando la temperatura y/o el tiempo de maduración son menores al correspondiente a la fusión del esmalte (piezas crudas); o en su defecto esmalte corrido, piezas deformadas, pequeñas burbujas o ampollas cuando la temperatura y/o el tiempo de maduración es mayor al adecuado.

Un mal desarrollo del color y falta de brillo en cualquiera de los casos antes mencionados es posible. El aspecto que puede tomar se observa en la figura 1.10 (Cantavella, 2008, p. 56; Franquesa y Mulero, 2010, pp. 13, 14; Hevia et al., 2002, p. 183).



Figura 1.10 Placa con defecto de sobre cocción
(CISP, 2010a, p. 3)

Esmaltes cuyo ciclo de cocción es insuficiente pueden ser sometidos a un segundo ciclo para corregir el defecto. Se recomienda controlar la velocidad de precalentamiento, temperatura y tiempo de maduración, enfriamiento y verificar la atmósfera del horno.

Las ondulaciones sobre la superficie del esmalte ocurren por cristalización de uno o más componentes del esmalte; se puede evitar disminuyendo la viscosidad por modificación de temperatura o tiempo de maduración o bien en la formulación.

Si la ondulación se acompaña de falta de suavidad, se debe a elevada viscosidad o errores en la temperatura o el tiempo de maduración. Ocurre además por la formación de grietas o burbujas que no se han reparado totalmente (Cantavella, 2008, p. 56; Hevia et al., 2002, pp. 133, 180, 202, 203; Vicentiz, 2007, p. 17).

1.2.4 DEFECTOS DE DESCONCHADO O SALTADO

Este defecto constituye el desprendimiento del esmalte. Un ejemplo, como se aprecia en la figura 1.11, ocurre porque el coeficiente de dilatación del esmalte es mucho menor que el del soporte, por exceso de esmalte o por la forma del objeto esmaltado.

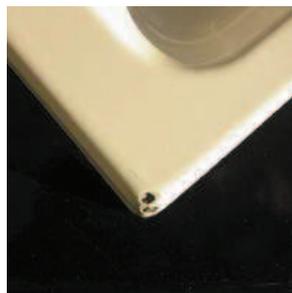


Figura 1.11 Objeto con defecto de saltado
(CISP, 2010b, p. 4)

Se puede evitar aplicando un precalentamiento lento, reducción de la temperatura de maduración o una molienda menos intensa. Si se puede variar la composición

se sugiere cambiar óxidos alcalinos térreos por los alcalinos, y disminuir el contenido de sílice.

Se deben limpiar adecuadamente las superficies porque puede producirse saltado por falta de adherencia en las partes sucias del soporte (CISP, 2010b, p. 4; Hevia et al., 2002, pp. 10, 183-185; Vicentiz, 2007, p. 15).

1.2.5 DEFECTOS DE AGRIETAMIENTO O CUARTEADO

Este defecto se presenta cuando existen tensiones entre el esmalte y el soporte, lo que ocurre cuando el esmalte tiene un coeficiente de dilatación térmica mayor que el del soporte que provoca la formación de las grietas. Un ejemplo se observa en la figura 1.12.



Figura 1.12 Placa con defecto de agrietamiento
(CISP, 2010b, p. 5)

Otro factor que provoca el apareamiento de este defecto es la elasticidad del esmalte, si es poco elástico aunque tenga un coeficiente de dilatación térmica parecido al del soporte tenderá a la formación de grietas. La elasticidad del esmalte mejora con adición de óxido bórico. Para evitar el defecto se sugiere la aplicación de una capa más fina de esmalte y molienda más fina del cuarzo (Hevia et al., 2002, pp. 185, 186).

Cualquier modificación que se haga al esmalte no debe variar la fusibilidad del mismo, pero si lograr un cambio en el coeficiente de dilatación térmica. En última instancia se modificaría la composición química del esmalte mediante el aumento

de cuarzo y/o la disminución de fundentes como los óxidos de sodio y de potasio (Franquesa y Mulero, 2010, p. 11; Hevia et al., 2002, p. 187; Vicentiz, 2007, p. 15).

1.2.6 DEFECTOS DE SEPARACIÓN, ARROLLAMIENTO O RECOGIDO

Consiste en la aparición de zonas no esmaltadas donde se ve el soporte como en la figura 1.13; ocurre durante la aplicación del esmalte que es cuando la capa se puede romper.



Figura 1.13 Placa con defecto de separación
(CISP, 2010a, p. 5)

Al pasar por el ciclo de cocción la grieta se ve afectada por coeficiente de dilatación térmica, alta viscosidad, alta tensión superficial, falta de adhesión al soporte, alta velocidad de calentamiento en el horno, cocción insuficiente, molienda demasiado fina y suciedad del soporte (polvo, grasa, etc.), entre otras causas. Por el aspecto que puede presentar se conoce industrialmente también como piel de naranja como se observa en la figura 1.14 (CISP, 2010b, p. 3; Hevia et al., 2002, p. 190).

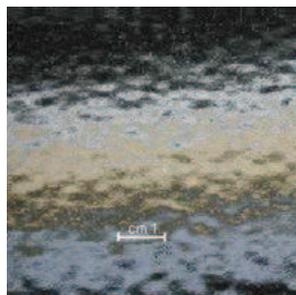


Figura 1.14 Placa con defecto de piel de naranja
(CISP, 2010a, p. 3)

La disminución de la tensión superficial del esmalte fundido mejora sus propiedades como: capa con espesor uniforme y continuo, superficie lisa y brillante, menor cantidad de defectos.

Este defecto puede evitarse con la limpieza adecuada del soporte, cocción lenta en la zona de baja temperatura y aplicación de una capa más delgada de esmalte (Cantavella, 2008, pp. 55, 56; CISP, 2010a, p. 3; Hevia et al., 2002, p. 191).

1.2.7 DEFECTOS DE MANCHAS MATE Y PÉRDIDA DE BRILLO

Las manchas mate suelen aparecer porque ciertos componentes del esmalte se evaporan durante la cocción como los óxidos alcalinos, y otros cristalizan en la superficie de la capa de esmalte (desvitrificación).

Este fenómeno ocurre por el inadecuado enfriamiento o baja temperatura de maduración, en la que no se produce la disolución de todos los óxidos en el esmalte, de modo que actúan como núcleos de cristalización que matifican la superficie. Esto sucede incluso por el uso de fritas poco fundidas, también se pueden encontrar sulfatos que se forman en atmósfera levemente reductora a alta temperatura. Para evitarlos se debe mejorar la extracción de gases del horno (Hevia et al., 2002, pp. 191, 192).

Se puede producir cristalización por presencia de partículas de carbono que actúan como núcleo de cristalización. Se recomienda realizar un enfriamiento rápido luego de la permanencia a la temperatura de maduración, de esta forma se impide el ordenamiento de los cristales.

La volatilización de los óxidos alcalinos que son más o menos volátiles producen incluso pérdida de brillo. Se recomienda controlar la temperatura de cocción y de atronado del esmalte (Cantavella, 2008, p. 56; Hevia et al., 2002, p. 155; Vicentiz, 2007, p. 17).

1.2.8 DEFECTOS POR BURBUJAS

La presencia de burbujas superficiales se debe a la aplicación de altas temperaturas de maduración, residuos de gases durante el tiempo de calentamiento que además pueden dar lugar a la formación de poros. Estos gases quedan dentro del esmalte luego de la aplicación, durante la cocción forman burbujas por efecto de la tensión superficial del esmalte y, al llegar a la superficie, explotan o quedan retenidas por la viscosidad elevada del esmalte. Estos orificios causan pérdida de brillo.

Existe mayor presencia de burbujas en esmaltes fritados sea por humedad o un fritado defectuoso, y en esmaltes con contenidos de óxido férrico y carbono. Su presencia se relaciona con el rango de temperatura en que el esmalte disminuye su viscosidad y tiende a aglomerarse o sinterizar.

El defecto conocido como hervido, que se observa en la figura 1.15, tiene gran cantidad de burbujas e influyen sobre éste la velocidad de precalentamiento del esmalte, la viscosidad y la presencia de altas cantidades de óxidos alcalinos (Hevia et al., 2002, pp. 196, 197; Cantavella, 2008, p. 55).



Figura 1.15 Placa con defecto de hervido
(CISP, 2010b, p. 3)

Cuando las burbujas de gases se quedan atascadas en el interior del esmalte pueden provocar el engrosamiento de la capa de esmalte y disminuir la resistencia mecánica. Esto ocurre porque durante el calentamiento en la parte externa del esmalte se forma una capa que no es permeable a las burbujas que se puedan formar, por lo que quedan atrapadas (Hevia et al., 2002, p. 194).

Se recomienda ajustar la velocidad de precalentamiento para evitar o minimizar el defecto. Una atmósfera oxidante contrarresta el defecto de hervido al igual que un mayor tiempo y/o temperatura de maduración, la aplicación de una capa más fina o reducción de la viscosidad del esmalte por reformulación (última opción) (Hevia et al., 2002, pp. 195, 199).

Estudios realizados sobre el efecto del espesor de la capa de esmalte sobre los defectos en la primera capa de esmalte indican la disminución en la probabilidad de formación de este defecto si el espesor de la capa de esmaltes es de 0,2 mm. Cabe anotar que las características de composición de cada esmalte influyen en el movimiento de las burbujas formadas durante la cocción del mismo (Hevia et al., 2002, pp. 196-197; Lazutkina, Kazak, Ponomareva, 2011, p. 35).

1.2.9 DEFECTO DE PUNTILLADO

Este defecto, que se observa en la figura 1.16, se produce por la velocidad de precalentamiento, alta viscosidad y/o tensión superficial, posible reacción química entre soporte y la capa de esmalte, eliminación de agua, incorrecto ciclo de cocción, espesor de la capa de esmalte y varios tipos de contaminación (materia orgánica, carbonatos, óxido de hierro). Influyen también el tipo y forma de aplicación, mala limpieza mecánica y residuos del decapado (Amorós et al., 1991, pp. 110, 112; CISP, 2010b, p. 1; Franquesa y Mulero, 2010, pp. 24-29).

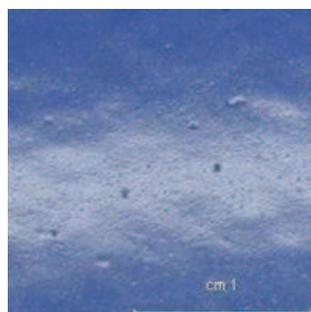


Figura 1.16 Placa con defecto de puntillado
(CISP, 2010b, p. 2)

A temperaturas entre 800 y 900 °C en la fusión del esmalte, se produce dióxido de carbono proveniente de la descomposición de carbonatos y la posterior formación de burbujas. Este defecto suele ser mayor en esmaltes fritos, por hidratación durante la molienda.

Para evitar el defecto se recomienda analizar la velocidad de precalentamiento de manera que los gases se eliminen antes de la fusión completa del esmalte. Se debe evitar la contaminación por residuos orgánicos y la hidratación del esmalte luego del proceso de fritado, con correctos procesos de secado y almacenamiento. Además del uso de equipos de molienda que eviten contaminaciones (Hevia et al., 2002, pp. 200, 201).

1.3 NORMAS PARA EVALUAR LA CALIDAD DE ESMALTES PORCELÁNICOS

El control de calidad que se aplica a piezas esmaltadas depende del tipo de esmalte porcelánico aplicado y del uso que la pieza va a tener, incluso existen normativas para la selección de los soportes metálicos que se pueden usar y su tratamiento. El beneficio de realizar las pruebas de control de calidad va desde disminuir el costo de producción hasta reducir la cantidad de desperdicio (Ubertazzi, 2002, pp. 183-185; Majumdar y Jana, 2001, p.77).

Las normativas internacionales más conocidas son:

- ISO Estándares Internacionales,
- EN Estándares Europeos
- EN-ISO Estándares

Cuando en ninguno de estos tres sistemas se encuentra información deseada se puede crear una referencia basada en ensayos previos que hayan dado resultados válidos por años, o buscar dentro de la normativa de cada país que

están relacionadas a las normas antes descritas o desarrolladas en base a legislaciones propias, como por ejemplo (Ubertazzi, 2002, pp. 185-187):

- BS en Reino Unido
- DIN en Alemania
- ASTM en los Estados Unidos
- UNI en Italia

La European Enamel Authority (EEA) creó un compendio con los requerimientos de calidad y las pruebas a las que se deben someter más de 25 productos esmaltados. Se considera como una guía internacional disponible alrededor del mundo para describir a profundidad el nivel de calidad de estos productos esmaltados (Gypen, 2012, p. 2).

Las normas EN están creadas por European Committee for Normalization (CEN) son de uso obligatorio en Europa mientras que las normas ISO tienen un carácter voluntario en Europa y en el mundo, pero puede ser adoptado por un país como norma nacional (Gypen, 2012, p. 2).

En el caso de que normas ISO se discutan, refinan y aprueben según los requerimientos de calidad de la EEA, se tienen las normativas EN-ISO, en cuyo caso se convierte en una norma concertada y por lo tanto obligatoria en países de la Comunidad Europea. Para evitar un doble trabajo en estandarización se realizan reuniones periódicas entre los Comités de ISO y CEN, encargados de esmaltes porcelánicos, donde el liderazgo en cuanto establecer normas para esmaltes porcelánicos lo toma CEN (Gypen, 2012, p. 3).

A nivel de América se tiene que en EEUU se usan normativas propias según las necesidades de calidad de ese país, pese a ello las normativas ISO empiezan a estar más implantadas (Gypen, 2012, p. 4).

En Ecuador el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) cuenta con normativa para baldosas cerámicas que se usan en revestimiento de pisos y

paredes, y que son elaboradas en base de arcilla. Además, existe una normativa para tejas cerámicas que son de igual forma de arcilla, pero no cuentan con esmaltado (NTE INEN 1800:06, 2005, p. 1; NTE INEN 644:2000, 1998, p. 1; NTE INEN 0986:84, 1982, p. 1).

Dentro del Catálogo de Normas Técnicas Ecuatorianas no se encuentran normativas específicas para la evaluación de la calidad de productos esmaltados sobre acero o específicas para superficies de acero esmaltadas.

2 PARTE EXPERIMENTAL

El presente estudio busca obtener un esmalte de segunda capa compatible con el de primera capa que se preparó en trabajos anteriores, debe ser opaco y brillante, para ello se aplicó el siguiente procedimiento.

2.1 MATERIALES Y EQUIPOS

El presente proyecto fue desarrollado en el Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional, por lo que se utilizaron los materiales, equipos y reactivos allí existentes. Se detallan características y marca en cada proceso.

2.2 ESMALTADO DE PLACAS DE ACERO CON CAPA BASE

El esmalte capa base o de primera capa que se utilizó se desarrolló en el proyecto de Mora (2008) y fue modificado por Gómez (2011). La fórmula molecular se detalla en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Fórmula molecular del esmalte porcelánico de primera capa EB

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na ₂ O	0,450	Al ₂ O ₃	0,050	SiO ₂	1,900
K ₂ O	0,050			B ₂ O ₃	0,600
CaO	0,350				
NiO	0,150				

2.2.1 PREPARACIÓN DEL ESMALTE PORCELÁNICO DE PRIMERA CAPA

2.2.1.1 Materias primas que se usaron en la elaboración del esmalte de primera capa

Las materias primas que se usaron en la preparación del esmalte de primera capa (EB) se detallan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Materias primas con las que se elaboró esmalte porcelánico de primera capa EB

Materia Prima	Óxido	Características
Vidrio de desecho	SiO ₂ , Na ₂ O, CaO, Al ₂ O ₃ , K ₂ O, MgO	Formula: Anexo I, tabla A.2 Proveniente de botellas para licor.
Carbonato de Potasio	K ₂ O	Formula: K ₂ CO ₃ . 1½ H ₂ O Peso Molecular: 165.22 [g/gmol]; BDH. 99% pureza
Carbonato de Calcio	CaO	Formula: CaCO ₃ . Peso molecular: 100 [g/gmol]; Panreac 99% Pureza.
Sulfato de Níquel	NiO	Formula: NiSO ₄ .6H ₂ O. Marca Merck, Zur Analize, 99% pureza.
Alúmina	Al ₂ O ₃	Formula: Al ₂ O ₃ . Peso molecular: 101,961 [g/gmol]; BDH.
Bórax	Na ₂ O, B ₂ O ₃	Formula: Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O. Grado técnico. Merck
Cuarzo	SiO ₂	Formula: SiO ₂ . Reactivo de laboratorio.

Materiales y equipos

Los materiales y equipos que se usaron en la preparación de materias primas se detallan en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Materiales y equipos utilizados en la preparación de materias primas

Materiales	Característica
Mortero y pistilo	Porcelana
Tamiz ASTM	Diámetro: 20 cm, N° 200 (< 75µm)
Pincel	Cerdas redondas, número 16.
Espátula	Material: acero inoxidable
Equipos	Característica
Estufa Eléctrica	Marca Memmert Edelstahl. T _{max} = 220°C, 10°C
Pulverizador	Marca Bleuler-Mill NAEF, 0,18 KW / 1000 min y 60 Hz

Procedimiento

Preparación del vidrio de desecho

- Se lavaron tres botellas de vidrio con detergente y agua.
- Se secaron a temperatura ambiente por 24 h.

- Se molieron manualmente, los fragmentos se procesaron en el pulverizador Bleuler en cargas de 100 g por un tiempo de 1 minuto.
- Se pasó por tamiz ASTM N° 200 y la materia prima de menor tamaño se almacenó en recipientes plásticos.

Preparación del Carbonato de Potasio

- Se secó por 1 h a 120 °C, el mismo día de la dosificación y elaboración del esmalte. No se almacenó seco porque es altamente higroscópico.

Preparación de Carbonato de Calcio y Alúmina

- Se utilizaron directamente para la dosificación y elaboración del esmalte puesto que el tamaño de partícula es inferior al del tamiz ASTM N° 200.

Preparación del Sulfato de Níquel, Bórax y Cuarzo

- Se pulverizaron el cuarzo y el bórax mientras el sulfato de níquel se molió manualmente.
- Se tamizaron por ASTM N° 200 y cada materia prima de menor tamaño se almacenó en recipientes plásticos.

2.2.1.2 Obtención del esmalte porcelánico de primera capa EB

Objetivo

- Obtener de 40 g de mezcla de materias primas esmalte de primera capa con tamaño de partícula menor a 75 μm (Tamiz ASTM N° 200).

Materiales y equipos

Los materiales y el equipo que se usaron se detallan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Materiales y equipos que se usaron en la elaboración del esmalte porcelánico

Materiales	Característica
Crisol	De 8 cm de diámetro, arcillas roja, base cónica, con un agujero de 5 cm de diámetro en la base
Recipiente	De cobre, de 40 cm de diámetro, de 2 litros de capacidad.
Mortero con pistilo	De porcelana
Tamiz ASTM N° 200	Diámetro: 20 cm, (75µm)
Pincel	Cerdas redondas, número 16.
Equipos	Característica
Horno para atronado	De acero y material refractario, temperatura máxima promedio: 1 200°C. Sistema de calentamiento por combustión de gas licuado de petróleo

En la figura 2.1 se observa el equipo que se usó en el atronado del esmalte porcelánico de primera capa EB.



Figura 2.1 Horno de atronado que consta de: **1.-** Crisol de atronado. **2.-** Cámara de atronado. **3.-** Ventilador. **4.-** Tubería de ingreso de la mezcla aire-gas. **5.-** Recipiente de cobre. **6.-** Tanque de gas.

Procedimiento

Atronado de las materias primas

- Se pesaron las materias primas por separado según la dosificación que se detalla en la tabla A.4 del Anexo I, y los cálculos que se indican en el mismo anexo.
- Se homogeneizó en seco.
- Se colocó la mezcla de materias primas en un crisol de arcilla roja.
- Se encendió el horno de atronado regulando las válvulas de aire y de gas hasta obtener una llama completamente azul.
- Se colocó el crisol en la abertura del horno y se tapó el mismo con ladrillos refractarios.
- Se colocó el recipiente de cobre con agua a temperatura ambiente en la parte inferior del horno.
- Se recogió el esmalte fundido, en el recipiente con agua, luego de 1 h 25 minutos.
- Se lavaron los trozos de esmalte atronado y frío con agua destilada hasta eliminar las impurezas visibles.
- Se quitó el agua en exceso y se secó por 1 h a 120 °C.

Molienda y tamizado del esmalte

- Se molió manualmente el esmalte seco en un mortero de porcelana.
- Se pasó a través de Tamiz ASTM N° 200 y se almacenó en bolsa plástica con cierre hermético.

2.2.2 PREPARACIÓN DE LAS PLACAS DE ACERO

Objetivo

- Obtener piezas de acero de 3 cm x 3 cm libres de grasa, suciedad y óxido.

Limpieza Mecánica

Materiales y equipos

Para la limpieza mecánica se usaron los materiales detallados en la tabla 2.5, las cantidades detalladas se usaron para preparar 75 placas de acero de dimensiones 3 cm x 3 cm.

