

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**“EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDOS TIPO MO EN LAS
PROPIEDADES DEL ESMALTE PORCELÁNICO CAPA BASE”**

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

**JOHANNA LORENA OSCULLO ARBOLEDA
JELOL@yahoo.es**

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

Quito, Septiembre 2009

© Escuela Politécnica Nacional 2009
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Johanna Lorena Oscullo Arboleda, declaro que el trabajo aquí descrito es de mí autoría; que no ha sido 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.

Johanna Lorena Oscullo Arboleda

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Johanna Lorena Oscullo Arboleda, bajo mi supervisión.

Ing. Luís Mera
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

En la finalización de una etapa importante de mi vida agradezco de todo corazón a Dios, por ser siempre mi guía y darme la fuerza que se necesita para salir adelante en los momentos difíciles.

A mis Padres por acompañarme y apoyarme siempre durante toda mi carrera.

A mi marido por ser siempre mi apoyo y brazo derecho en todas las actividades de mi vida.

A mi hijo por ser la luz que guía mi camino.

A mis hermanos por brindarme su comprensión y ayuda desinteresada.

Al Ingeniero Luís Mera por la paciencia, confianza, consejos y acertada dirección durante la realización de este trabajo.

A los Ingenieros Luís Lascano y Pedro Vásquez por su colaboración en la realización de éste proyecto.

A todas mis amigas por su amistad, ayuda y apoyo.

DEDICATORIA

A mi Madre querida Elsitita por su amor y apoyo incondicional, a mi marido Luis León por ser comprensivo y creer en mí, y a mi hijo Jean Pierre por ser el motor de mi vida y la alegría de mi hogar.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	xviii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.1. Esmaltes porcelánicos.....	1
1.1.1. Funciones.....	4
1.1.2. Factores controladores de la composición de los esmaltes porcelánicos.	8
1.1.2.1. Control de la materia prima.	8
1.1.2.2. Control del proceso de esmaltado.....	11
1.1.2.3. Control de la superficie esmaltada.....	12
1.1.3. Formulación de los esmaltes porcelánicos.	13
1.2. Efecto de los óxidos tipo MO sobre las propiedades del esmalte porcelánico.....	17
1.2.1. Adherencia de esmaltes a metales	18
1.2.2. Coeficiente de dilatación	19
1.2.3. Opacidad	20
1.2.4. Viscosidad y tensión superficial	21
1.2.5. Resistencia contra ácidos.....	22
1.2.6. Resistencia contra álcalisis	22
1.2.7. Espesor de la película de esmalte	23
1.2.8. Color y textura	24
1.2.9. Resistencia contra el choque térmico	25
1.2.10. Resistencia contra la abrasión.....	25
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
2.1. Preparación de los esmaltes tipo capa base con variación de la concentración de óxido de calcio.....	27
2.1.1. Formulación de los esmaltes porcelánicos	27
2.1.2. Fritado de los esmaltes porcelánicos.	28
2.1.2.1. Dosificación de las materias primas.	28
2.1.2.2. Preparación de las materias primas.	28
2.1.2.3. Preparación de la mezcla de materias primas.....	32
2.1.2.4. Obtención y fritado de los esmaltes.....	32
2.2. Preparación de los esmaltes tipo capa base con variación de la concentración de óxido de magnesio.....	35
2.2.1. Formulación de los esmaltes porcelánicos.	36
2.2.2. Fritado de los esmaltes porcelánicos.	36
2.2.2.1. Dosificación de las materias primas.	36
2.2.2.2. Preparación de las materias primas.	37
2.2.2.3. Preparación de la mezcla de materias primas.....	37
2.2.2.4. Obtención y fritado de los esmaltes.....	37

2.3. PREPARACIÓN DE LOS ESMALTES TIPO CAPA BASE CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.....	37
2.3.1. FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS.....	38
2.3.2. FRITADO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS.....	38
2.3.2.1. Dosificación de las materias primas.....	38
2.3.2.2. Preparación de las materias primas.....	39
2.3.2.3. Preparación de la mezcla de materias primas.....	39
2.3.2.4. Obtención y fritado de los esmaltes.....	39
2.4. DETERMINACIÓN DE LOS MEJORES CICLOS DE COCCIÓN.....	39
2.4.1. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.....	40
2.4.1.1. Preparación de las placas de acero.....	40
2.4.1.2. Aplicación del esmalte crudo.....	41
2.4.1.3. Determinación de la temperatura de maduración.....	43
2.4.1.4. Determinación del tiempo de maduración.....	44
2.4.1.5. Aplicación del ciclo de cocción óptimo a los esmaltes porcelánicos E-2, E2-1 y E-3.....	45
2.4.2. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.....	46
2.4.2.1. Preparación de las placas de acero.....	46
2.4.2.2. Aplicación del esmalte crudo.....	46
2.4.2.3. Determinación de la temperatura de maduración.....	46
2.4.2.4. Determinación del tiempo de maduración.....	48
2.4.2.5. Aplicación del ciclo de cocción óptimo a los esmaltes porcelánicos E-5 y E5-1.....	48
2.4.3. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.....	48
2.4.3.1. Preparación de las placas de acero.....	49
2.4.3.2. Aplicación del esmalte crudo.....	49
2.4.3.3. Determinación de la temperatura de maduración.....	49
2.4.3.4. Determinación del tiempo de maduración.....	50
2.4.3.5. Aplicación del ciclo de cocción óptimo a los esmaltes porcelánicos E-7 y E-8.....	51
2.5. EVALUACIÓN DE LAS RESISTENCIAS AL CHOQUE TÉRMICO Y AL IMPACTO.....	51
2.5.1. DETERMINACIÓN DE LAS RESISTENCIAS AL CHOQUE TÉRMICO Y AL IMPACTO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.....	51
2.5.1.1. Pruebas para la determinación de la resistencia al choque térmico.....	52
2.5.1.2. Pruebas para la determinación de la resistencia al impacto.....	54
2.5.2. DETERMINACIÓN DE LAS RESISTENCIAS AL CHOQUE TÉRMICO Y AL IMPACTO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.....	56