Tabla 2.5 Materiales que se usaron en la limpieza mecánica de placas de acero

Materiales	Cantidad	Unidades
Estropajos de lana de acero	8	-
Detergente	500	g
Lija N° 240	6	-
Toallas de papel absorbente (paquete)	1	-
Agua destilada	4	L

Procedimiento

Para la limpieza mecánica de las placas se siguieron los siguientes pasos:

- Se retiraron los restos de óxidos con lija N° 240.
- Se lavaron las placas con una mezcla de detergente y agua.
- Se enjuagaron con agua destilada y se secaron con toalla de papel absorbente.

Limpieza Química

Materiales y equipos

Para realizar la limpieza química de las placas se preparó la solución de decapado con los reactivos que se presentan en la tabla 2.6. La cantidad que se usó se calculó para elaborar 1 L.

Tabla 2.6 Reactivos usados para el decapado de placas de acero

Reactivos	Formula	Características
Hexametilentetramina	$(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$	Pureza 99% Marca Merck
Ácido Clorhídrico	HCl	Concentración: 36,4 % Marca J. T. Baker

Los materiales que se usaron en el proceso de limpieza química son los que se detallan en la tabla 2.7, las cantidades corresponden a las necesarias para tratar 75 placas de acero de 3 cm x 3 cm.

Tabla 2.7 Materiales que se usaron en la limpieza química

Materiales	Cantidad
Balón aforado de 500 mL	1
Vaso de precipitación de 250 mL	1
Caja Petri	2
Fundas Plásticas con cierre hermético	50
Lija N° 240	6
Toallas de papel absorbente (paquete)	3
Cepillo de cerdas duras	1

Procedimiento

Preparación de la solución de decapado y limpieza química

- Se pesaron 1,75 g de Hexametilentetramina.
- Se disolvieron en 50 mL de ácido clorhídrico concentrado (36,4% en peso).
- Se trasvasaron a un balón de 500 mL y se aforó con agua destilada.
- Se colocaron las placas en un vaso de precipitación con 50 mL de solución de decapado.
- Se dejaron por 3 minutos.
- Se lavaron con agua y se estregaron con un cepillo de cerdas de cobre.

- Se colocaron en una caja petri con 30 mL de solución de decapado y se dejaron por tres minutos.
- Se lavaron con agua y se secaron con toallas absorbentes.
- Se envolvieron en toallas de papel absorbente secas y se almacenaron en bolsas con cierre hermético.

2.2.3 APLICACIÓN Y COCCIÓN DEL ESMALTE DE PRIMERA CAPA EB

Objetivo

- Obtener placas metálicas esmaltadas con esmalte de primera capa EB.

Materiales y equipos

La tabla 2.8 detalla los materiales usados en la aplicación del esmalte de primera capa EB sobre placas de acero.

Tabla 2.8 Materiales para la aplicación del esmalte porcelánico de primera capa EB

Materiales	Característica
Tamiz ASTM	Diámetro: 20 cm, N° 200 (75µm)
Pincel	Cerdas redondas, número 16.
Espátula	Material: acero inoxidable
Base cerámica	Gres porcelánico, arcilla roja

Procedimiento

- Se pesaron 0,75 g de esmalte crudo.
- Se colocó una placa de acero sobre una hoja de papel bond.
- Se colocó el esmalte en polvo sobre el tamiz ASTM N° 200 y se espolvoreó sobre la placa de acero con ayuda de un pincel. Se procuró obtener un espesor uniforme.

- Se colocaron las placas sobre la base cerámica y se sometieron al ciclo de cocción CC-CB que se indica en la tabla 2.9, cuya ruta térmica se observa en la tabla 2.9 y cuya representación gráfica se observa en la figura 2.2.

Tabla 2.9 Ciclo de cocción CC-CB aplicado a placas con esmalte de primera capa EB

Proceso	Ciclo de cocción CC-CB	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	Tambiente-700	29
	700-700	10
	700-860	14
Maduración	860-860	10
Enfriamiento	860-650	38
	650-650	5
	650-Tambiente	>400

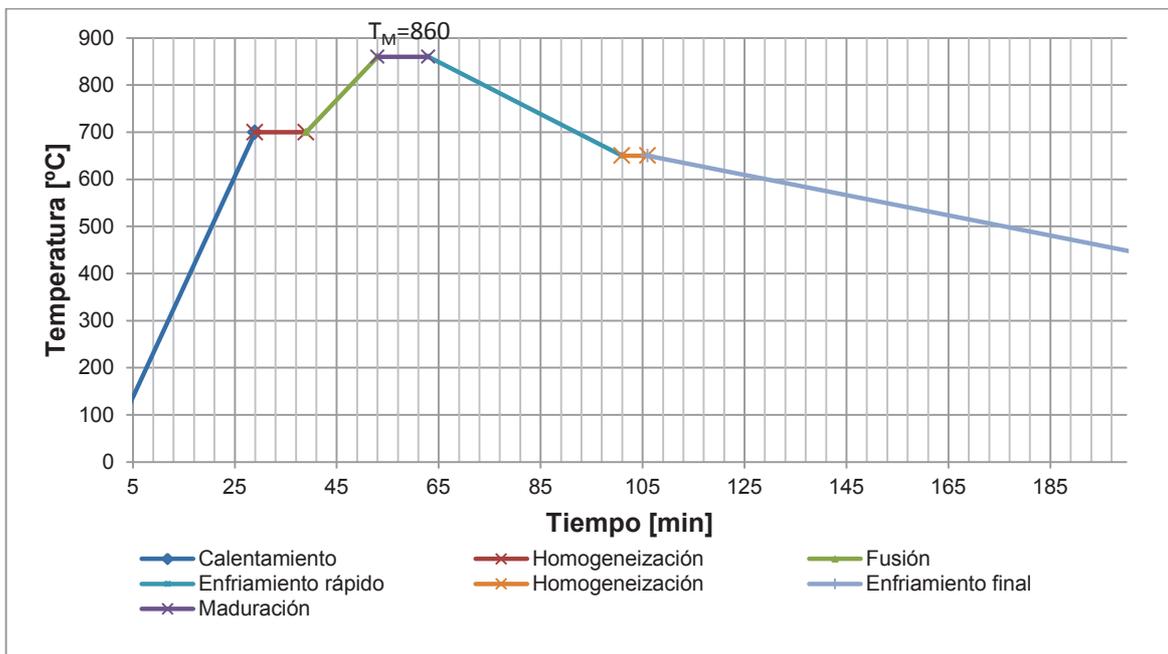


Figura 2.2 Ciclo de cocción aplicado a placas de acero de 3cm x 3 cm, con esmalte porcelánico de primera capa EB en polvo con el horno mufla Wise Therm

2.3 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RELACION DE CONCENTRACIONES DE LOS ÓXIDOS DE SODIO Y DE POTASIO

Objetivo

- Analizar el efecto de la relación de los óxidos de sodio y de potasio sobre las características de acabado de esmaltes de segunda capa, con diferentes relaciones de concentración de estos óxidos.

Para desarrollar el presente estudio se tomó como referencia la fórmula molecular del esmalte que se reproduce en la tabla 2.10, que de aquí en adelante se denomina esmalte E2-7.

Tabla 2.10 Fórmula molecular del esmalte porcelánico de segunda capa E2-7

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na ₂ O	0,350	Al ₂ O ₃	0,050	SiO ₂	1,900
K ₂ O	0,050			B ₂ O ₃	0,800
CaO	0,150				
ZrO ₂	0,350				
ZnO	0,100				

Gómez, 2011, p.81

De la fórmula de la tabla 2.10 se obtiene que $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]=7$ y que la suma de las moles de óxido de sodio y de potasio es igual a 0,4 moles. Se calculó la cantidad de los óxidos de sodio y de potasio para lograr relaciones entre 1 y 45, se mantuvo constante la suma de los óxidos en 0,4 moles.

Se graficó las moles del óxido de sodio y de potasio en función de la relación de estos, este gráfico se observa en la figura 3.1. Un ejemplo de cálculo y los datos que se obtuvieron se reportan en el Anexo II. Del análisis del gráfico se determinó el rango de relaciones entre los óxidos de sodio y de potasio a estudiarse y dentro del mismo se escogieron 8 relaciones.

2.3.1 FORMULACIÓN, DOSIFICACIÓN Y PREPARACIÓN DE ESMALTES DE SEGUNDA CAPA CON DIFERENTE RELACIÓN $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$

Objetivo

- Obtener esmaltes porcelánicos de segunda capa con diferentes relaciones de concentración de los óxidos de sodio y de potasio.

2.3.1.1 Materia primas que se usaron en la elaboración de esmaltes porcelánicos de segunda capa

Para incorporar cada uno de los óxidos de las fórmulas moleculares de las 8 relaciones se usó la materia prima que se detalla en la tabla 2.11.

Tabla 2.11 Materias primas para la preparación de esmaltes porcelánicos de segunda capa

Materia Prima	Óxido	Característica
Ácido Bórico	B_2O_3	Sólido blanco granulado. Panreac. 98% Pureza
Zircosil	$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$	Provisto por Edesa, tamaño de partícula menor a $75 \mu\text{m}$. 60% ZrO_2
Óxido de Zinc	ZnO	Sólido color crema, tamaño menor a $75 \mu\text{m}$. Panreac 98% Pureza
Vidrio de desecho	$\text{SiO}_2, \text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{K}_2\text{O}, \text{MgO}$	Fórmula: Anexo I, tabla A.2 Proveniente de botellas para licor.
Carbonato de Potasio	K_2O	Fórmula: $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1\frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ Peso Molecular: 165.22 [g/gmol]; BDH. 99% pureza
Carbonato de Calcio	CaO	Fórmula: CaCO_3 . Peso molecular: 100 [g/gmol]; Panreac 99% Pureza.
Alúmina	Al_2O_3	Fórmula: Al_2O_3 . Peso molecular: 101,961 [g/gmol]; BDH.
Bórax	$\text{Na}_2\text{O}, \text{B}_2\text{O}_3$	Fórmula: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Grado técnico. Merck
Cuarzo	SiO_2	Fórmula: SiO_2 . Reactivo de laboratorio.

2.3.1.2 Formulación de esmaltes porcelánicos de segunda capa

Se formularon 8 esmaltes porcelánicos de segunda capa. Se tomó como base el esmalte E2-7, y se usó la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$ con valores iguales a 3, 4, 5, 8, 9, 10, 14, 22; para determinar la cantidad de óxido de sodio y de potasio en cada caso.

2.3.1.3 Dosificación de materias primas para elaborar los esmaltes de segunda capa

La dosificación de las materias primas que se usaron para la elaboración de estos esmaltes porcelánicos de segunda capa se detalla con un ejemplo de cálculo en el Anexo III.

2.3.1.4 Preparación de los esmaltes porcelánicos de segunda capa

El procedimiento que se aplicó en la preparación de los esmaltes de segunda capa es similar al escrito en la sección 2.2.1 para el esmalte de primera capa EB.

Todos los esmaltes porcelánicos de segunda capa, luego del primer cribado, pasaron por un tamiz ASTM N° 300 para recoger esmalte con tamaño de partícula menor que 37 μm . Finalmente se almacenó en bolsas plásticas herméticas.

2.3.2 APLICACIÓN Y COCCIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS DE SEGUNDA CAPA CON DIFERENTE RELACIÓN $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$

Objetivo

- Aplicar esmaltes de segunda capa con diferentes relaciones de concentración de los óxidos de sodio y de potasio sobre piezas con esmalte de primera capa EB, y someterlas a un ciclo de cocción común.

Materiales y equipos

Para la aplicación de los esmaltes de segunda capa se usaron los materiales descritos en la sección 2.2.3 y el método de espolvoreo que se usó para la aplicación del esmalte de primera capa EB.

Procedimiento

Procedimiento para la aplicación del esmalte de segunda capa

- Se pesaron 1,1 g de esmalte de segunda capa.
- Se limpiaron las placas con esmalte de primera capa EB con un paño húmedo, se dejó secar al ambiente por 30 minutos.
- Se colocó el esmalte en polvo sobre el tamiz ASTM N° 300 (37 μm) y se espolvoreó sobre la placa con ayuda de un pincel. Se procuró obtener un espesor uniforme.

Los 8 esmaltes de segunda capa se sometieron al ciclo de cocción común CC-CM que se detalla en la tabla 2.12. Se escogió en base al ciclo de cocción descrito en el Anexo IV, el tiempo de maduración es de 10 minutos así como la temperatura que se varió en función de la posible viscosidad del esmalte. La gráfica del mismo se observa en la figura 2.3

Tabla 2.12 Ciclo de cocción común aplicado a placas con esmalte de segunda capa

Proceso	CC-CM	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	Tambiente-700	29
	700	10
	700-820	13
Maduración	820	10
Enfriamiento	820-600	37
	600	5
	600-Tambiente	>400

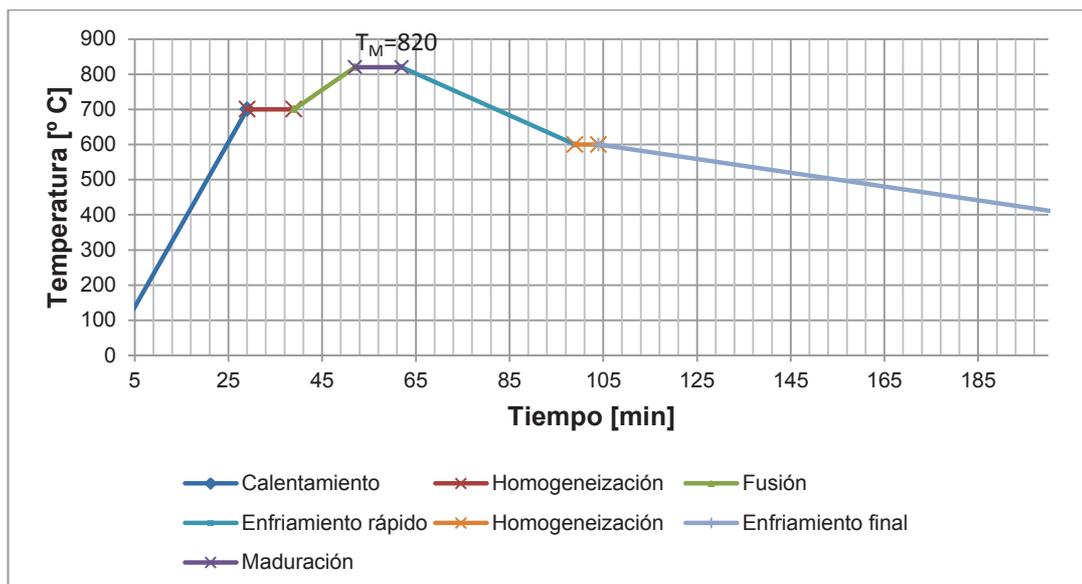


Figura 2.3 Ciclo de cocción CC-CM que se aplicó a placas con esmaltes de segunda capa

2.3.3 SELECCIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS DE SEGUNDA CAPA CON DIFERENTE RELACIÓN $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$

Las piezas esmaltadas que se sometieron al ciclo de cocción común pasaron a una primera etapa de evaluación, en la que se consideraron los siguientes parámetros con las escalas y puntuación que se implementaron:

Propiedad	Puntaje asignado
Área recubierta:	0-100% (0-1)
Homogeneidad:	excelente(1,5),buena(1), regular(0,5), mala(0)
Opacidad:	excelente(1,5),buena(1), regular(0,5), mala(0)
Brillo:	excelente(1,5),bueno(1), regular(0,5), malo(0)
Ausencia de fallas:	si(1), no(0)

Este método de evaluación se aplicó en la selección de los esmaltes, el número entre paréntesis caracteriza la calidad de cada propiedad, la suma de estos valores permitió seleccionar los esmaltes que se debían estudiar. Cuando el puntaje de las superficies en una prueba fue similar se aplicaron las siguientes opciones: descartar la placa esmaltada o considerar otra característica. De los 8

esmaltes que se cocieron con el ciclo común se seleccionaron los que obtuvieron puntaje mayor que 2,9 y con estos se continuó el estudio.

2.3.4 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE COCCIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS DE SEGUNDA CAPA SELECCIONADOS

Objetivo

- Determinar la temperatura y el tiempo de maduración adecuados para el ciclo de cocción que permita obtener una placa con mejores características de acabado.

Equipo

Las características del equipo que se usó para determinar las condiciones de cocción de los esmaltes porcelánicos de segunda capa se detalla en la tabla 2.13.

Tabla 2.13 Características del Horno mufla

Equipo	Característica
Horno mufla (Figura 2.4)	Marca WiseTherm, temperatura máxima de 120 °C. Programable. 2°C

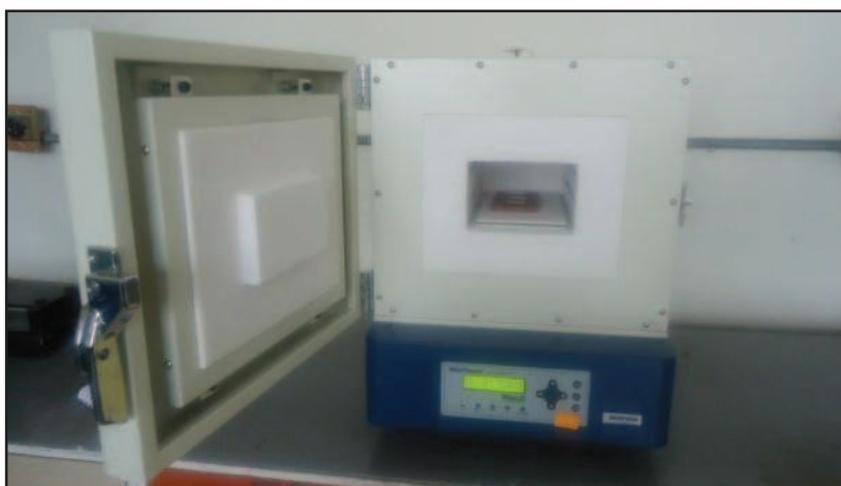


Figura 2.4 Horno mufla WiseTherm con placas recubiertas sobre base cerámica

Procedimiento

Determinación de la temperatura de maduración

Los esmaltes con mejor puntaje fueron sometidos a los ciclos de cocción del CC-C1 al CC-C8 con diferentes temperaturas y tiempo de maduración fijo de 10 minutos. Se probaron temperaturas entre 820 °C y 760 °C. Se determinó la temperatura de maduración adecuada por evaluación de las propiedades de acabado.

Determinación del tiempo de maduración

Con las temperaturas con las que se obtuvieron las mejores propiedades de acabado se varió el tiempo de maduración entre 5 y 20 minutos, dependiendo de las pruebas que se consideraron adecuadas para cada esmalte. De este modo se aplicaron los ciclos de cocción del CC-C9 al CC-C17. De estas placas se escogieron las que tuvieron mayor puntaje luego de evaluar y calificar la calidad de las mismas.

2.4 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO

Objetivo

- Determinar la resistencia al impacto de la superficie esmaltada con las mejores características de acabado.

Equipos

EL equipo que se usó se detalla en la tabla 2.14 y se observa en la figura 2.5

Tabla 2.14 Material que se usó en la determinación de la resistencia al impacto

Equipo	Característica
Balines de acero	Material: Acero. Peso1: 110,4 g.Peso2: 229,7 g
Impactómetro	Altura de caída: 1,1 m

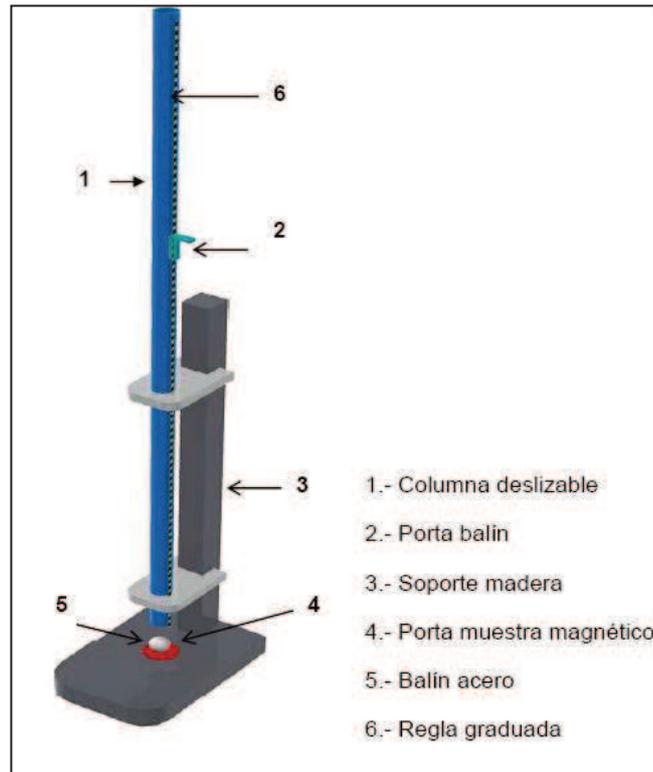


Figura 2.5 Impactómetro para determinar resistencia al impacto
 (Estévez, 2008, p. 62)

Procedimiento

Ensayo de resistencia al impacto

- Se prepararon dos placas esmaltadas con el esmalte de segunda capa E2-7 y cocida bajo el ciclo de cocción CC-C10 que presentó las mejores características de acabado.
- Se colocó el tubo guía que permita el paso del balín de acero.
- Se colocó una placa en el porta muestras magnético del impactómetro que se observa en la figura 2.5
- Se dejó caer el balín sobre la placa desde la altura indicada.
- Se retiró la placa y se determinó el grado de adherencia del esmalte sobre la placa mediante observación y comparación con las imágenes de la morfología de adherencia por impacto de un cuerpo esférico.

2.5 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO

Objetivo

- Determinar la resistencia al choque térmico del esmalte de segunda capa con las mejores características de acabado.

Equipo

El equipo que se usó en la determinación de la resistencia al choque térmico del esmalte porcelánico de segunda capa con las mejores características de acabado se observa en la figura 2.6 y se detalla en la tabla 2.15.



Figura 2.6 Esquema del equipo para determinación de la resistencia al choque térmico. Elementos: 1.- Termostato Thomas Scientific ($T_{\max} 100$ [°C] apreciación 2 [°C]) 2.- Base cerámica. 3.- Baño termostático

Tabla 2.15 Equipo usado en la determinación de la resistencia al choque térmico

Equipo	Característica
Baño termostatzado.	Termostato Thomas Scientific, $T_{\max} 100$ [°C], Termómetro Apreciación 2 [°C], recipiente metálico con 4 L de capacidad.

Procedimiento

- Se prepararon 5 placas con el esmalte porcelánico de segunda capa con las mejores características de acabado.
- Se colocaron las placas en el horno a la temperatura de 245 °C por 3 minutos.
- Se retiraron las placas del horno y se sumergieron en un baño termostático a 20 °C por 10 s.
- Se secaron con una esponja y se observó la presencia de imperfecciones.
- Se sometió la placa al siguiente ciclo según la norma ASTM C385-2002.
- El procedimiento se repite hasta el ciclo en que se observan fallas en las placas.

2.6 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL ATAQUE QUÍMICO

Objetivo

- Determinar la resistencia al ataque del ácido cítrico en ebullición del esmalte porcelánico de segunda capa con las mejores características de acabado, según el ensayo que se basa en la Norma ASTM C283-2002.

Materiales y Equipos

Los materiales que se usaron para la realización de este ensayo se detallan en la tabla 2.16. Mientras que la instalación que se usó se observa en la figura 2.7

Tabla 2.16 Materiales para la determinación de la resistencia al ataque químico

Material	Característica
Refrigerante	De espiral
Camisa de calentamiento	Con regulación para tres velocidades de calentamiento
Erlenmeyer	500 mL de capacidad



Figura 2.7 Equipo para la determinación de la resistencia al ataque químico con ácido cítrico en ebullición el 6% en peso. **1.-** Refrigerante. **2.-** Camisa de calentamiento. **3.-** Erlenmeyer

Procedimiento

Preparación de la solución de ácido cítrico al 6%

- Se pesaron 30 g de ácido cítrico.
- Se disolvieron en 50 mL de agua destilada.
- Se trasvasaron a un balón aforado de 500 mL y se aforó con agua destilada.

Determinación de la resistencia al ataque químico con ácido cítrico al 6% en ebullición

- Se prepararon 3 placas con esmalte porcelánico de segunda capa.
- Se colocaron 3 gramos de silicona líquida en la parte metálica de cada placa y se dejó solidificar para asegurar que la pérdida de peso luego de la prueba no ocurra por disolución de la parte metálica de la placa.
- Se lavó una placa con detergente y se enjuagó con agua destilada.
- Se secó a 104 °C por 10 minutos, se pesó cada placa.

- Se armó el equipo como se observa en la figura 2.7
- Se colocó la placa en el balón y se colocaron 150 mL de ácido cítrico al 6 % en peso.
- Se calentó hasta ebullición del ácido cítrico y se mantuvo en reflujo. durante 2,5 h.
- Se enjuagó la placa con agua destilada, se secó en estufa por 10 minutos y se colocó en un desecador.
- Se pesó la placa y se determinó la diferencia de pesos por efecto de la disolución del esmalte por el ataque químico.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RELACIÓN DE CONCENTRACIONES DE LOS ÓXIDOS DE SODIO Y DE POTASIO

En la figura 3.1 se presentan las moles de los óxidos de sodio y de potasio para cada relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$ desde 1 hasta 45.

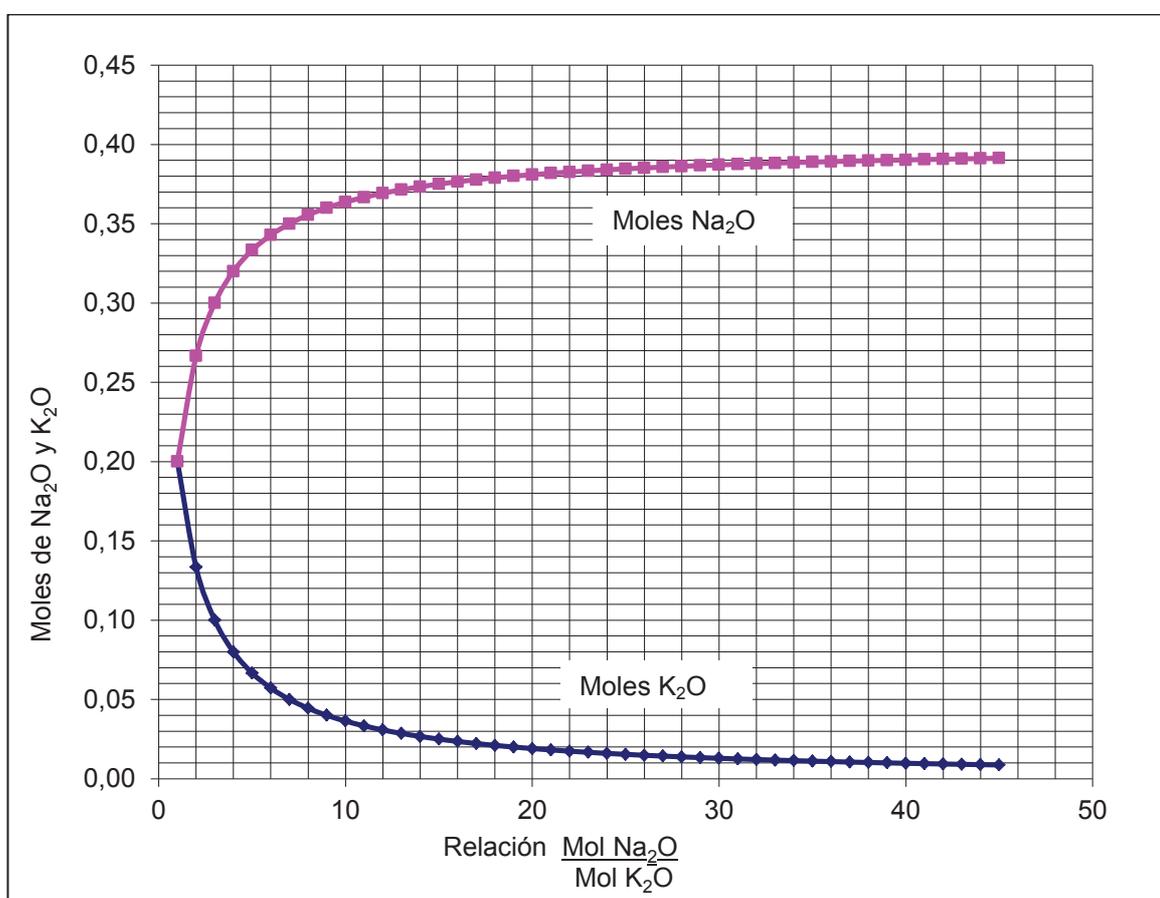


Figura 3.1 Moles de los óxidos de sodio y de potasio en función de la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$

Por la forma de la curva, se estableció un rango de relaciones, y con ello, los esmaltes que se estudiaron.

A relaciones mayores que 22, la cantidad en moles de óxido de sodio tiende a ser 0,4, que es el valor máximo de la suma de moles de los óxidos alcalinos en la

formulación inicial, mientras que la cantidad de moles de óxido de potasio tiende a cero, por lo que se establece este valor como el límite superior del intervalo.

El límite inferior se estableció en 1; puesto que para relaciones menores a ésta, la cantidad de óxido de potasio en la fórmula molecular llegaba a ser mayor entre los óxidos alcalinos por lo que de bibliografía se consultó que con esto existiría un aumento de la viscosidad del esmalte que a su vez provocaría defectos como puntillados, recogimiento, burbujas, entre otros.

Dentro del intervalo entre 1 y 22 se seleccionaron las relaciones 3, 4, 5, 8, 9, 10, 14, 22. Las relaciones 3, 4, 5, 8, 9, 10 se eligieron porque están cercanas a 7, que corresponde al esmalte E2-7. Mientras que las relaciones 14 y 22 se escogieron debido a la cantidad de óxido de sodio, para poder verificar su efecto sobre las propiedades del acabado en el esmalte.

En la tabla 3.1 se reporta la nomenclatura asignada a los esmaltes porcelánicos de segunda capa en función de la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}} \right]$ presente.

Tabla 3.1 Nomenclatura de los esmaltes de segunda capa seleccionados para el estudio

Nomenclatura	Relación
E2-3	3
E2-4	4
E2-5	5
E2-8	8
E2-9	9
E2-10	10
E2-14	14
E2-22	22

Los valores de las moles de los óxidos de sodio y de potasio que deben ingresar en cada esmalte de segunda capa se detallan en la tabla 3.2. Un ejemplo de cálculo y los datos de las diferentes relaciones se describen en el Anexo II.

Tabla 3.2 Moles de los óxidos de sodio y de potasio en los esmaltes de segunda capa

Esmalte	mol Na ₂ O	mol K ₂ O
E2-3	0,3000	0,1000
E2-4	0,3200	0,0800
E2-5	0,3333	0,0667
E2-7	0,3500	0,0500
E2-8	0,3556	0,0444
E2-9	0,3600	0,0400
E2-10	0,3636	0,0364
E2-14	0,3733	0,0267
E2-22	0,3826	0,0174

3.1.1 FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES DE SEGUNDA CAPA CON DIFERENTE RELACIÓN $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$

En la tabla 3.3 se reportan las fórmulas moleculares de los 8 esmaltes de segunda capa con los que se desarrolló el presente estudio.

Tabla 3.3 Fórmulas moleculares de los esmaltes de segunda capa que se estudiaron

Esmalte Óxido	E2-3	E2-4	E2-5	E2-8	E2-9	E2-10	E2-14	E2-22
Na ₂ O	0,3000	0,3200	0,3333	0,3556	0,3600	0,3636	0,3733	0,3826
K ₂ O	0,100	0,0800	0,0667	0,0444	0,0400	0,0364	0,0267	0,0174
CaO	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
ZrO ₂	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
ZnO	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Al ₂ O ₃	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
SiO ₂	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
B ₂ O ₃	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

De los datos en la tabla 3.3 se observa que dentro de la formulación total la única variación ocurre en los óxidos de potasio y de sodio, por ello se dedujo que el cambio en las propiedades de las placas con los esmaltes de segunda capa se

produjeron por el aporte de estos óxidos, según se encuentren en mayor o menor cantidad en la fórmula.

3.1.2 DOSIFICACIÓN DE MATERIAS PRIMAS PARA PREPARAR ESMALTES DE SEGUNDA CAPA CON DIFERENTE RELACIÓN $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$

La dosificación de las materias primas necesarias en la elaboración de cada esmalte se reportan en las tablas de la 3.4 hasta la 3.7. La cantidad de cada materia prima se calculó según se explica en el ejemplo del Anexo III al considerar la fórmula molecular de cada esmalte y la composición química de cada materia prima.

Tabla 3.4 Dosificación de las materias primas necesarias para preparar los esmaltes porcelánicos de segunda capa E2-3, E2-4

Materia Prima	E2-3		E2-4	
	% Peso	Peso de materia prima para 40 g de mezcla [g]	% Peso	Peso de materia prima para 40 g de mezcla [g]
Vidrio	25,72	10,287	25,77	10,307
Óxido de Zinc	2,51	1,002	2,51	1,004
Óxido de aluminio	0,77	0,306	0,77	0,307
Bórax	7,79	3,118	10,16	4,065
Ácido Bórico	25,40	10,161	23,93	9,571
Carbonato de Potasio hidratado	4,68	1,872	3,67	1,468
Zircosil	22,13	8,854	22,18	8,871
Cuarzo	11,00	4,400	11,01	4,407
Total	100,0	40,000	100,00	40,000

Tabla 3.5 Dosificación de las materias primas necesarias para preparar los esmaltes porcelánicos de segunda capa E2-5, E2-8

Materia Prima	E2-5		E2-8	
	% Peso	Peso de materia prima para 40 g de mezcla [g]	% Peso	Peso de materia prima para 40 g de mezcla [g]
Vidrio	25,80	10,320	25,86	10,342
Óxido de Zinc	2,51	1,006	2,52	1,008
Óxido de aluminio	0,77	0,307	0,77	0,308
Bórax	11,74	4,698	14,39	5,757
Ácido Bórico	22,94	9,175	21,29	8,515
Carbonato de Potasio hidratado	3,00	1,198	1,86	0,746
Zircosil	22,21	8,883	22,25	8,902
Cuarzo	11,03	4,413	11,06	4,422
Total	100,00	40,000	100,00	40,000

Tabla 3.6 Dosificación de las materias primas necesarias para preparar los esmaltes porcelánicos de segunda capa E2-9, E2-10

Materia Prima	E2-9		E2-10	
	% Peso	Peso de materia prima para 40 g de mezcla [g]	% Peso	Peso de materia prima para 40 g de mezcla [g]
Vidrio	25,87	10,347	25,88	10,350
Óxido de Zinc	2,52	1,008	2,52	1,008
Óxido de aluminio	0,77	0,308	0,77	0,308
Bórax	14,93	5,970	15,36	6,144
Ácido Bórico	20,95	8,382	20,68	8,274
Carbonato de Potasio hidratado	1,64	0,655	1,45	0,581
Zircosil	22,26	8,906	22,27	8,909
Cuarzo	11,06	4,424	11,07	4,426
Total	100,00	40,000	100,00	40,000

Tabla 3.7 Dosificación de las materias primas necesarias para preparar los esmaltes porcelánicos de segunda capa E2-14, E2-22

Materia Prima	E2-14		E2-22	
	% Peso	Peso de materia prima para 40 g de mezcla [g]	% Peso	Peso de materia prima para 40 g de mezcla [g]
Vidrio	25,90	10,360	25,92	10,369
Óxido de Zinc	2,52	1,010	2,53	1,011
Óxido de aluminio	0,77	0,308	0,77	0,309
Bórax	16,52	6,608	17,63	7,053
Ácido Bórico	19,96	7,984	19,27	7,706
Carbonato de Potasio hidratado	0,96	0,383	0,48	0,193
Zircosil	22,29	8,917	22,31	8,925
Cuarzo	11,08	4,430	11,09	4,434
Total	100,00	40,000	100,00	40,000

La cantidad de vidrio de desecho que se usó en la preparación de todos los esmaltes, según lo reportado en las tablas desde la 3.4 hasta la 3.7, fue mayor al 25% y aportó con hasta el 65% del óxido de sodio y el 30% del óxido de potasio.

Con esto se confirma que su uso como materia prima constituye un importante aporte en la disminución del costo de producción del esmalte tanto por la cantidad que se usó en la formulación como en el ahorro energético.

3.1.3 APLICACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS DE SEGUNDA CAPA CON DIFERENTE RELACIÓN $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$

La aplicación del esmalte de segunda capa se realizó por espolvoreo, obteniéndose capas que recubrieron toda la superficie de la placa.

3.1.4 COCCIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS DE SEGUNDA CAPA CON DIFERENTE RELACIÓN $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$

El ciclo de cocción común CC-CM al cual se sometieron las placas cubiertas con cada uno de los 8 esmaltes de segunda capa descritos en la sección 3.1.2, se reporta en la tabla 2.12 y se observa gráficamente en la figura 2.3.

El ciclo de cocción que se aplicó se diseñó tomando como base el reportado en el trabajo de Gómez (2011, pp. 99, 100) para el esmalte E2-7, con la premisa de que la temperatura de maduración de este ciclo (CC-CM) debe ser menor que la del ciclo de cocción del esmalte de primera capa EB (CC-CB), para que la misma no se funda durante este proceso de cocción.

La metodología que se usó para evaluar las características que se obtuvieron en los esmaltes de segunda capa se basó en puntuar las propiedades de acabado de las placas como se describe en la sección 2.3.3.

Los resultados de la cocción de los esmaltes porcelánicos de segunda capa se observan en las tablas: 3.8, 3.10, 3.12, 3.14, 3.16, 3.18, 3.20 y 3.22.

Resultados de la Cocción del esmalte de segunda capa E2-3

En la tabla 3.8 se reportan los resultados de la evaluación que se realizó a la placa luego de la cocción con esmalte E2-3.

Entre los defectos que se observaron están los puntos negros; que pueden ser resultado de la difusión de sales solubles del esmalte de primera capa EB y que se encuentran en la superficie de éste, y que durante la formación de la intercapa se difundieron hacia la superficie de la segunda capa de esmalte.

Esta difusión se supone fue causada por la alta temperatura de maduración que se aplicó (820 °C), por la cual se pudieron reblandecer zonas de la primera capa que se difundió en la masa de la segunda capa en forma de puntos negros.

Tabla 3.8 Placa recubierta con el esmalte porcelánico de segunda capa E2-3

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-CM		<ul style="list-style-type: none"> • Área Recubierta: 90% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: regular. • Fallas: <ul style="list-style-type: none"> Puntos negros, Superficie con zonas de puntillado. Cuardeado

Se nota a simple vista que el espesor de la capa de esmalte no es homogéneo, lo que puede atribuirse a la alta temperatura de maduración que se aplicó. La opacidad se consideró buena porque en las zonas donde se encuentra esmaltado no se observa la primera capa de esmalte EB.

En la tabla 3.9 se describe la composición molar de los óxidos alcalinos de los esmaltes de primera capa EB y de segunda capa, E2-3, para determinar cómo afectan a las propiedades de acabado del esmalte de segunda capa.

Tabla 3.9 Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-3

Óxido componente	Esmalte primera capa EB		Esmalte E2-3	
	Moles	% Molar	Moles	% Molar
Na ₂ O	0,4500	90	0,3000	75
K ₂ O	0,0500	10	0,1000	25
Total óxidos alcalinos	0,5000	100	0,4000	100

Se observa que existe mayor cantidad de moles de óxido de sodio (0,4500 moles) en la formulación del esmalte de primera capa EB mientras que en el esmalte de segunda capa E2-3 existe una menor cantidad (0,3000 moles). Esto sugiere la posible difusión de sales de óxido de sodio de la superficie del esmalte de primera capa EB hacia la segunda capa, durante la formación de la intercapa, y por ende

la afectación en la calidad del vidriado obtenido. Esto por la alta temperatura de maduración que se aplicó, la que fue cercana a la temperatura de maduración del esmalte de primera capa EB.

El número de las moles de óxido de potasio en el esmalte E2-3 duplica las que existen en el esmalte de primera capa EB, por lo que se considera que tiene alta viscosidad. Se presume que por esta razón, luego de la salida de burbujas del seno del esmalte, se dificultó el alisamiento de la misma de modo que provocó el puntillado en la superficie de la pieza esmaltada.

Este defecto se pudo provocar por contaminación de la frita del esmalte con impurezas de materia orgánica; esto en caso de que la cantidad de ésta sea tal que durante la cocción del esmalte la cantidad de burbujas que se produjeron fue abundante y no pudieron salir por completo del seno del esmalte. En este esmalte se pudo introducir materia orgánica de las cerdas de la brocha que se usó durante el tamizado.

En la superficie que se obtuvo con el esmalte E2-3 se observa una baja compatibilidad entre las dos capas porque existe gran cantidad de cuarteaduras de pequeño tamaño.

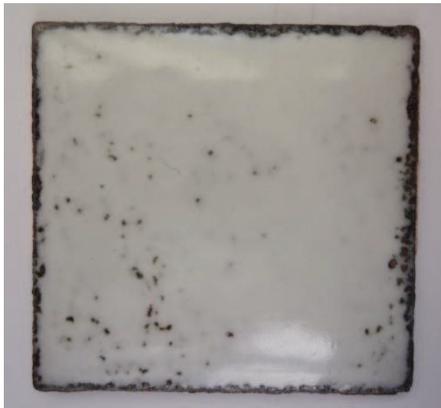
Se observa en la tabla 3.9 que la cantidad de óxido de potasio del esmalte E2-3 excede en un 100 % a la contenida en el esmalte de primera capa EB, por lo que se supone tiene un menor coeficiente de dilatación térmica pero que a la vez disminuye su elasticidad; el ión potasio forma enlaces más fuertes en la estructura vítrea, de modo que tiene menor capacidad de soportar las tensiones que se provocan de modo que permite el apareamiento del cuarteado.

Por lo antes descrito y debido a que la cantidad de fisuras (cuarteado) es elevada, se desecha la posibilidad de continuar con este esmalte en el estudio de optimización de las condiciones de cocción debido a la evidente falta de compatibilidad entre las capas de esmalte.

Resultados de la Cocción del esmalte de segunda capa E2-4

El resultado de la evaluación de las propiedades de acabado de la placa con esmalte de segunda capa E2-4 se detalla en la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-4

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-CM		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 88%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: regular. • Fallas: Puntos negros. Superficie con zonas puntilladas y cuarteadas.

De este resultado se observa una disminución en el tamaño de los puntos negros con respecto a la placa anterior pero aumentó la cantidad de los mismos en la superficie esmaltada.

En la tabla 3.11 se tiene la formulación y el porcentaje molar de los óxidos alcalinos de los esmaltes de primera capa EB y de segunda capa, E2-4; para determinar cómo la composición de éstos afecta a las propiedades de acabado.

Tabla 3.11 Contenido de óxidos de sodio y de potasio en el esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-4

Óxido componente	Esmalte de primera capa EB		Esmalte E2-4	
	Moles	% Molar	Moles	% Molar
Na ₂ O	0,4500	90	0,3200	80
K ₂ O	0,0500	10	0,0800	20
Total óxidos alcalinos	0,5000	100	0,4000	100

En esta tabla 3.11 se observa que el esmalte de segunda capa E2-4 tiene un exceso de óxido de potasio 0,0300 moles (60%) y un defecto de óxido de sodio 0,1300 moles (29 %), en comparación con la composición del esmalte de primera capa EB.

Esto probablemente hizo que el esmalte E2-4 presente mayor cantidad de puntos negros en comparación con el esmalte E2-3. Seguramente por el gradiente de concentraciones de los óxidos de sodio y de potasio entre los esmaltes, y la alta temperatura de maduración que se aplicó, que produjo una mayor difusión del esmalte de primera capa EB en la segunda capa.

El defecto de cuarteado se encuentra en menor cantidad que en la placa con esmalte E2-3, y pudo ocurrir porque la cantidad de óxido de potasio en el esmalte E2-3 fue 0,1000 moles mientras en el esmalte E2-4 fue 0,0800. Con esto el esmalte E2-4 tuvo viscosidad alta pero menor a la del esmalte E2-3, así como mejor elasticidad, menor coeficiente de dilatación que el esmalte E2-3. Pero a su vez al encontrarse en una cantidad, que se supone es elevada, el esmalte no soportó las tensiones en el mismo y provocó el defecto, entre otras causas.

Debido a que persiste el defecto de cuarteado se desecha la posibilidad de continuar en la determinación de las condiciones de cocción de este esmalte, pues el cuarteado aparece por poca compatibilidad entre las capas de esmalte.

Resultados de la cocción del esmalte de segunda capa E2-5

La tabla 3.12 detalla la evaluación del acabado que se obtuvo en la placa con esmalte de segunda capa E2-5.

La homogeneidad es mala porque persisten los puntos negros dispersos aunque de menor tamaño, el brillo es excelente de modo que al comparar la placa con esmalte E2-5 con las anteriores placas (E2-3 y E2-4) se observa que el color blanco desarrolló mejor, es decir, que se percibe que es más blanco que los otros esmaltes cuya tonalidad semejava el color blanco hueso a la vista del observador.

Tabla 3.12 Placa recubierta con el esmalte E2-5

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-CM		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: excelente. • Fallas: <ul style="list-style-type: none"> Puntillado y puntos negros. Superficie con leve cuarteado.

En la tabla 3.13 se presenta la composición molar de los óxidos alcalinos del esmalte de segunda capa E2-5 y del esmalte de primera capa EB.

Tabla 3.13 Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-5

Óxido componente	Esmalte de primera capa EB		Esmalte E2-5	
	Moles	% Molar	Moles	% Molar
Na ₂ O	0,4500	90	0,3333	83,3
K ₂ O	0,0500	10	0,0667	16,7
Total óxidos alcalinos	0,5000	100	0,4000	100

Allí se observa que existe mayor cantidad de moles de óxido de sodio en la formulación del esmalte de primera capa EB en relación al esmalte de segunda capa E2-5, por lo que se presume es que es una de las causas por la que ocurre la difusión de sales de óxido de sodio en la superficie del esmalte de primera capa EB y que surgen en la segunda capa en forma de puntos negros. Este proceso es beneficiado además por la alta temperatura de maduración que se aplicó.

El puntillado se presume ocurrió porque la cantidad de óxido de potasio en el esmalte de segunda capa produjo un esmalte con mayor viscosidad que evitó la reparación adecuada de la superficie del esmaltado luego de la salida de burbujas durante la cocción. Además se presume que pudo existir contaminación con

materia orgánica, que en gran cantidad permite la formación de gases que pudieron no salir por completo del esmalte produciendo el defecto. Se presume que pudo existir contaminación proveniente de las cerdas de la brocha del pincel que se usó durante el tamizado.

El defecto de cuarteado se mantiene pero en menor cantidad que en los esmaltes anteriores (E2-3 y E2-4). Esto posiblemente porque si se observa en la tabla 3.13 la cantidad de óxido de potasio sigue siendo mayor a la que posee el esmalte de primera capa EB, pero la diferencia de estas concentraciones es menor a la que se observa en las pruebas anteriores. De modo que si bien la cantidad de óxido de potasio afectó la elasticidad del esmalte provocando el cuarteado, tuvo un menor efecto por la menor cantidad en que aparece, en comparación con los esmaltes E2-3 y E2-4.

Sobre la base de lo antes expuesto, y por las características de acabado que resultaron estar en mejor condición que en el resto de esmaltes que se probaron, se decidió usar este esmalte para la determinación de las condiciones de cocción.

Resultados de la cocción del esmalte de segunda capa E2-8

La tabla 3.14 muestra los resultados que se obtuvieron luego de aplicar el esmalte E2-8.

Tabla 3.14 Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-8

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-CM		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: bueno. • Fallas: Zonas con recogimiento y puntos negros, puntillado

En la placa se observa la presencia de recogido y la superficie luce irregular de modo que el área recubierta se estableció en 95%. La opacidad y el brillo son buenos y el color blanco se nota mejor desarrollado. El defecto de puntillado se observa en poca cantidad y se asume como producto de la contaminación con materia orgánica durante el tamizado.

En la tabla 3.15 se presenta la composición molar de los óxidos alcalinos del esmalte de segunda capa E2-8 y del esmalte de primera capa EB, para determinar cómo la composición de éstos afecta las propiedades de acabado del esmalte de segunda capa.

Tabla 3.15 Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-8

Óxido componente	Esmalte de primera capa EB		Esmalte E2-8	
	Moles	% Molar	Moles	% Molar
Na ₂ O	0,4500	90	0,3556	88,9
K ₂ O	0,0500	10	0,0444	11,1
Total óxidos alcalinos	0,5000	100	0,4000	100

Si se observa la composición de los esmaltes se determina que el esmalte E2-8 tiene una menor cantidad de óxido de sodio con respecto a la fórmula del esmalte de primera capa EB (0,0944 moles de diferencia) y menor cantidad del óxido de potasio (0,0056 moles de diferencia). De modo que existe la posibilidad de difusión de sales de óxido de sodio desde la superficie del esmalte de primera capa EB hacia el esmalte de segunda capa, en la forma de puntos negros.

Existe la probabilidad que esta difusión se haya provocado también por la alta temperatura de maduración que se aplicó (820 °C), la que reblandeció la primera capa. Pero la cantidad de puntos negros que se observa fue menor a la que se observa en las placas anteriores, esto debido probablemente a que el gradiente entre los óxidos alcalinos es menor.

Además, se notó la pérdida de adherencia entre las capas de esmalte por el defecto de recogido, que se observa en algunas zonas de la placa como líneas

punteadas continuas. Esto se presume que ocurrió porque si se compara con la composición de los esmaltes anteriores (E2-3, E2-4, E2-5), la cantidad de óxido de sodio es mayor a lo descrito en cada fórmula; este aumento probablemente provocó el mismo efecto sobre la tensión superficial del esmalte E2-8, de modo que existió falta de mojabilidad del soporte durante la cocción del esmalte que luego dio lugar al defecto.

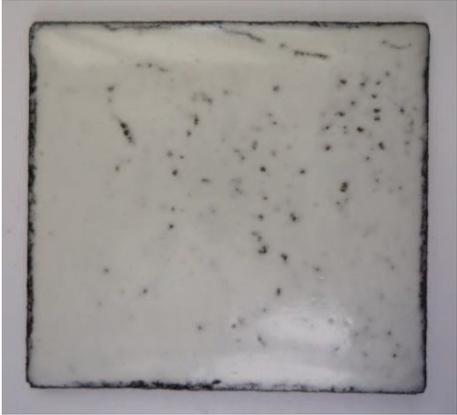
Por lo antes descrito y por una afectación ligeramente menor de los defectos que se encontraron se decidió continuar con este esmalte para la optimización de las condiciones de cocción.

Resultados de la cocción del esmalte de segunda capa E2-9

En la tabla 3.16 se observan los resultados de la evaluación del esmalte E2-9 luego de aplicar el esmalte.

El esmalte cubre el 95% del área de la placa en forma no homogénea pues presenta puntillado abundante, además de recogido y puntos negros. Se observa que la opacidad es buena porque la superficie está cubierta, a pesar de que tiene zonas donde no moja el esmalte. Su brillo es regular y se observa regular desarrollo del color blanco.

Tabla 3.16 Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-9

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-CM		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: regular. • Fallas: Superficie con gran cantidad de poros pequeños, recogido y puntos negros.

La tabla 3.17 describe la composición molar de los óxidos alcalinos del esmalte de primera capa EB y del esmalte E2-9 para con esta información determinar el posible efecto sobre las propiedades de acabado del mismo.

Tabla 3.17 Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-9

Óxido componente	Esmalte de primera capa EB		Esmalte E2-9	
	Moles	% Molar	Moles	% Molar
Na ₂ O	0,4500	90	0,3600	90,0
K ₂ O	0,0500	10	0,0400	10,0
Total óxidos alcalinos	0,5000	100	0,4000	100

Se presume que la presencia de puntos negros ocurre porque en la composición del esmalte de primera capa EB (tabla 3.17), es mayor en óxido de sodio (0,0900 moles de diferencia) y de potasio (0,0100 moles de diferencia) que en el esmalte E2-9, y por ende existe la posible difusión de las sales de estos óxidos desde la superficie del esmalte de primera capa EB a la superficie del esmalte de segunda capa.

Se sospecha que esta difusión se facilitó por la alta temperatura de maduración que se aplicó (820 °C), de modo que reblandeció el esmalte de primera capa EB.

El esmalte E2-9 tiene 0,0900 moles menos de óxido de sodio que en la fórmula del esmalte de primera capa EB y 0,0100 moles menos de óxido de potasio, pero si se compara con los esmaltes: E2-3, E2-4, E2-5, E2-8 se observa que la cantidad de óxido de sodio en estas fórmulas es menor que la que posee la fórmula del esmalte E2-9. Se presume que esta mayor cantidad provocó el mismo resultado sobre la tensión superficial, cuyo aumento provocó el defecto de recogido que denota poca adherencia entre las capas.

Por lo antes descrito y por la presencia masiva de puntillado y recogido se descarta el uso de este esmalte para la determinación del ciclo de cocción.

Resultado de la cocción del esmalte de segunda capa E2-10

En la tabla 3.18 se observan los resultados de la evaluación de las propiedades que se obtuvieron luego de aplicar el esmalte de segunda capa E2-10.

Tabla 3.18 Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-10

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-CM		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie poco lisa con zonas puntilladas, puntos negros, recogido.

El área recubierta por el esmalte se considera del 95%, no existe total recubrimiento en los bordes de la placa, la capa no es homogénea porque presenta puntillado y puntos negros. La opacidad es buena porque no deja ver la primera capa. El brillo es bueno, mejor que el de la placa con esmalte E2-9.

El defecto que se observa es el recogido en los bordes y es apenas visible en el interior de la placa; además se ve un puntillado menos abundante que en la placa anterior con el esmalte E2-9.

En la tabla 3.19 se muestra la concentración molar de los óxidos alcalinos del esmalte de segunda capa E2-10 y del esmalte de primera capa EB, para con esta información determinar el posible efecto sobre las propiedades de acabado.

Se presume que la presencia de los puntos negros se mantiene porque existe mayor cantidad de óxido de sodio (0,0864 moles de diferencia) y de potasio (0,0136 moles de diferencia) en el esmalte de primera capa EB que en el de segunda capa E2-10.

Tabla 3.19 Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-10

Óxido componente	Esmalte de primera capa EB		Esmalte E2-10	
	Moles	% Molar	Moles	% Molar
Na ₂ O	0,4500	90	0,3636	90,9
K ₂ O	0,0500	10	0,0364	9,1
Total óxidos alcalinos	0,5000	100	0,4000	100

Esto probablemente favoreció la difusión de sales de la superficie del esmalte de primera capa EB que se difunden en el esmalte de segunda capa; además del reblandecimiento del esmalte de primera capa EB por la alta temperatura de maduración que se aplicó. De modo que provocó una mayor reactividad y por ende la difusión hacia el esmalte de segunda capa.

Además, si se toma en cuenta sólo los óxidos alcalinos, se tiene que el esmalte E2-10 posee mayor cantidad de moles de óxido de sodio que en el resto de esmaltes E2-3, E2-4, E2-5, E2-8, E2-9. De modo que es posible que este esmalte tenga mayor tensión superficial y por ende menor capacidad de mojado, lo que produjo el defecto de recogido que se observa mayoritariamente en los bordes de la placa, entre otras causas.

Por lo antes descrito, y por la mejora en los parámetros analizados, se decide continuar con el esmalte E2-10 para la determinación de las condiciones de cocción.

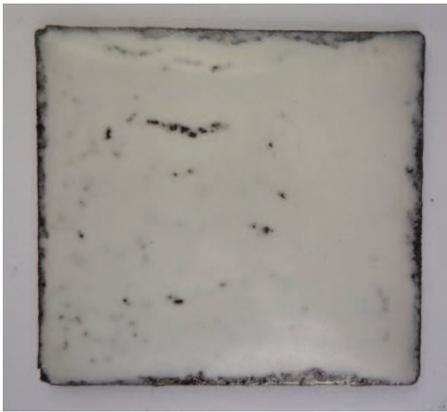
Resultados de la cocción del esmalte de segunda capa E2-14

En la tabla 3.20 se detalla el resultado de la evaluación de las propiedades obtenidas con el esmalte de segunda capa E2-14.

En esta placa existió una grieta grande con recogido; se determinó que el área recubierta llega al 88%, por dicho defecto la superficie no es lisa y presenta menor

cantidad de puntos negros. La opacidad se consideró buena y presenta un aspecto mate posiblemente por la cristalización de sales en la superficie.

Tabla 3.20 Placa recubierta con el esmalte porcelánico de segunda capa E2-14

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-CM		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 88%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: malo. • Fallas: Superficie lisa con zonas de recogimiento y puntos negros.

En la tabla 3.21 se observa la composición molar de los óxidos alcalinos del esmalte de segunda capa E2-14 y del esmalte de primera capa EB, para determinar cómo la variación en la composición afecta las propiedades de acabado.

Tabla 3.21 Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-14

Óxido componente	Esmalte de primera capa EB		Esmalte E2-14	
	Moles	% Molar	Moles	% Molar
Na ₂ O	0,4500	12,68	0,3733	93,3
K ₂ O	0,0500	1,41	0,0267	6,7
Total óxidos alcalinos	0,5000	100	0,4000	100

Allí se observa que el esmalte E2-14 tuvo 0,0767 moles menos de óxido de sodio y 0,0267 moles menos de óxido de potasio que el esmalte de primera capa EB; de modo que se presume la difusión de sales de estos óxidos en la interfase de las capas de esmalte, por lo que se observaron como puntos negros en la superficie del esmalte de segunda capa.

Esta difusión se presume que ocurrió también por reblandecimiento del esmalte de primera capa EB por la alta temperatura de maduración que se usó, que fue de 820 °C. Este reblandecimiento pudo producir su difusión hacia el esmalte de segunda capa en forma del defecto mencionado.

Si se toma en cuenta el resto de esmaltes que se probaron: E2-3, E2-4, E2-5, E2-8, E2-9, E2-10; se observa que este esmalte E2-14 tiene una mayor cantidad de óxido de sodio, de modo que es un esmalte que tiene una mayor tensión superficial que produce el defecto de recogido tanto en los bordes como en el centro de la placa; este defecto denotó la pérdida de la compatibilidad entre las capas de esmalte.

Por lo antes mencionado y por una presencia marcada de los defectos que se mencionaron, se decidió no usar este esmalte para determinar las condiciones de cocción del mismo.

Resultados de la cocción del esmalte de segunda capa E2-22

En la tabla 3.22 se resumen los resultados de la evaluación de las propiedades que se obtuvieron con el esmalte de segunda capa E2-22.

Tabla 3.22 Placa recubierta con esmalte porcelánico de segunda capa E2-22

Ciclo de Cocción	Placa: 820 °C por 10 min	Propiedades adquiridas
CC-CM		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala. • Opacidad: buena. • Brillo: excelente. • Fallas: Superficie muy lisa con puntos negros y pequeñas grietas de color negro. Puntillado ligero.

Se observa que la superficie está recubierta en un 90 %, es una capa no homogénea porque presenta puntos negros y recogidos en forma de pequeñas grietas. La opacidad es buena porque las zonas recubiertas con esmalte no dejan ver el soporte y el brillo es excelente.

En la tabla 3.23 se observa la composición molar del esmalte de segunda capa E2-22 y del esmalte de primera capa EB, para determinar cómo su composición afecta las propiedades de acabado.

Tabla 3.23 Contenido de óxidos de sodio y de potasio del esmalte de primera capa EB y de segunda capa E2-22

Óxido componente	Esmalte de primera capa EB		Esmalte E2-22	
	Moles	% Molar	Moles	% Molar
Na ₂ O	0,4500	90	0,3826	95,7
K ₂ O	0,0500	10	0,0174	4,3
Total óxidos alcalinos	0,5000	100	0,4000	100

De esta tabla se deduce que existe una mayor cantidad de moles del óxido de sodio y del óxido de potasio en la composición del esmalte de primera capa EB con respecto al esmalte E2-22. Este gradiente sugiere la difusión de sales de estos óxidos de la superficie del esmalte de primera capa EB hacia el de segunda capa en forma de los puntos negros.

Además este defecto se vio favorecido por la temperatura de maduración que se aplicó al esmalte de segunda capa (820 °C) que fue cercana a la temperatura de maduración del esmalte de primera capa EB (860 °C). Se supone que un mayor reblandecimiento de la primera capa de esmalte facilitó la difusión hacia el esmalte de segunda capa por la elevada temperatura de maduración que se usó.

Si se compara el esmalte E2- 22 con los esmaltes que se probaron anteriormente, se observa que la composición de este contiene la mayor cantidad de óxido de sodio, esto sugiere una mayor tensión superficial que influye en el apareamiento

de recogido en forma de pequeñas grietas, que denotan poca compatibilidad entre las capas de esmalte.

Por lo antes descrito y por mejores propiedades de acabado de la placa con este esmalte se procede a determinar el ciclo de cocción del mismo.

3.1.5 SELECCIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS DE SEGUNDA CAPA CON MEJORES PROPIEDADES DE ACABADO LUEGO DE APLICAR EL CICLO DE COCCIÓN COMÚN

En la tabla 3.24 se resumen las características de las superficies con los esmaltes de segunda capa E2-3, E2-4, E2-5, E2-8, E2-9, E2-10, E2-14 y E2-22 luego de pasar por el ciclo de cocción común (CC-CM) y de ser evaluadas.

En la misma se observa la calificación que obtuvo cada esmalte según la propiedad de acabado que se evaluó, con los puntajes que se indican en la sección 2.3.3. El puntaje final se obtuvo al sumar los puntos de cada propiedad de modo que el valor máximo posible es de 6,5 puntos.

Tabla 3.24 Puntaje de las propiedades de acabado en los esmaltes de segunda capa luego de aplicar el ciclo de cocción CC-CM

Esmalte	Área recubierta	Homogeneidad	Opacidad	Brillo	Ausencia de fallas	Puntaje final *
E2-3	90%	mala	buena	regular	no	2,40
E2-4	88%	mala	buena	regular	no	2,38
E2-5	90%	mala	buena	excelente	no	3,40
E2-8	95%	mala	buena	bueno	no	2,95
E2-9	95%	mala	buena	Regular	no	2,45
E2-10	95%	mala	buena	bueno	no	2,95
E2-14	88%	mala	buena	malo	no	1,88
E2-22	90%	mala	buena	excelente	no	3,40

*Sobre un puntaje para una placa de excelente acabado equivalente a 6,5

Para esta etapa del estudio, la selección de los esmaltes para el resto de pruebas se realizó por descarte de aquellos con puntaje menor que 2,9; con lo cual los esmaltes que se escogieron para la determinación del ciclo de cocción fueron E2-5, E2-8, E2-10 y E2-22.

3.1.6 DETERMINACIÓN DEL CICLO DE COCCIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS DE SEGUNDA CAPA QUE SE SELECCIONARON

Los esmaltes E2-5, E2-8, E2-10, E2-22 se aplicaron sobre placas con primera capa y fueron sometidos a ciclos de cocción con diferentes temperaturas de maduración y, posteriormente, a diferentes tiempos de maduración.

Luego se seleccionaron, de acuerdo con las mejores propiedades de acabado. Se tomó como base el ciclo de cocción CC-CM, al que se varió únicamente la temperatura y el tiempo de maduración, el resto de parámetros se mantuvieron iguales.

3.1.6.1 Determinación de las condiciones de cocción: temperatura y tiempo de maduración

Determinación de las condiciones de cocción para el esmalte E2-5

Temperatura de Maduración del esmalte E2-5

Los resultados de la evaluación de la calidad de la superficie de placas con esmalte E2-5 a cinco diferentes temperaturas de maduración se muestran en la tabla 3.25. El tiempo de maduración que se aplicó fue de 10 minutos.

Del análisis de los resultados reportados en la tabla 3.25 se concluye que el aumento de temperatura de maduración confirma la presencia de reactividad entre las capas de esmalte que se aplicaron, que se manifiesta por la presencia

de puntos negros y una mayor cantidad de puntillado que se acentúa en 820 °C y 840 °C.

Tabla 3.25 Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-5

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-C1 840 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: bueno • Fallas: Superficie con puntillado y puntos negros.
CC-CM 820 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: bueno • Fallas: Puntillado y puntos negros. Superficie con leve cuarteado
CC-C2 800 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 92%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno • Fallas: Superficie muy lisa con grietas de color negro, puntillado leve.

Tabla 3.25 Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-5
(Continuación...)

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-C3 780 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 92%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie muy lisa con pocas grietas cerca de los bordes, puntillado leve, cuarteado, puntos negros escasos.
CC-C4 760 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie poco lisa con puntos negros, ondulaciones.

A las temperaturas de maduración de 780 °C y 800 °C se observa la presencia de recogido, cuya causa pudo ser poca compatibilidad de las capas de esmalte. Esto posiblemente porque las temperaturas de maduración que se aplicaron permitieron que la viscosidad y la tensión superficial sean mayores a lo adecuado para evitar el apareamiento del recogido.

A la temperatura de 760 °C se observa la deformación de la capa de esmalte, aparecen ondulaciones posiblemente por aumento de la viscosidad del esmalte; este defecto se presenta cuando la temperatura de cocción que se aplica es muy baja.

En resumen, se observa que a medida que la temperatura de maduración disminuye ocurre lo mismo con la capacidad de mojado del esmalte, por lo que existe la presencia de recogido y hasta la pérdida de homogeneidad en el espesor de la capa de esmalte que se nota por la formación de ondulaciones.

En la tabla 3.26 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-5 en función de la temperatura de maduración, y los puntajes asignados según las características de las superficies esmaltadas en la forma que se describe en la sección 2.3.3:

Tabla 3.26 Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-5 a diferentes temperaturas de maduración

Temp.[°C]	Área recubierta	Homogeneidad	Opacidad	Brillo	Ausencia de fallas	Puntaje final*
840	90%	mala	buena	bueno	no	2,90
820	90%	mala	buena	bueno	no	2,90
800	92%	mala	buena	bueno	no	2,92
780	92%	mala	buena	bueno	no	2,92
760	90%	mala	buena	bueno	no	2,90

*Sobre un puntaje para una placa de excelente acabado equivalente a 6,5

Del puntaje final que obtuvieron las placas se concluye que tales puntajes son similares, no existe una que presente mejores propiedades de acabado dentro del conjunto, a ninguna de las temperaturas que se probaron, y no se encontró alguna propiedad que haga suponer que este esmalte pueda mejorar las características.

Tiempo de maduración del esmalte E2-5

Sin la temperatura de maduración no se tiene una base para definir un tiempo de maduración, por ello se finalizaron las pruebas con este esmalte y se concluye que, con la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$ igual a 5 se tiene poca compatibilidad entre el esmalte E2-5 y el esmalte de primera capa EB.

Determinación de las condiciones de cocción para el esmalte E2-8

Temperatura de maduración del esmalte E2-8

Los resultados de la evaluación de la calidad de la superficie de placas con esmalte E2-8 a cuatro temperaturas de maduración se muestran en la tabla 3.27. El tiempo de maduración fue de 10 minutos.

A altas temperaturas de maduración (840 °C y 820 °C) se observó la presencia de mayor cantidad de puntos negros debidos probablemente a la alta reactividad de las capas de esmalte por las temperaturas de maduración que se aplicaron.

Tabla 3.27 Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-8

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-C1 840 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie poco lisa con puntos negros, puntillado.
CC-CM 820 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Zonas con recogimiento y puntos negros, puntillado.

Tabla 3.27 Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-8
(Continuación...)

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
<p>CC-C3 780 °C</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie poco lisa con puntos negros, ondulaciones y gran cantidad de puntillado.
<p>CC-C4 760 °C</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 98%. • Homogeneidad: buena • Opacidad: buena • Brillo: regular • Fallas: Superficie poco lisa con ondulaciones y pinchado.

A 780 °C se observó la disminución de la cantidad de puntos negros que se asume desaparecieron debido a una menor reactividad de las capas de esmalte y por ende se supuso una mayor compatibilidad del esmalte de primera capa EB con el de segunda capa E2-8.

El desarrollo más adecuado del esmalte E2-8 ocurrió a 760 °C, pues se observó un área recubierta del 98% y no se observaron puntos negros en la superficie del esmalte. A esta temperatura los defectos que se detectaron en las placas fueron: superficie ondulada y pinchado. Se supone ocurrieron por falta de maduración del esmalte que pudo ser debido a un inadecuado tiempo de cocción.

En la tabla 3.28 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-8 en función de la temperatura de maduración, y los puntajes asignados según las características de las superficies esmaltadas, en la forma que se describe en la sección 2.3.3.

Tabla 3.28 Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-8 a diferentes temperaturas de maduración

Temp. °C	Área recubierta	Homogeneidad	Opacidad	Brillo	Ausencia de fallas	Puntaje final*
840	90%	mala	buena	bueno	no	2,90
820	95%	mala	buena	bueno	no	2,95
780	95%	mala	buena	bueno	no	2,95
760	98%	buena	buena	regular	no	3,48

*Sobre un puntaje para una placa de excelente acabado equivalente a 6,5

De esta tabla se observa que el mayor puntaje entre las diferentes temperaturas de maduración que se probaron lo obtuvo la placa que se sometió a 760 °C. De modo que esta temperatura de maduración se asume como la adecuada para el esmalte E2-8 y para continuar con la determinación del tiempo de maduración adecuado, en el que se eliminen los defectos que se encontraron.

Tiempo de maduración del esmalte E2-8

En la tabla 3.29 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-8 en función del tiempo de maduración, y que se puntuaron según la calidad de la propiedad en la forma que se describe en la sección 2.3.3.

A los 10 minutos se observa que existió una mayor área recubierta con respecto a los otros tiempos de maduración que se probaron, pero el resto de parámetros no mejoran.

Se observa que entre los 5 y los 10 minutos existió un mejor recubrimiento, es posible que dentro de este rango se encuentren las condiciones en las que se

logre un mejor desarrollo del resto de propiedades. Sobre los 10 minutos se observa que la calidad del esmaltado disminuye.

Tabla 3.29 Determinación del tiempo de maduración para el esmalte E2-8 a la temperatura de maduración de 760 °C

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
<p>CC-C9 5 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 85% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: malo • Fallas: Superficie con pequeñas manchas y recogido. Abultamiento en el borde, puntillado fino y falta de brillo.
<p>CC-C5 10 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 98% • Homogeneidad: buena • Opacidad: buena. • Brillo: regular • Fallas: Superficie poco lisa con ondulaciones y pinchado.
<p>CC-C10 15 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 85% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: malo • Fallas: Superficie poco lisa con ondulaciones, grietas y bordes abultadas.

En la tabla 3.30 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-8 en función de la temperatura de maduración y los puntajes asignados según las características de las superficies esmaltadas en la forma que se describe en la sección 2.3.3.

Tabla 3.30 Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-8 a diferentes tiempos de maduración con una temperatura de maduración de 760 °C

Tiempo min	Área recubierta	Homogeneidad	Opacidad	Brillo	Ausencia de fallas	Puntaje final*
5	85%	mala	buena	malo	no	1,85
10	98%	buena	bueno	regular	no	3,48
15	85%	mala	buena	malo	no	1,85

*Sobre un puntaje para una placa de excelente acabado equivalente a 6,5

De esta tabla se deduce que el tiempo al cual se obtuvo una mejor calificación corresponde a 10 minutos para la temperatura de maduración de 760 °C, aunque con estas condiciones de cocción la superficie que se obtuvo no es de buena calidad.

Determinación de las condiciones de cocción para el esmalte E2-10

Temperatura de maduración del esmalte E2-10

Los resultados de la evaluación de la calidad de la superficie de placas con esmalte E2-10 a cinco temperaturas de maduración se muestran en la tabla 3.31. El tiempo de maduración fue de 10 minutos.

Se observó que a altas temperaturas de maduración (840 °C y 820°C) se tiene una gran cantidad de puntillado y puntos negros, estos últimos posiblemente por la reactividad de las dos capas de esmalte.

A 800 °C se observa un mejor desarrollo del esmalte en comparación con el resto de temperaturas. El área recubierta es de casi la totalidad con un ligero recogido

en el borde superior, excelente brillo y poca presencia de puntos negros, aunque aún persisten pequeñas grietas.

Tabla 3.31 Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-10

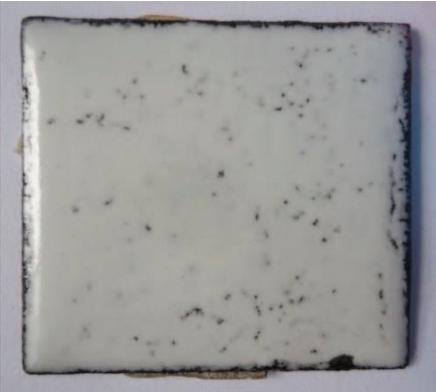
Ciclo de cocción	Placa	Propiedades adquiridas
<p>CC-C1 840 °C</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie poco lisa con piel de naranja, puntos negros.
<p>CC-CM 820 °C</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie poco lisa con recogimiento en los bordes y puntos negros.
<p>CC-C2 800 °C</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95% • Homogeneidad: regular • Opacidad: buena. • Brillo: excelente. • Fallas: Superficie lisa con poco puntillado y puntos negros.

Tabla 3.31 Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-10
(Continuación...)

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-C3 780 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 85%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: malo. • Fallas: Superficie con recogimiento, ondulaciones y puntos negros
CC-C4 760 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Ausencia de fallas: no Superficie con recogimiento cerca al borde, puntos negros puntillado leve, ondulaciones.

A las temperaturas de maduración de 780 °C y 760 °C se observa que existe falta de cocción del esmalte debido a la presencia de recogido. Posiblemente la viscosidad y tensión superficial de la capa de esmalte fue elevada, con lo que se aumenta la tendencia al retiro.

En la tabla 3.32 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-10 en función de la temperatura de maduración, y los puntajes asignados según las características de las superficies esmaltadas en la forma que se describe en la sección 2.3.3

Tabla 3.32 Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-10 a diferentes temperaturas de maduración

Temp.°C	Área recubierta	Homogeneidad	Opacidad	Brillo	Ausencia de fallas	Puntaje final
840	90%	mala	buena	bueno	no	2,90
820	95%	mala	buena	bueno	no	2,95
800	95%	regular	buena	excelente	no	3,95
780	85%	mala	buena	malo	no	1,85
760	90%	mala	buena	bueno	no	2,90

*Sobre un puntaje para una placa de excelente acabado equivalente a 6.5

En la tabla se observa que el mejor desarrollo del esmalte se produce a la temperatura de maduración de 800 °C porque presenta mayor puntuación en la evaluación, y la superficie presenta pocos puntos negros en comparación con el resto de placas. Existieron pequeñas grietas por recogido cerca de los bordes que pudieron ocurrir durante la aplicación, la placa presenta un mejor brillo y leve puntillado.

Por lo expuesto se asume que la mejor temperatura de maduración es 800 °C para el esmalte E2-10, y se la usó para determinar el tiempo de maduración.

Tiempo de maduración del esmalte E2-10

En la tabla 3.33 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-10 en función del tiempo de maduración, y que se puntuaron según la calidad de la propiedad en la forma que se describe en la sección 2.3.3. Se mantuvo la temperatura de maduración en 800 °C.

En la tabla 3.33 se observa que las propiedades de las placas aún con la variación de tiempos, a la temperatura de maduración de 800 °C no muestran mejora considerable en las características finales de las placas.

La poca compatibilidad entre el esmalte de primera capa EB y el de segunda capa E2-10 se observó debido a la presencia de recogido además de puntos negros, y puntillado en los tres tiempos que se probaron.

Tabla 3.33 Determinación del tiempo de maduración para el esmalte E2-10 a la temperatura de maduración de 800 °C

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-C11 5 min		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: malo • Fallas: Superficie poco lisa con ondulaciones, puntos negros, recogido y puntillado excesivo.
CC-C3 10 min		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95% • Homogeneidad: regular • Opacidad: buena • Brillo: excelente • Fallas: Superficie lisa con puntillado leve y puntos negros
CC-C12 15 min		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: bueno • Fallas: Superficie con puntillado, puntos negros, pequeñas grietas por recogido, abultamiento en los bordes.

Sin embargo, se observa que a los 10 minutos se tiene mejor homogeneidad y brillo. Entre los 5 y 10 minutos existe mejora de las propiedades que decaen a tiempos mayores por el recogido en los bordes.

En la tabla 3.34 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-10 en función de los tiempos de maduración, y los puntajes asignados según las características de las superficies esmaltadas en la forma que se describe en la sección 2.3.3.

Tabla 3.34 Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-10 a diferentes tiempos de maduración con una temperatura de maduración de 800 °C

Tiempo min	Área recubierta	Homogeneidad	Opacidad	Brillo	Ausencia de fallas	Puntaje final
5	90%	mala	buena	malo	no	1,90
10	95%	regular	buena	excelente	no	3,95
15	90%	mala	buena	bueno	no	2,90

*Sobre un puntaje para una placa de excelente acabado equivalente a 6.5

Del análisis del puntaje final reportado en la tabla 3.34, se concluye que las condiciones de cocción del esmalte E2-10 son 800 °C y 10 minutos, aunque la superficie que se obtuvo no es de buena calidad.

Determinación de las condiciones de cocción para el esmalte E2-22

Temperatura de maduración del esmalte E2-22

Los resultados de la evaluación de la calidad de la superficie de placas con esmalte E2-22 sometido a los ciclos de cocción CC-C1, CC-CM, CC-C3 se detallan en la tabla 3.35.

En la tabla 3.35 se observa que existe la probabilidad de una alta reactividad entre el esmalte de segunda capa E2-22 y el esmalte de primera capa EB a todas las temperaturas que se analizaron, lo que provocó los puntos negros.

Tabla 3.35 Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-22 con un tiempo de maduración de 10 min

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-C1 840 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: excelente. • Fallas: Superficie con puntos negros, puntillado y pinchado.
CC-CM 820 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: excelente. • Fallas: Superficie muy lisa con puntos negros y pequeñas grietas (recogido) Puntillado ligero.
CC-C3 780 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 85%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: excelente. • Fallas: Superficie con puntos negros, pequeñas grietas (recogido) y puntillado.

A 840 °C y 820 °C se observa que persiste además el defecto de recogido y puntillado que aparenta ser por impurezas añadidas durante la preparación del esmalte pero un brillo excelente.

A 780 °C se observaron pequeñas grietas (recogido) que se asume ocurrieron por la menor viscosidad alcanzada a esa temperatura. La cantidad de puntillado que se encontró fue menor a esta temperatura.

En la tabla 3.36 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-22 a los ciclos de cocción CC-C1, CC-CM, CC-C3 y los puntajes asignados según las características de las superficies esmaltadas en la forma que se describe en la sección 2.3.3.

Tabla 3.36 Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-22 a diferentes temperaturas de maduración con un tiempo de maduración de 10 min

Temperatura °C	Área recubierta	Homogeneidad	Opacidad	Brillo	Ausencia de fallas	Puntaje final*
840	90%	mala	buena	excelente	no	3,40
820	90%	mala	buena	excelente	no	3,40
780	90%	mala	buena	excelente	no	3,40

*Sobre un puntaje para una placa de excelente acabado equivalente a 6,5

Las superficies que se lograron poseen iguales puntajes, no se puede determinar la mejor temperatura de maduración. Sin embargo, la calidad del color, opacidad y brillo indica que la formación del vidrio es total y para mejorar las otras propiedades se aumentó a 20 minutos el tiempo de maduración, esto se observa en los ciclos de cocción del CC-C5 al CC-C8 del Anexo V, que fueron los ciclos que se aplicaron en una siguiente serie de pruebas.

En la tabla 3.37 se observan los resultados de la evaluación de la calidad de la superficie de placas con esmalte E2-22 a las diferentes temperaturas de maduración con un tiempo de maduración de 20 minutos según los ciclos de cocción desde el CC-C5 hasta el CC-C8.

A la temperatura de maduración de 840 °C se observa la presencia de hoyos que se asume dejaron burbujas, debidas a la descomposición de materia orgánica que pudo contaminar el esmalte durante el tamizado, que reventaron y por las

propiedades del esmalte dejaron tras de sí el defecto. Pese a que el brillo es excelente se observó que a esta temperatura el esmalte está sobrecocido.

Tabla 3.37 Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-22 con tiempo de maduración de 20 min

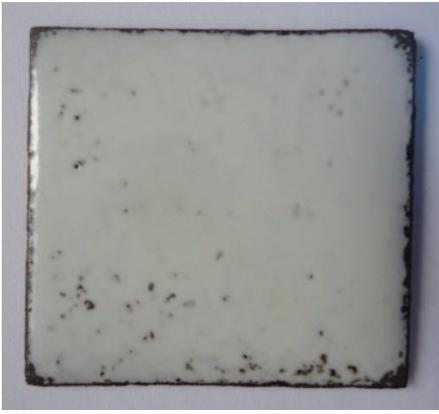
Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-C5 840 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie con pocos puntos negros y hoyos.
CC-C5 840 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie con pocos puntos negros y hoyos.
CC-C6 780 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: excelente. • Fallas: Superficie con manchas puntuales de color negro y recogido.

Tabla 3.37 Determinación de la temperatura de maduración para el esmalte E2-22 con tiempo de maduración de 20 min (**Continuación...**)

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-C7 760 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 85%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: bueno. • Fallas: Superficie con manchas puntuales de color negro, ondulada y puntillada.
CC-C8 750 °C		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 85%. • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena. • Brillo: malo. • Fallas: Superficie con pequeñas puntos negros, recogido en el borde, puntillado y falta de brillo.

A 780 °C se observó la presencia de leve puntillado, excelente brillo en comparación al resto de placas. La cantidad de puntos negros decrece, y existe recogido en los bordes; se presume debido a fallas durante la aplicación del esmalte en polvo.

A 760 °C se observó que el brillo disminuyó y la presencia de puntillado aumentó con respecto a las placas a las que se aplicó temperaturas mayores; esto probablemente por una temperatura de maduración menor que la necesaria para el correcto desarrollo del vidriado.

A 750 °C la placa presentó una superficie con falta de brillo y puntillado, defectos que se asume ocurrieron porque no se alcanzó la temperatura de maduración

adecuada, de modo que las burbujas de gas provenientes del esmalte no pudieron desprenderse en forma adecuada y dejaron en la superficie el defecto, entre otras causas.

En general en este bloque de pruebas se observó que con un mayor tiempo de maduración se obtuvo un mejor desarrollo del esmalte que presenta mejor brillo, a excepción de las temperaturas de 750 °C y 760 °C.

En la tabla 3.38 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-22 a los ciclos de cocción CC-C5, CC-C6, CC-C7 y CC-C8 y los puntajes asignados según las características de las superficies esmaltadas en la forma que se describe en la sección 2.3.3.

Tabla 3.38 Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-22 a diferentes temperaturas de maduración con un tiempo de maduración de 20 min

Temp. °C	Área recubierta	Homogeneidad	Opacidad	Brillo	Ausencia de fallas	Puntaje final*
840	90%	mala	buena	bueno	no	2,90
780	90%	mala	buena	excelente	no	3,40
760	85%	mala	buena	bueno	no	2,85
750	85%	mala	buena	malo	no	1,85

*Sobre un puntaje para una placa de excelente acabado equivalente a 6,5

Finalmente, de entre las pruebas que se hicieron se observa que existe un mayor puntaje en una de las temperaturas; en pruebas previas el puntaje resultó el mismo pero en esta etapa se apreció un mayor puntaje de entre algunos por lo que se afirma como la temperatura de maduración de este esmalte los 780 °C.

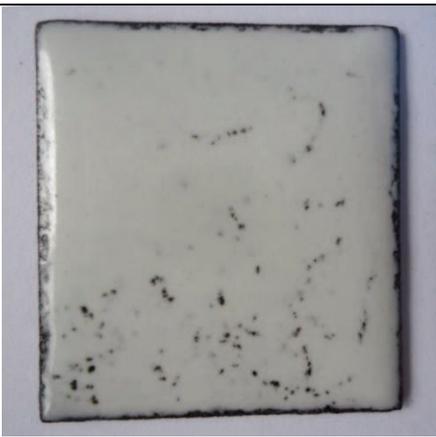
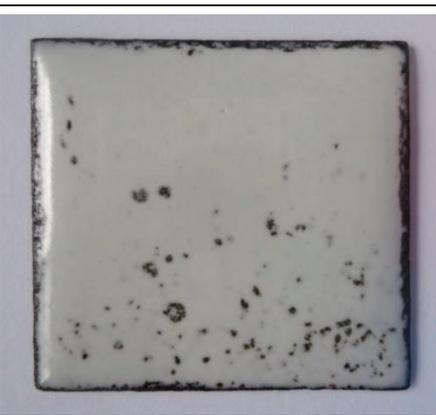
Tiempo de maduración del esmalte E2-22

Los resultados de los diferentes tiempos de maduración que se aplicaron a las placas con esmalte E2-22 se observan en la tabla 3.39. La temperatura de maduración que se aplicó fue de 780 °C.

Tabla 3.39 Determinación del tiempo de maduración para el esmalte E2-22 a 780 °C

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
<p>CC-C13 5 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 85% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: excelente • Fallas: Superficie presenta recogido en los bordes y en el interior de la placa, puntillados
<p>CC-C14 10 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: excelente • Fallas: Superficie con puntillado, recogido y puntos negros
<p>CC-C15 15 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95% • Homogeneidad: regular • Opacidad: buena • Brillo: bueno • Fallas: Superficie con puntillado, puntos negros y recogido en los bordes.

Tabla 3.39 Determinación del tiempo de maduración para el esmalte E2-22
(Continuación...)

Ciclo de Cocción	Placa	Propiedades adquiridas
<p>CC-C7 20 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 95% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: excelente • Fallas: Superficie con puntos negros y grietas por recogido.
<p>CC-C16 25 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: excelente • Fallas: Superficie con puntos negros y recogido en el borde derecho
<p>CC-C17 30 min</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 90% • Homogeneidad: mala • Opacidad: buena • Brillo: excelente • Fallas: Superficie con puntos negros abundantes, recogido, puntillado.

A los tiempos de maduración de 5, 10 y 15 minutos se observó la presencia de puntillado, puntos negros y brillo bueno. Se supone que estos defectos aparecen por un tiempo inadecuado de maduración.

Entre 10 y 15 minutos se observa que existe una disminución en la cantidad de puntos negros que vuelve a aumentar a los 20 minutos, esto hace suponer que entre el primer rango se puede encontrar un tiempo en que tales puntos no se desarrollen.

A los 20 minutos se observó que la cantidad de puntillado en la placa fue menor que en las otras placas pero se mantuvo la presencia de puntos negros que disminuyeron la calidad del esmaltado pues el brillo fue excelente. Esto hace presumir que esta temperatura y con estos tiempos de maduración no se obtuvo un desarrollo adecuado del esmaltado.

Entre 25 y 30 minutos se observó que la cantidad de puntos negros aumentó, se supone debido al reblandecimiento del esmalte de primera capa EB por un mayor tiempo a la temperatura de maduración de modo que se supone un aumento de la reactividad entre las capas de esmalte, lo que hace suponer que a estos tiempos no se tiene buena compatibilidad entre las capas de esmalte.

Se observó que, a pesar de una baja temperatura y un tiempo de maduración mayor, no se mejoraron las características de acabado del esmalte, posiblemente porque en estas condiciones de cocción y con este esmalte no se obtuvo buena compatibilidad de las capas de esmalte, por ello la presencia de defectos.

En la tabla 3.40 se reportan las características de las superficies que se lograron con el esmalte E2-22 en función de tiempos de maduración, y los puntajes asignados según las características de las superficies esmaltadas en la forma que se describe en la sección 2.3.3.

Se observa que a medida que aumenta el tiempo de maduración mejoran propiedades como el brillo y la homogeneidad pero la presencia de puntos negros no disminuye.

En la tabla se observa que el menor puntaje se obtuvo a los 15 minutos. Al resto de tiempo pese a que los puntajes son altos no se observa que se eliminaron los

defectos, pero de esos tiempos la cantidad de puntos negros es menor a los 20 minutos por lo que a pesar de ser mayor en apenas 0.05 puntos se decide escoger este tiempo de maduración.

Tabla 3.40 Puntaje de las propiedades de acabado de placas con esmalte E2-22 a diferentes tiempos de maduración con una temperatura de maduración de 780 °C

Tiempo [min]	Área recubierta	Homogeneidad	Opacidad	Brillo	Ausencia de fallas	Puntaje final*
5	85 %	mala	buena	excelente	no	3,35
10	90%	mala	buena	excelente	no	3,40
15	95%	regular	buena	bueno	no	2,95
20	95%	mala	buena	excelente	no	3,45
25	90%	mala	buena	excelente	no	3,40
30	90%	mala	buena	excelente	no	3,40

*Sobre un puntaje para una placa de excelente acabado equivalente a 6,5

Por lo antes expuesto y las propiedades del esmalte E2-22 a diferentes tiempos de maduración que se describen en la tabla 3.39, se concluye que las mejores condiciones de cocción se obtuvieron a 20 minutos con una temperatura de 780 °C, aunque la calidad de la placa que se obtuvo no fue buena.

3.1.6.2 Efecto de la relación entre los óxidos de sodio y de potasio sobre las propiedades de las superficies con esmalte de segunda capa

En el presente estudio se analizó el efecto la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$ mediante la evaluación de las propiedades de acabado de los esmaltes y se detalla en las secciones 3.1.4, 3.1.5 y 3.1.6.

En la tabla 3.41 se observa el resumen de las propiedades de acabado que se obtuvieron a una temperatura de maduración de 780 °C y 10 minutos para los esmaltes E2-5, E2-8, E2-10 y E2-22, para de ella determinar la influencia de la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$ sobre las propiedades de acabado de las placas.

La evaluación de las fallas se realizó al considerar que una mayor notoriedad de las fallas, como cantidad o intensidad, se calificó con un mayor número de X.

Tabla 3.41 Propiedades de acabado para esmaltes de segunda capa con diferente relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$ para 780 °C y 10 min

	Relación = 5	Relación = 8	Relación = 10	Relación = 22
Área recubierta	92	95	95	90
Homogeneidad	mala	mala	mala	mala
Brillo	bueno	malo	malo	excelente
Fallas	Puntos negros	Puntos negros	Puntos negros	Puntos negros
	X X X X	X X	X X X	X X X X
	Puntillado	Puntillado	Puntillado	Puntillado
	X X	X X X X	X	X X X
	Cuarteado	Recogido	Recogido	Recogido
	X X	X X	X X X X	X X X
Recogido cerca de bordes				
X				

En dicha tabla se observa que tanto el área recubierta como la homogeneidad de las placas no se modificaron por la variación de relaciones de los óxidos alcalinos, mientras que el brillo aparenta mejora con el aumento de la relación.

A las diferentes relaciones se observa que no desaparecen los puntos negros, sólo se modifica la cantidad de los mismos; entre la relación 8 y 10 se observa una ligera disminución en la cantidad pero se mantiene alta en las relaciones de los extremos (5 y 22).

Del análisis de estos resultados se clasificaron los esmaltes en dos grupos: con mayor cantidad de óxido de potasio (E2-5) y con menor cantidad de óxido de potasio (E2-8, E2-10 y E2-22) en comparación con la formulación del esmalte de primera capa EB. En cuanto al óxido de sodio se observa que en todos los esmaltes se mantuvo en un valor menor al que se reporta en la formulación del

esmalte de primera capa EB. La variación de estos óxidos se observa en la tabla 3.3.

Se observa que a medida que aumenta la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right]$ se pasa de esmaltes con poca elasticidad y coeficiente de dilatación menor, con defecto de cuarteado (E2-5), a esmaltes con mayor tensión superficial y viscosidad con defecto de recogido (E2-8, E2-10 y E2-22), es decir, que a medida que aumenta el óxido de potasio se tienen defectos de cuarteado mientras que cuando este disminuye se presenta el recogido.

Si bien en el esmalte E2-5 se observa recogido en los bordes, se presume que es producto de la temperatura de maduración y del poco tiempo, mala aplicación del esmalte o del bajo tiempo de enfriamiento hasta la temperatura de transición vítrea. Mas no se considera como efecto de la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right] = 5$ sobre el acabado de la placa con este esmalte; esto principalmente porque la falla aparece cerca de los bordes y no el centro de la placa.

3.2 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO

El esmalte porcelánico que en su composición química contiene la relación $\left[\frac{\text{mol Na}_2\text{O}}{\text{mol K}_2\text{O}}\right] = 7$ presentó mejor calidad de acabado a comparación con los esmaltes que se probaron en este trabajo, por lo que las placas recubiertas con el esmalte E2-7 se las usó para realizar las pruebas de calidad.

Es decir que se considera que el esmalte de referencia presenta las mejores propiedades de acabado.

Este esmalte se aplicó sobre la primera capa en una cantidad de 1,1 g y se coció según el ciclo de cocción CC-C10 que se detalla en el Anexo IV. Los resultados se presentan en la tabla 3.42.

Tabla 3.42 Placa con esmalte de segunda capa E2-7

Ciclo de cocción	Placa	Propiedades adquiridas
CC-C10 $T_M = 760\text{ }^\circ\text{C}$ $t_M = 15\text{ min}$		<ul style="list-style-type: none"> • Área recubierta: 100% • Homogeneidad: buena • Opacidad: excelente. • Brillo: bueno. • Fallas: <ul style="list-style-type: none"> Ligero corrimiento de esmalte. 1 punto negro

Las placas con esmalte de segunda capa E2-7 fueron sometidas al ensayo para determinar la resistencia al impacto, las condiciones a las que se realizaron las pruebas se reportan en la tabla 3.43.

Tabla 3.43 Condiciones de las pruebas para determinar la resistencia al impacto

Prueba N°	Peso de la esfera [g]	Altura de caída [cm]	Energía [J]
1	110,4	115	1,24*
2	229,7	115	2,59*

*Valor calculado

El resultado de la primera prueba se observa en la tabla 3.44

En la prueba N° 1, al dejar caer un peso de 110,4 g se aplicaron 1,24 J de energía, no se observa desprendimiento de esmalte pero sufrió cuarteaduras en toda la superficie.

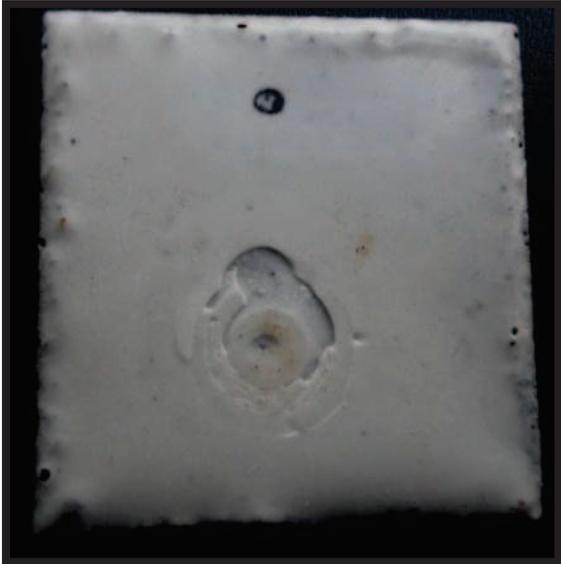
Al evaluar el resultado relacionándolo con el de referencia que se reporta en el Anexo VI, la superficie esmaltada se clasifica dentro de las que poseen adherencia buena, equivalente a 3.

Tabla 3.44 Placa con esmalte de segunda capa E2-7 sometidas a la prueba de impacto con esfera de 110,4 g

Prueba N°	Placa con esmalte E2-7 760 °C por 15 min	Grado de Adherencia
1		3

El resultado de la segunda prueba se observa en la tabla 3.45

Tabla 3.45 Placa con esmalte de segunda capa E2-7 sometida a la prueba de impacto con esfera de acero de 229,7 g

Prueba N°	Placa con esmalte E2-7 760 °C por 15 min	Grado de Adherencia
2		2

En la prueba N° 2, al dejar caer un peso de 229,7 g se aplicaron 2,59 J de energía, se observó que la adherencia del esmalte al compararlo con la referencia del Anexo VI fue de 2, es decir adherencia media.

Se determinó esta adherencia debido a que se observan círculos concéntricos alrededor de la zona de impacto; pese a que existió desprendimiento de esmalte no se observa el esmalte de primera capa EB.

Los resultados que se obtuvieron en las pruebas indican que la adherencia de esmalte de segunda capa con el esmalte de primera capa EB es buena, así como de este último con la placa metálica.

3.3 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO

Las placas con esmalte de segunda capa E2-7 fueron sometidas al ensayo para la determinación de la resistencia al choque térmico. Los resultados que se obtuvieron se reportan en la figura 3.2.

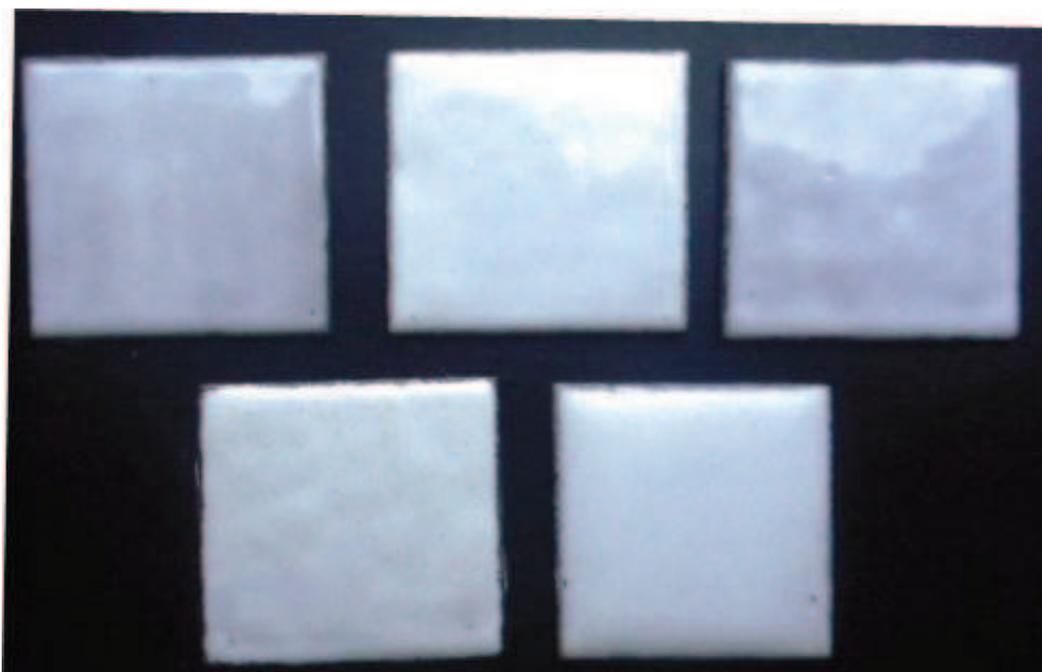


Figura 3.2 Placas luego de la prueba de resistencia al choque térmico

La evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia al choque térmico se muestra en la tabla 3.46.

Tabla 3.46 Tabla de resultado de la prueba de resistencia al choque térmico

CICLO	CHOQUE TÉRMICO [°C]*	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4	Placa 5
1	245±5,5 – 20	OK	OK	OK	OK	OK
2	260±5,5 – 20	OK	X	OK	OK	OK
3	275±5,5 – 20	OK	X	OK	OK	OK
4	287±5,5 – 20	OK	X	X	X	X
5	301±5,5 – 20	X	X	X	X	X

*Tomado del Anexo VII

De esta tabla se establece que los ciclos que soportaron las placas son 4, 1, 3, 3, 3 en las placas de la 1 a la 5. El promedio indica que el choque térmico fue de 3, por lo que se concluye que si una pieza está esmaltada bajo las condiciones de este trabajo, puede ser sometida al ciclo 3 que corresponde a $275 \pm 5,5$ °C e inmediatamente enfriada a 20 °C sin que sufra ninguna alteración de las características de la superficie.

La resistencia al choque térmico del esmalte E2-7 es menor que la resistencia del esmalte de primera capa EB, lo que se atribuye a la diferencia en los coeficientes de expansión térmica producto de la concentración de los óxidos de sodio y potasio y a la diferencia en el espesor de las 2 capas lo que hace que la transferencia de calor total, no sea homogénea ni a igual velocidad.

3.4 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL ATAQUE QUÍMICO

Placas con esmalte de segunda capa E2-7 fueron sometidas al ensayo para la determinación de la resistencia al ataque químico, luego del cual lucen como se observa en la figura 3.3



Figura 3.3 Placas a las que se realizó la prueba de resistencia al ácido cítrico

Los resultados luego de los cálculos de la cantidad de esmalte que se disuelve en la solución de ácido cítrico al 6% en ebullición, se reportan en la tabla 3.47.

Tabla 3.47 Resultado de la prueba de resistencia al ataque químico con ácido cítrico al 6% en ebullición

PLACA	DIFERENCIA DE PESOS [g]	ÁREA [cm ²]	PÉRDIDA POR ÁREA [$\frac{g}{cm^2}$]	PESO PERDIDO [%]
1	0,0417	9,6	0,00434	3,79
2	0,0458	9,9	0,00463	4,16
3	0,0410	9,9	0,00414	3,73
PROMEDIO			0,00437	3,89

Del análisis de los resultados que se reportan en la tabla 3.47 se concluye que la cantidad de esmalte disuelto es mínima si se considera que es la única causa de pérdida de peso, pero no se descarta la posibilidad de que también se disolvió o se desprendió algo del material con que se recubrió la superficie no esmaltada. La pérdida en peso del esmalte de segunda capa que se aplicó fue en promedio de 3,89 %.

El ejemplo de cálculo para la determinación de la pérdida por área se detalla en el Anexo VIII.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- a) El desarrollo del presente proyecto permitió estudiar el efecto de la relación de los óxidos de sodio y de potasio en la composición química de esmaltes de segunda capa, sobre la compatibilidad con la primera capa EB.
- b) La realización de este proyecto permitió formular esmaltes porcelánicos con diferentes relaciones de concentración entre los óxidos de sodio y de potasio como continuación del proyecto de Gómez (2011), dentro del intervalo de relaciones entre 3 y 22, con vidrio de desecho en la dosificación que llegó a aportar hasta el 25% del total de materia primas.
- c) Durante este proyecto se optimizaron las condiciones de cocción de los esmaltes de segunda capa E2-5, E2-8, E2-10, E2-22 en función del brillo, porcentaje de recubrimiento, entre otras propiedades de acabado.
- d) A mayor relación $\left[\frac{\text{Moles Na}_2\text{O}}{\text{Moles K}_2\text{O}}\right]$ existe poca compatibilidad entre las capas de esmalte porque se presentaron defectos de cuarteado y posteriormente de recogido. Los puntos negros se mantuvieron en todas las relaciones, esto demuestra que el esmalte de primera capa EB migra hacia la superficie de la segunda capa separándose inclusive de la probable interfase que se formó entre las dos capas.
- e) No se pudo encontrar, según los resultados que se obtuvieron, una firme dependencia entre el área recubierta con la relación de los óxidos de sodio y potasio pues se lograron superficies cubiertas entre el 85 y el 100 %, lo que indica que esta propiedad no depende únicamente de los óxidos que se estudiaron.

- f) A través del trabajo que se realizó no se obtuvo una segunda capa con espesor homogéneo. Esto indica que se debe analizar el efecto tanto de la cantidad como del tamaño de partícula del esmalte sobre esta propiedad.
- g) Al tomar en cuenta que el brillo que presenta una superficie esmaltada indica la formación o no de la fase vítrea y considerando que las rampas de los ciclos de cocción son semejantes, dentro de éstas la primera en la zona de enfriamiento, se concluye que en la composición química de un esmalte de segunda capa la relación entre los óxidos de sodio y de potasio debe estar sobre 5 y bajo 8.
- h) Las temperaturas de maduración en todas las relaciones que se estudiaron estuvieron bajo 800 °C.
- i) En los tiempos de maduración que se estudiaron se encontró que entre 5 y 10 minutos mejoran las características de acabado de las placas.
- j) El grado de adherencia de placas con esmalte E2-7 al aplicar una energía de impacto de 1,24 J, es de 3 (buena) mientras que para una energía de impacto de 2,59 J, es de 2 (media) según la morfología de adherencia por impacto de un cuerpo esférico. Esto indica que el esmalte es apto para aplicarlo sobre piezas que no sean sometidas a impactos mayores que 1,24 J como superficies de refrigeradoras, cocinas, etc.
- k) Placas con esmalte de segunda capa E2-7 resisten el intervalo de temperaturas entre 20 °C y $275 \pm 5,5$ °C. Por ello este esmalte no se puede aplicar sobre piezas que se usen a temperaturas mayores de este rango como en piezas de hornos o recipientes que se usen en hornos.
- l) El ataque químico con ácido cítrico al 6% produjo una pérdida promedio por área de $0,00434 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right]$ y un 3,89 % de pérdida promedio de peso inicial del esmalte E2-7.

4.2 RECOMENDACIONES

- a) Realizar el análisis de determinación de la adherencia mediante la medición de los coeficientes de expansión térmica usando un dilatómetro para realizar la aplicación sobre la primera capa de esmalte EB posterior a este análisis.
- b) Determinar la contaminación en esmaltes atronados y determinar límites aceptables para evitar presencia de defectos en esmaltado, mediante técnicas modernas como difracción de rayos x.
- c) Determinar el tipo de fase formada en los defectos de las placas mediante equipos modernos como microscopía electrónica.
- d) Realizar el estudio de pruebas de esmaltado con otros materiales de desecho tales como ceniza de cáscara de arroz, desechos de la industria cerámica, ceniza de carbón, etc. Con los que se puedan sustituir materias primas convencionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ahmad, Z. (2006). *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. Gran Bretaña. Reino Unido. Editorial Elsevier.
2. Amorós, J., Beltrán, V., Blasco A., Enrique J., Escardino A. y Negre F. (1991). *Defectos de Fabricación de Pavimentos y Revestimientos Cerámicos*. Valencia. España. Instituto de Tecnología Cerámica Universidad De Valencia.
3. ASTM Subcommittee C21.01. (2007). Standard Terminology of Ceramic Whitewares and related products. *Book of Standards*, 15(2), 2-11. doi: 10.1520/C0242-12
4. Baldwin C. y Feldman S. (2007). Surface tension and fusion properties of porcelain enamels. *69th Porcelain Enamel Institute Technical forum*, 28 (10), 1-10. Recuperado de: http://www.iei-orld.org/downloads/Articulo_Baldwin.pdf, (Agosto, 2011).
5. Baldwin C., Evele H. y McKinley K. (2012). *Analysis of fracture in Porcelain Enamels*. En 22nd International Enamellers Congress, Cologne, Alemania. Recuperado de <http://www.iei-world.org/downloads/22nd/11BaldwinAnalysis%20of%20Fracture%20in%20Porcelain%20Enamels.pdf> (Enero, 2013)
6. Barrena M., Gómez J., Soria A., Menéndez M. y González A. (2002). Estudio de la resistencia a la abrasión de capas vitrocerámicas depositadas sobre acero. *Boletín de la Sociedad española de Cerámica y vidrio*. 41 (6), 525-529. Recuperado de: <http://boletines.secv.es/upload/20090429112440.200241525.pdf>, (Junio, 2012)
7. Bucheli, F. (2003). *Fundamentos de química 2*. Quito. Ecuador. Ministerio de Educación y Cultura.

8. Cantavella, M. (2007). Composiciones de Fritas Cerámicas. Recuperado de: <http://www.ieselcaminas.org/apuntes/ceramica/composiciones/Fritas.pdf>. (Mayo, 2012).
9. Cantavella, M. (2008). Composiciones de Esmaltes Cerámicos. Recuperado de: <http://www.ieselcaminas.org/apuntes/ceramica/composiciones/Esmaltes%20ceramicos.pdf>. (Diciembre, 2011).
10. Carrillo, D. (2008). *Evaluación de las resistencias al choque térmico y al ácido cítrico en ebullición y de la adherencia de esmaltes porcelánicos*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). EPN. Quito. Ecuador.
11. Centro Italiano Smalti Porcellanati (CISP). (2010a). Il difetti della smaltatura su acciaio. *Tratto da smalto porcellanato tecnologia e marcanti*, 1/2004(24), 2-7. Recuperado de: http://www.cisp.it/download.php?nome=pdf_it_name&cmd=dload&pre=art&dato=pdf_it&id=583&lang=it, (Julio, 2011)
12. Centro Italiano Smalti Porcellanati (CISP). (2010b), Il difetti della smaltatura su acciaio. *Tratto da smalto porcellanato tecnologia e marcanti* 2/2004(25), 1-6. Recuperado de: http://www.cisp.it/download.php?nome=pdf_it_name&cmd=dload&pre=art&dato=pdf_it&id=583&lang=it, (Julio, 2011)
13. Endeka Ceramics Ltd. (2007). Zircosil technical data sheet. Asistencia técnica para usuarios Endeka. Stoke-on-Trent. Inglaterra. Recuperado de: http://www.endekaceramics.com/fileadmin/pdfs/Zircon/5601_-_Zircosil _D.pdf. (Febrero, 2013).
14. Estévez, I. (2008). *Influencia de la concentración de sulfato de níquel en la adherencia de esmaltes porcelánicos tipos capa base para recubrimiento de láminas de acero*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). EPN. Quito. Ecuador.

15. Forsbacka L. (2007). *Experimental study and modelling of viscosity of chromium containing slags*. (Tesis para optar por el grado de Doctor of Science Technology no publicada). Universidad de Tecnología Helsinki. Helsinki, Finlandia.
16. Franquesa R. y Mulero M. (2010). *Mejora del defecto de pinhole en la porcelana sanitaria*. (Memoria presentado para optar al título de Ingeniería Técnica Industrial especialidad QUIMICA INDUSTRIAL no publicada). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
17. 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). EPN. Quito. Ecuador.
18. Gypen L., (2012). *Porcelain (Vitreous) Enamel: European and International Standardización*. En 22nd International Enamellers Congress, Cologne, Alemania. Recuperado de <http://www.iei-world.org/downloads/22nd/18%20GypenEuropstand.pdf> (Enero, 2013)
19. Hevia R. Centritto N. Novaes P. Bernardín A. y Durán A. (2002). *Introducción a los esmaltes porcelánicos*. Castellón. España. CYTED (Red Iberoamericana sobre Ciencia y Tecnología de Materiales Vítreos).
20. Hevia, R. (2006). *Materias primas no convencionales en cerámica*. Recuperado de: <http://www.empremin.org.ar/pdf/ceramicas.pdf> (Febrero 2013)
21. International Enamels Institute (IEI). (2012). *Porcelain (Vitreous) Enamel*. En 22º Congreso Internacional de Esmaltadores. Cologne, Alemania. Recuperado de <http://www.iei-world.org/downloads/Porcelain%20Enamels-Presentatio-Cologne.zip> (Enero, 2013)

22. Kazanov Y., Nis Y. y Filatova D. (1994). Method for assessing the viscous properties of enamels. *Glass and Ceramics*, 51(1), 35-38. doi: 10.1007/BF00682537
23. Lazutkina O., Kazak A., Ponomareva M. (2011). Effect of enamel layer thickness on defectiveness of enamel coatings. *Glass and Ceramics*, 68 (1-2), 33-35. doi: 10.1007/s10717-011-9316-x
24. León, M. (2009). *Efecto de la concentración de los óxidos de circonio y de zinc sobre la compatibilidad entre esmaltes de primera y de segunda capa*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). EPN. Quito. Ecuador.
25. Majumdar A. y Jana S. (2001) Glass and glass-ceramic coatings, versatile materials for industrial and engineering applications. *Bullettin Mater Science de la Indian Academic of Science*. 24 (1), 69-77. doi: 10.1007/BF02704843
26. Mora M. (2008). *Determinación de la resistencia al impacto de esmaltes porcelánicos con diferentes concentraciones de óxido de silicio y óxido de boro*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). EPN. Quito. Ecuador.
27. Nebot D. (2001). *Compuestos tipo espinela $MII Al_2O_4$, mediante rutas de síntesis no convencionales. Aplicación a la industria cerámica*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del grado de Doctor en Ciencias Química no publicado). Universidad Jaume I. Castellón. España.
28. NTE INEN 0986:84. (1982). "Tejas Cerámicas. Definiciones, clasificación y condiciones generales". Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte/986.pdf> (Junio 2013)

29. NTE INEN 1800:06 (Subcomité Técnico Productos Cerámicos. Vajilla). (2005). *Productos Cerámicos. Vajilla. Determinación de la Resistencia al Impacto*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte1/1800> (Junio 2013)
30. NTE INEN 644:2000 (Subcomité Técnico Cerámica Plana). (1998), *Baldosas cerámicas. Definiciones, clasificación y características*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte/644.pdf> (Junio 2013)
31. Oscullo, J. (2009). *Efecto de la concentración de óxidos tipo MO en las propiedades del esmalte porcelánico capa base*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). EPN. Quito. Ecuador.
32. Pagliuca S. (2008). *Aderenza*. Ponencia presentada como Segunda lezione en el Politécnico de Milano. Milan. Italia. Recuperado de: http://www.cisp.it/download/2a_lezione-teoria_del_legame.pdf, (Julio, 2011)
33. Pagliuca S. (2009). *Project and design of the porcelain enameled steel composites*. Ponencia presentada en el Congreso Internacional de Cerámica, Vidrio, Esmalte Porcelánico, Vidriado y Pigmentos. Eskisehir. Turquía. Recuperado de http://www.iei-world.org/downloads/Project_Design_28_09.pdf, (Noviembre, 2011)
34. Pavón J. (2006). *Fractura y fatiga por contacto de recubrimientos de vidrio sobre Ti6414V para aplicaciones biomédicas*. (Tesis para optar al grado de Doctor no publicada). Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña. España.
35. Porcelain Enamel Institute (PEI). (2010). Properties of Porcelain Enamel- High temperature Properties. *Data Bulletin PEI* (504), 1-2. Recuperado de <http://www.porcelainenamel.com/pei504.htm>. (Octubre 2012)
36. Port, R. y Herro, H., 1997. *Guía Nalco para el análisis de Fallas de Calderas*. México DF. Estados Unidos de México. Mc Graw Hill.

37. Sánchez, E. (1994). *Aprovechamiento del catalizador usado de FCC de refinerías*. (Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Químicas). Universidad Jaume I de Castelló. Castellón. España.
38. Ubertazzi A. (2002). *Vitreous enamel*. Milano, Italia Editorial Ulrico Hoepli.
39. Vicentiz, J. (2007). Esmaltes Cerámicos. Presentado para asesoría técnica a usuarios de Suministros cerámicos. Vizcaya. España. Recuperado de: [http://www.vicentiz.com/Acrobat/Infoparcial/esmaltes /generalidades.pdf](http://www.vicentiz.com/Acrobat/Infoparcial/esmaltes/generalidades.pdf), (Octubre 2011)
40. Vielhaber, L. (2002). *Tecnología de los Esmaltes*. Barcelona. España. Editorial Reverté.
41. Villarreal, J. (2010). *Optimización de la concentración del óxido de titanio en esmaltes porcelánicos opacos y acabado de la superficie esmaltada*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). EPN. Quito. Ecuador.
42. Wachtman J. (2009). Particle size effect on the properties of electrostatic powders. *56 th Porcelain Enamel Institute Technical Forum: Ceramic Engeneering and Science Proceodings*. 15 (6), 101-103. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=c09h9BJkWGc&pg=PA101&lpg=PA101&dq=PORCELAIN+ENAMEL+FUSIBILITY&source=bl&ots=8gvWtv0LUg&sig=5a-V6tM3476-PrSXcE-hCG8YIY4&hl=en&sa=X&ei=Xpm_UbjZPJG 09gS-s4GoAQ&ved=0CDcQ6AEwAw#v=onepage&q=PORCELAIN%20ENAMEL%20FUSIBILITY&f=false. (Enero 2013)

ANEXOS

ANEXO I

DOSIFICACIÓN DE MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DE ESMALTE DE PRIMERA CAPA EB

El cálculo de la materia prima usada para la elaboración del esmalte se basa en el análisis de las materias primas disponibles y la fórmula molecular del esmalte de primera capa EB que se detalla en la tabla A.1.

Tabla A 1 Composición en moles del esmalte porcelánico de primera capa EB

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na ₂ O	0,450	Al ₂ O ₃	0,050	SiO ₂	1,900
K ₂ O	0,050			B ₂ O ₃	0,600
CaO	0,350				
NiO	0,150				

Con estos datos se dosifican las materias primas de forma que cualquier otro componente no exceda la cantidad de óxido descrito en la fórmula molecular:

- *Moles de bórax que aporten las moles de Óxido de sodio de la fórmula molecular del esmalte de primera capa EB.*



Para suplir la demanda de óxido de boro se toma de la tabla A.1 el dato:

$$0,6 \text{ mol B}_2\text{O}_3 * \frac{1 \text{ mol bórax}}{2 \text{ mol B}_2\text{O}_3} = 0,3 \text{ mol de bórax} \quad [2]$$

Con las 0,3 moles de bórax se aportan:



De la fórmula molecular del esmalte de primera capa EB se determina que faltan por aportar 0,15 moles de Na₂O, se lo cubre con el vidrio de desecho cuya fórmula molecular se describe en la tabla A.2.

Tabla A 2 Fórmula Molecular del vidrio de desecho

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na ₂ O	0,584	Al ₂ O ₃	0,064	SiO ₂	2,367
K ₂ O	0,020				
CaO	0,375				
MgO	0,022				

* Mora, 2008, p. 84

$$0,15 \text{ mol de Na}_2\text{O} * \frac{1 \text{ mol de vidrio}}{0,584 \text{ mol de Na}_2\text{O}} = 0,257 \text{ mol de vidrio} \quad [3]$$

Con estas moles de vidrio se aportan además los siguientes óxidos en las siguientes cantidades:

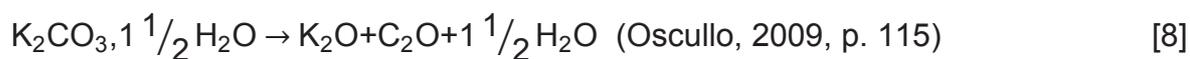
$$0,257 \text{ mol de vidrio} * \frac{0,020 \text{ moles de K}_2\text{O}}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,0051 \text{ mol de K}_2\text{O} \quad [4]$$

$$0,257 \text{ mol de vidrio} * \frac{0,375 \text{ moles de CaO}}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,0964 \text{ mol de CaO} \quad [5]$$

$$0,257 \text{ mol de vidrio} * \frac{0,064 \text{ moles de Al}_2\text{O}_3}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,0164 \text{ mol de Al}_2\text{O}_3 \quad [6]$$

$$0,257 \text{ mol de vidrio} * \frac{2,367 \text{ moles de SiO}_2}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,608 \text{ mol de SiO}_2 \quad [7]$$

Para cubrir el óxido de potasio se utiliza carbonato de potasio hidratado, quedan por dosificar 0,045 moles.



$$0,045 \text{ mol de K}_2\text{O} * \frac{1 \text{ mol de K}_2\text{CO}_3 \cdot 1 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}}{1 \text{ mol de K}_2\text{O}} = 0,045 \text{ mol de K}_2\text{CO}_3 \cdot 1 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \quad [9]$$

Para cubrir el óxido de calcio se utiliza carbonato de calcio. Falta por dosificar 0,254 moles.



$$0,254 \text{ mol de CaO} * \frac{1 \text{ mol de CaCO}_3}{1 \text{ mol de CaO}} = 0,254 \text{ mol de CaCO}_3 \quad [11]$$

Las 0,15 moles de óxido de níquel se dosifican con sulfato hexa hidratado de níquel.



$$0,150 \text{ mol de NiO} * \frac{1 \text{ mol de NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}}{1 \text{ mol de NiO}} = 0,150 \text{ mol de NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \quad [13]$$

Falta por dosificar 0,034 moles de óxido de aluminio y 1,292 moles de sílice que se aportan con alúmina y cuarzo respectivamente.

En la tabla A.3 se reporta la dosificación de las materias primas para elaborar la mezcla de materias primas para obtener el esmalte de primera capa EB.

Tabla A 3 Dosificación de materias primas para elaborar el esmalte de primera capa EB

Materia Prima	Moles materias primas. [gmol]	Peso molecular de cada materia prima. [g/gmol]	Peso de cada materia prima [g]	Porcentaje en peso [%]
Bórax	0,300	381,220	114,366	35,59
Vidrio	0,257	208,780	53,656	16,70
Carbonato hidratado de potasio	0,045	165,220	7,435	2,31
Carbonato de calcio	0,254	100,087	25,422	7,91
Sulfato de níquel hexa-hidratado	0,150	262,757	39,414	12,26
Alúmina	0,034	101,961	3,467	1,08
Cuarzo	1,292	60,084	77,629	24,15

En la tabla A.4 se reporta la dosificación de las materias primas necesarias para preparar 40 g de mezcla para preparar esmalte de primera capa EB.

Tabla A 4 Materias primas que suman 40 g mezcla para hacer esmalte de primera capa EB

Materia Prima	Masa de materias primas para preparar 40 g de mezcla. [g]
Bórax	14,234
Vidrio	6,678
Carbonato hidratado de potasio	0,925
Carbonato de calcio	3,164
Sulfato de níquel hexa-hidratado	4,905
Alúmina	0,431
Cuarzo	9,662

ANEXO II

CÁLCULO DE LAS RELACIONES DE CONCENTRACIÓN ENTRE LOS ÓXIDOS DE SODIO Y DE POTASIO

Para el cálculo de las moles de cada óxido alcalino según la relación se partió de la fórmula molecular descrita en la tabla 2.10. Se mantuvo la suma de estos óxidos en 0,4 moles como en la fórmula original, y el valor de la relación de esta fórmula inicial es 7.

Se muestra el ejemplo de cálculo para la relación 3:

Valor de la relación:

$$\frac{n_{\text{óxido de sodio}}}{n_{\text{óxido de potasio}}}=3 \quad [14]$$

$$n_{\text{óxido de sodio}}=3*n_{\text{óxido de potasio}} \quad [15]$$

Moles de óxidos alcalinos

$$n_{\text{óxido de sodio}}+n_{\text{óxido de potasio}}=0,350+0,050=0,400 \quad [16]$$

Despejando las moles de óxido de potasio para con la relación del valor de la relación encontrar la cantidad de las moles de óxidos de sodio.

$$3*n_{\text{óxido de potasio}}+n_{\text{óxido de potasio}}=0,400 \quad [17]$$

$$n_{\text{óxido de potasio}}=0,100 \quad [18]$$

$$n_{\text{óxido de sodio}}=0,300 \quad [19]$$

En la tabla A.5 se detallan las moles de cada óxido según la relación escogida, se marcó con rojo la relación de la fórmula inicial.

Tabla A 5 Dosificación de los óxidos de sodio y de potasio para varias relaciones entre sus concentraciones

Relación	Moles de Óxido de Potasio	Moles de Óxido de Sodio	Sumatoria
1	0,200	0,200	0,400
2	0,133	0,267	0,400
3	0,100	0,300	0,400
4	0,080	0,320	0,400
5	0,067	0,333	0,400
6	0,057	0,343	0,400
7	0,050	0,350	0,400
8	0,044	0,356	0,400
9	0,040	0,360	0,400
10	0,036	0,364	0,400
11	0,033	0,367	0,400
12	0,031	0,369	0,400
13	0,029	0,371	0,400
14	0,027	0,373	0,400
15	0,025	0,375	0,400
16	0,024	0,376	0,400
17	0,022	0,378	0,400
18	0,021	0,379	0,400
19	0,020	0,380	0,400
20	0,019	0,381	0,400
21	0,018	0,382	0,400
22	0,017	0,383	0,400
23	0,017	0,383	0,400
24	0,016	0,384	0,400
25	0,015	0,385	0,400
26	0,015	0,385	0,400
27	0,014	0,386	0,400
28	0,014	0,386	0,400
29	0,013	0,387	0,400
30	0,013	0,387	0,400

Tabla A.5 Dosificación de los óxidos de sodio y de potasio para varias relaciones entre sus concentraciones (**Continuación...**)

Relación	Moles de Óxido de Potasio	Moles de Óxido de Sodio	Sumatoria
31	0,013	0,388	0,400
32	0,012	0,388	0,400
33	0,012	0,388	0,400
34	0,011	0,389	0,400
35	0,011	0,389	0,400
36	0,011	0,389	0,400
37	0,011	0,389	0,400
38	0,010	0,390	0,400
39	0,010	0,390	0,400
40	0,010	0,390	0,400
41	0,010	0,390	0,400
42	0,009	0,391	0,400
43	0,009	0,391	0,400
44	0,009	0,391	0,400
45	0,009	0,391	0,400
100	0,004	0,396	0,400

ANEXO III

DOSIFICACIÓN DE MATERIAS PRIMAS PARA LA PREPARACIÓN DEL ESMALTE PORCELÁNICO DE SEGUNDA CAPA

Los cálculos que se usaron en la dosificación de materias primas para elaborar los esmaltes de segunda capa se realizaron en forma similar a la del Anexo I.

Se tomó como base la fórmula molecular del esmalte de segunda capa desarrollado en un proyecto anterior (Gómez, 2011, p. 81) que se muestra en la tabla A.6

Tabla A 6 Fórmula molecular del esmalte porcelánico de segunda capa tomado como base para el presente estudio

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na ₂ O	0,350	Al ₂ O ₃	0,050	SiO ₂	1,900
K ₂ O	0,050			B ₂ O ₃	0,800
CaO	0,150				
ZrO ₂	0,350				
ZnO	0,100				

De las relaciones que se escogieron se determinaron las moles de cada óxido alcalino como se detalla en la tabla A 7

Tabla A 7 Relaciones estudiadas en el presente proyecto

Relación: [mol Na ₂ O / mol K ₂ O]	mol Na ₂ O	mol K ₂ O
3	0,300	0,100
4	0,320	0,080
5	0,333	0,067
8	0,356	0,044
9	0,360	0,040
10	0,364	0,036
14	0,373	0,027
22	0,375	0,025

Con la fórmula molecular de cada esmalte con diferente relación se procedió a dosificar las materias primas. Se realiza el ejemplo de cálculo para el esmalte de segunda capa con relación 3, para ello se detalla la fórmula molecular en la tabla A.8.

Tabla A 8 Fórmula molecular del esmalte porcelánico de segunda capa con relación de los óxidos de sodio y de potasio igual a 3

Óxidos Modificadores		Óxidos Intermedios		Óxidos Formadores	
Na ₂ O	0,300	Al ₂ O ₃	0,050	SiO ₂	1,900
K ₂ O	0,100			B ₂ O ₃	0,800
CaO	0,150				
ZrO ₂	0,350				
ZnO	0,100				

Se inicia de modo que se use la mayor cantidad de vidrio que aporte las moles de óxido de la fórmula sin que sobrepase en ningún caso las necesarias, se inicia supliendo las 0,15 moles de óxido de calcio.

$$0,150 \text{ mol de CaO} * \frac{1 \text{ mol de vidrio}}{0,375 \text{ mol de CaO}} = 0,400 \text{ mol de vidrio} \quad [20]$$

Las 0,400 moles de vidrio con las que se aportó el óxido de calcio aportan además las siguientes moles de óxidos:

$$0,400 \text{ mol de vidrio} * \frac{0,020 \text{ moles de K}_2\text{O}}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,008 \text{ mol de K}_2\text{O} \quad [21]$$

$$0,400 \text{ mol de vidrio} * \frac{0,584 \text{ moles de Na}_2\text{O}}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,0964 \text{ mol de Na}_2\text{O} \quad [22]$$

$$0,400 \text{ mol de vidrio} * \frac{0,064 \text{ moles de Al}_2\text{O}_3}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,0256 \text{ mol de Al}_2\text{O}_3 \quad [23]$$

$$0,400 \text{ mol de vidrio} * \frac{2,367 \text{ moles de SiO}_2}{1 \text{ mol de vidrio}} = 0,9468 \text{ mol de SiO}_2 \quad [24]$$

Las materias primas disponibles para la dosificación de los esmaltes porcelánicos de segunda capa son los que se detallan en la tabla A.9.

Tabla A 9 Materia primas disponibles para la preparación de esmalte de segunda capa

Materia Prima	Óxido que aporta	Características
Vidrio de desecho	SiO ₂ , Na ₂ O, CaO, Al ₂ O ₃ , K ₂ O, MgO	Fórmula: Anexo I Proveniente de botellas para licor.
Carbonato de Potasio	K ₂ O	Fórmula: K ₂ CO ₃ .1½ H ₂ O Peso Molecular: 165.22 [g/gmol]; BDH. 99% pureza.
Carbonato de Calcio	CaO	Fórmula: CaCO ₃ . Peso molecular: 100 [g/gmol]; Panreac 99% Pureza.
Sulfato de Níquel	NiO	Fórmula: NiSO ₄ .6H ₂ O. Marca Merck, Zur Analize, 99% pureza.
Alúmina	Al ₂ O ₃	Fórmula: Al ₂ O ₃ . Peso molecular: 101,961 [g/gmol]; BDH.
Bórax	Na ₂ O, B ₂ O ₃	Fórmula: Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O. Grado técnico.
Cuarzo	SiO ₂	Fórmula: SiO ₂ . Parte de los reactivos de laboratorio.
Óxido de Zinc	ZnO	Fórmula: ZnO. Grado reactivo.
Zircosil	ZrO ₂ .SiO ₂	Fórmula: ZrO ₂ .SiO ₂ . Proveniente del reactivos de Edesa.
Ácido Bórico	H ₃ BO ₃	Fórmula: H ₃ BO ₃ . Reactivo de la botica alemana.

Las 0,1 moles de óxido de zinc, 0,953 moles de cuarzo y 0,024 moles de alúmina se aportan directamente de las materia primas disponibles.

Las 0,204 moles óxido de sodio se aportan con Bórax así:



$$0,204 \text{ mol Na}_2\text{O} * \frac{1 \text{ mol bórax}}{1 \text{ mol Na}_2\text{O}} = 0,204 \text{ mol de bórax} \quad [26]$$

Con las 0,204 moles de bórax se aportan además las siguientes moles de óxido de boro:

$$0,204 \text{ mol Bórax} * \frac{2 \text{ mol B}_2\text{O}_3}{1 \text{ mol bórax}} = 0,408 \text{ mol de bórax} \quad [27]$$

Las moles de óxido de boro que faltan por aportar son:

$$\text{Moles por aportar} = 0,800 - 0,408 = 0,392 \text{ moles de B}_2\text{O}_3 \quad [28]$$

Estas moles se aportarán del ácido bórico



$$0,392 \text{ mol B}_2\text{O}_3 * \frac{2 \text{ mol de H}_3\text{BO}_3}{1 \text{ mol B}_2\text{O}_3} = 0,784 \text{ mol de H}_3\text{BO}_3 \quad [30]$$

Las 0,092 moles de óxido de potasio se cubren con carbonato de potasio hidratado así:



$$0,092 \text{ mol de K}_2\text{O} * \frac{1 \text{ mol de K}_2\text{CO}_3 \cdot 1 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}}{1 \text{ mol de K}_2\text{O}} = 0,092 \text{ mol de K}_2\text{CO}_3 \cdot 1 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \quad [32]$$

Las 0,35 moles de óxido de zirconio se suplen con zircosil cuya descomposición en los óxidos de zirconio y de silicio es la siguiente:



Se conoce que la composición del Zircosil contiene un 60 % en peso de óxido de circonio (Endeka, 2007) por lo que se asume dicho porcentaje para el cálculo de los esmaltes:

$$0,35 \text{ mol de ZrO}_2 * \frac{123,224 \text{ g ZrO}_2}{1 \text{ mol de ZrO}_2} * \frac{1 \text{ g zircosil}}{0,6 \text{ g ZrO}_2} * \frac{1 \text{ mol de zircosil}}{183,308 \text{ g zircosil}} = 0,3921 \text{ mol de zircosil} \quad [34]$$

La aportación de moles de óxido de silicio por parte de las moles de zircosil se basa en un 30 % de contenido de óxido de silicio (Endeka, 2007) que será:

$$0,392 \text{ mol zircosil} * \frac{183,308 \text{ g zircosil}}{1 \text{ mol zircosil}} * \frac{0,3 \text{ g SiO}_2}{1 \text{ g zircosil}} * \frac{1 \text{ mol SiO}_2}{60,084 \text{ g SiO}_2} = 0,359 \quad [35]$$

Las moles de óxido de silicio que faltan por añadir con el cuarzo serán:

$$\text{moles de SiO}_2 \text{ por aportar} = 0,953 - 0,359 = 0,594 \text{ moles de SiO}_2 \quad [36]$$

Los gramos de cada materia prima que se deben aportar para preparar 40 g de mezcla para preparar esmalte con relación moles de óxido de sodio a moles de óxido de potasio igual a 3 se detallan en la siguiente lista:

Materia Prima	Peso de cada materia prima [g]
Vidrio	10,287
Óxido de Zinc	1,002
Óxido de aluminio	0,306
Bórax	3,118
Ácido Bórico	10,161
Carbonato de Potasio hidratado	1,872
Zircosil	8,854
Cuarzo	4,400
TOTAL MEZCLA [g]	40,000

ANEXO IV

CICLO DE COCCIÓN (CC-C10) DEL ESMALTE DE SEGUNDA CAPA E2-7

En la tabla A.17 se observa el ciclo de cocción que se aplicó y los procesos que ocurren en cada temperatura, el mismo se observa en la figura A 1.

Tabla A 10 Ciclo de cocción aplicado a placas con esmalte porcelánico de segunda capa E2-7

Proceso	CC-C10	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	Tambiente-700	29
	700	10
	700-760	12
Maduración	760	15
Enfriamiento	760-600	10
	650	5
	650-Tambiente	>400

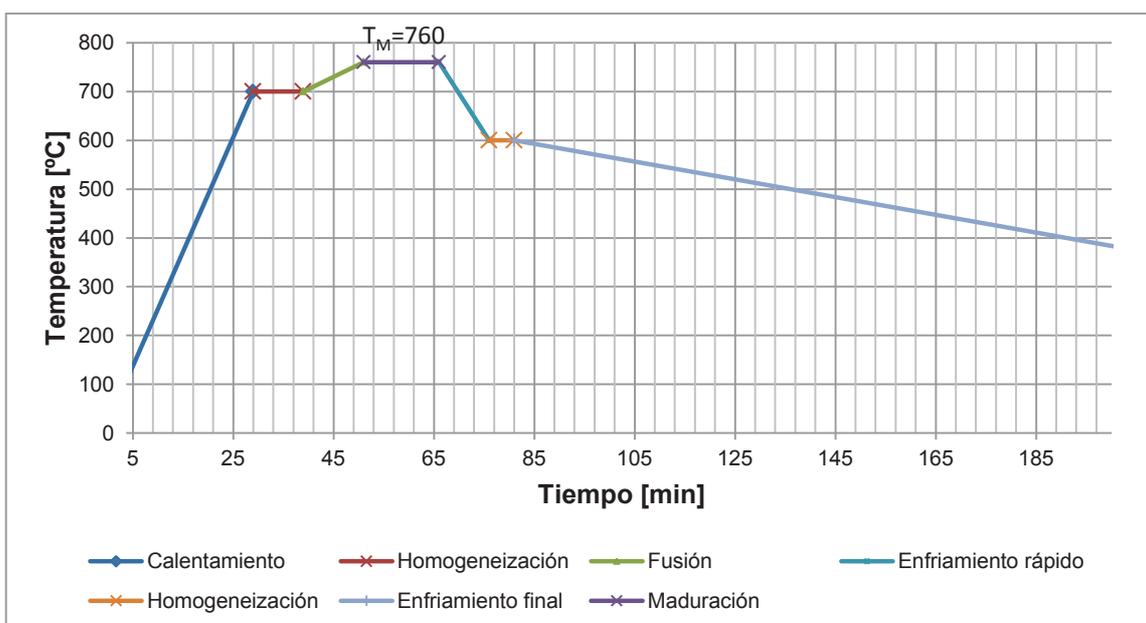


Figura A 1 Ciclo de cocción que se aplicó a placas con esmalte de segunda capa E2-7 con el horno mufla Wise Therm

ANEXO V

CICLOS DE COCCIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS DE SEGUNDA CAPA

En las tablas A 10, A 11 y A12 se muestran los ciclos de cocción aplicados a cada uno de los esmaltes porcelánico con relaciones 5, 8, 10, 22.

Tabla A 11 Ciclo de cocción aplicado a placas con segunda capa de esmalte de diferente relación de concentración de óxido de sodio y de potasio

Proceso	Ciclo de cocción CC-C1		Ciclo de cocción CC-C2		Ciclo de cocción CC-C3	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	T _{ambiente} -700	29	T _{ambiente} -700	29	T _{ambiente} -700	29
	700	10	700	10	700	10
	700-840	14	700-800	13	700-780	12
Maduración	840	10	800	10	780	10
Enfriamiento	840-600	37	800-600	37	780-600	27
	600	5	600	5	600	5
	600-T _{ambiente}	>400	600-T _{ambiente}	>400	600-T _{ambiente}	>400

Tabla A 12 Ciclo de cocción aplicado a placas con segunda capa de esmalte de diferente relación de concentración de óxido de sodio y de potasio

Etapa	Ciclo de cocción CC-C4		Ciclo de cocción CC-C5		Ciclo de cocción CC-C6	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	T _{ambiente} -700	29	T _{ambiente} -700	29	T _{ambiente} -700	29
	700	10	700	10	700	10
	700-760	12	700-840	12	700-780	12
Maduración	760	10	840	20	780	20
Enfriamiento	760-600	27	840-600	37	780-600	27
	600	5	600	5	600	5
	600-T _{ambiente}	>400	600-T _{ambiente}	>400	600-T _{ambiente}	>400

Tabla A 13 Ciclo de cocción aplicado a placas con segunda capa de esmalte de diferente relación de concentración de óxido de sodio y de potasio

Etapa	Ciclo de cocción CC-C7		Ciclo de cocción CC-C8	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	T _{ambiente} -700	29	T _{ambiente} -700	29
	700	10	700	10
	700-760	12	700-750	12
Maduración	760	20	750	20
Enfriamiento	760-600	27	750-600	27
	600	5	600	5
	600-T _{ambiente}	>400	600-T _{ambiente}	>400

En las tablas A.13, A 14, A15 y A 16 se muestran los ciclos de cocción aplicados a los esmaltes porcelánicos de segunda capa con mejores acabados a la temperatura de maduración indicada en cada caso, con la variación en el tiempo de maduración.

Tabla A 14 Ciclos de cocción en que se varía el tiempo de maduración en el esmalte E2-8, con temperatura de maduración de 780 °C

Proceso	Ciclo de cocción CC-C9		Ciclo de cocción CC-C10	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	T _{ambiente} -700	29	T _{ambiente} -700	29
	700	10	700	10
	700-760	12	700-760	12
Maduración	760	5	760	15
Enfriamiento	760-600	10	760-600	10
	600	5	600	5
	600-T _{ambiente}	>400	600-T _{ambiente}	>400

Tabla A 15 Ciclos de cocción en que se varía el tiempo de maduración en el esmalte E2-10, con temperatura de maduración de 800 °C

Proceso	Ciclo de cocción CC-C11		Ciclo de cocción CC-C12	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	$T_{\text{ambiente}}-700$	29	$T_{\text{ambiente}}-700$	29
	700	10	700	10
	700-800	12	700-800	12
Maduración	800	5	800	15
Enfriamiento	800-600	37	800-600	37
	600	5	600	5
	$600-T_{\text{ambiente}}$	>400	$600-T_{\text{ambiente}}$	>400

Tabla A 16 Ciclos de cocción en que se varía el tiempo de maduración en el esmalte E2-22, con temperatura de maduración de 780 °C

Proceso	Ciclo de cocción CC-C13		Ciclo de cocción CC-C14		Ciclo de cocción CC-C15	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	$T_{\text{ambiente}}-700$	29	$T_{\text{ambiente}}-700$	29	$T_{\text{ambiente}}-700$	29
	700	10	700	10	700	10
	700-780	12	700-780	12	700-780	12
Maduración	780	5	780	10	780	15
Enfriamiento	780-600	27	780-600	27	780-600	27
	600	5	600	5	600	5
	$600-T_{\text{ambiente}}$	>400	$600-T_{\text{ambiente}}$	>400	$600-T_{\text{ambiente}}$	>400

Tabla A 17 Ciclos de cocción en que se varía el tiempo de maduración en el esmalte E2-22, con temperatura de maduración de 780 °C

Proceso	Ciclo de cocción CC-C16		Ciclo de cocción CC-C17	
	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Calentamiento	$T_{\text{ambiente}}-700$	29	$T_{\text{ambiente}}-700$	29
	700	10	700	10
	700-780	12	700-780	12
Maduración	780	25	780	30
Enfriamiento	780-600	27	780-600	27
	600	5	600	5
	$600-T_{\text{ambiente}}$	>400	$600-T_{\text{ambiente}}$	>400

ANEXO VI

**ANÁLISIS DE ADHERENCIA: ENSAYO RESISTENCIA AL
IMPACTO POR IMPACTO DE UN OBJETO ESFÉRICO**



Figura A 2 Formas de comparación para determinar la adherencia de esmaltes porcelánicos impactados por objetos esféricos
(Mora, 2008, p. 105)

Adherencia 0 = mala, el esmalte se desprende de la placa.

Adherencia 1 = media, el impacto forma círculos concéntricos acentuados.

Adherencia 2 = media, el impacto forma círculos concéntricos moderadamente acentuados.

Adherencia 3 = buena, no se observan círculos concéntricos.

Adherencia 4 = excelente, se forma una estrella en el lugar del impacto.

ANEXO VII

CICLO DE TEMPERATURAS Y TIEMPOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO DE PIEZAS CON ESMALTE PORCELÁNICO

CICLO	TEMPERATURA DE LA MUFLA (°C)	TIEMPO DE CALENTAMIENTO (min)
1	245±5,5	3
2	260±5,5	8
3	275±5,5	8
4	287±5,5	8
5	301±5,5	8
6	315±5,5	8
7	329±5,5	8
9	357±5,5	8
11	385±5,5	8
13	413±5,5	8
15	440±5,5	8

(Carrillo, 2008, p. 49)

ANEXO VIII

CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL ATAQUE QUÍMICO: PÉRDIDA DE PESO POR ÁREA Y PORCENTAJE DE PÉRDIDA POR PESO DE ESMALTE QUE SE APLICÓ

Para realizar el análisis de la resistencia al ácido cítrico al 6% en ebullición se tomaron los pesos de las placas sometidas a la prueba al inicio y al final de la misma, los datos se reportan en la tabla A.18.

Tabla A 18 Datos de la pérdida de peso luego del ensayo de resistencia al ataque por ácido cítrico al 6% en ebullición

Placa N ^a	Peso Inicial [g]	Peso final [g]	Diferencia [g]
1	8,3395	8,2978	0,0417
2	8,0958	8,0500	0,0458
3	8,1242	8,0832	0,0410
Promedio			0,0428

Las áreas de las placas que se usaron en la prueba se detallan en la tabla A.19.

Tabla A 19 Datos de la pérdida de peso luego del ensayo de resistencia al ataque por ácido cítrico al 6% en ebullición

Placa N ^a	Largo [cm]	Ancho [cm]	Área [cm ²]
1	3,2	3,0	9,6
2	3,3	3,0	9,9
3	3,3	3,0	9,9
Promedio			9,8

El cálculo del área se realizó así:

$$\text{Área} = \text{Largo} \times \text{Ancho} \quad [37]$$

$$\text{Área} = 3,2 \times 3,0 \text{ [cm}^2\text{]} \quad [38]$$

$$\text{Área} = 9,6 \text{ [cm}^2\text{]} \quad [39]$$

El cálculo de la pérdida por área se calculó así:

$$\text{Pérdida por Área} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Área}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right] \quad [40]$$

$$\text{Pérdida por Área} = \frac{0,0417}{9,6} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right] \quad [41]$$

$$\text{Pérdida por Área} = 0,00434 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right] \quad [42]$$

Finalmente, se calculó el promedio de los datos obtenidos y se reportó como la resistencia del esmalte al ácido cítrico al 6% en ebullición o ataque químico.

El porcentaje de pérdida de esmalte se calculó tomando en cuenta la diferencia de pesos de las placas antes y después de la prueba y se sacó el porcentaje con respecto a la cantidad de esmalte que se aplicó, de la siguiente forma.

$$\text{Porcentaje de pérdida} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso de esmalte que se aplicó}} * 100 \quad [43]$$

$$\text{Porcentaje de pérdida} = \frac{0,0417}{1,1} * 100 \quad [44]$$

$$\text{Porcentaje de pérdida} = 3,79 \% \quad [45]$$

Finalmente, se calculó el promedio de los datos obtenidos y se reportó como el porcentaje de pérdida de esmalte luego del ataque de ácido cítrico al 6% en ebullición o ataque químico, como se observa en la tabla A.20.

Tabla A 20 Datos de la pérdida de peso luego del ensayo de resistencia al ataque por ácido cítrico al 6% en ebullición

Placa N ^a	Peso Inicial [g]	Peso final [g]	Diferencia [g]	Peso de esmalte sobre la placa [g]	Pérdida [%]
1	8,3395	8,2978	0,0417	1,1	3,79
2	8,0958	8,0500	0,0458	1,1	4,16
3	8,1242	8,0832	0,0410	1,1	3,73
Promedio					3,89