2.5.2.1.	Pruebas para la determinación de la resistencia al choque térmico.....	57
2.5.2.2.	Pruebas para la determinación de la resistencia al impacto.....	57
2.5.3.	DETERMINACIÓN DE LAS RESISTENCIAS AL CHOQUE TÉRMICO Y AL IMPACTO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.	57
2.5.3.1.	Pruebas para la determinación de la resistencia al choque térmico.....	58
2.5.3.2.	Pruebas para la determinación de la resistencia al impacto.....	58
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.1.	FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS.....	59
3.1.1.	FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.	59
3.1.2.	FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.....	62
3.1.3.	FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.	65
3.2.	DETERMINACIÓN DE LOS CICLOS DE COCCIÓN.	68
3.2.1.	DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.	68
3.2.1.1.	Determinación de la temperatura de maduración.....	68
3.2.1.2.	Determinación del tiempo de maduración.....	71
3.2.1.3.	Aplicación del ciclos de cocción A y B en los esmaltes E-2, E2-1 y E-3.....	75
3.2.2.	DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.	78
3.2.2.1.	Determinación de la temperatura de maduración.....	79
3.2.2.2.	Determinación del tiempo de maduración.....	80
3.2.2.3.	Aplicación del ciclo de cocción C en los esmaltes E-5 y E5-1.	83
3.2.3.	DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.	85
3.2.3.1.	Determinación de la temperatura de maduración.....	85
3.2.3.2.	Determinación del tiempo de maduración.....	87
3.2.3.3.	Aplicación del ciclo de cocción D en los esmaltes E-7 y E-8.....	89
3.3.	EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO.	91
3.3.1.	DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.	91
3.3.2.	DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.....	94
3.3.3.	DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.	95

3.4. EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA AL IMPACTO.....	97
3.4.1. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.	97
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
4.1. CONCLUSIONES.....	106
4.2. RECOMENDACIONES.	108

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1.1: Composiciones químicas de aceros dulces.....	5
Tabla 1.2: Métodos de cálculo de la composición con porcentaje en peso y análisis químico de un esmalte porcelánico.	14
Tabla 1.3: Método de cálculo de la composición con fórmula molecular empírica o fórmula Seger de un esmalte porcelánico.....	15
Tabla 1.4: Método de cálculo de la composición con fórmula iónica empírica de un esmalte porcelánico.	16
Tabla 1.5: Factores de Mayer y Hayas	19
Tabla 2.1: Equipos para la preparación de materias primas.....	29
Tabla 2.2: Equipo para la obtención del esmalte atronado.....	33
Tabla 2.3: Instrumentos y materiales para la limpieza de las placas de acero.	40
Tabla 2.4: Instrumentos para la aplicación del esmalte crudo.	42
Tabla 2.5: Equipo para la determinación de la temperatura de maduración.	43
Tabla 2.6: Equipo para la determinación del tiempo de maduración.....	45
Tabla 2.7: Equipo para la determinación de la temperatura de maduración.	47
Tabla 2.8: Equipo para la determinación de la temperatura de maduración.	50
Tabla 2.9: Equipo y material para la prueba de choque térmico.	52
Tabla 3.1: Fórmula molecular del esmalte E-1.	59
Tabla 3.2: Fórmula molecular del esmalte E-2.	60
Tabla 3.3: Fórmula molecular del esmalte porcelánico E2-1.....	60
Tabla 3.4: Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-3.....	60
Tabla 3.5: Dosificación de materias primas del esmalte E-1.	61
Tabla 3.6: Dosificación de materias primas del esmalte E-2.	61
Tabla 3.7: Dosificación de materias primas del esmalte E2-1.	61

Tabla 3.8: Dosificación de materias primas del esmalte E-3.	62
Tabla 3.9: Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-4.....	62
Tabla 3.10: Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-5.....	63
Tabla 3.11: Fórmula Molecular del esmalte porcelánico E5-1.	63
Tabla 3.12: Dosificación de materias primas del esmalte E-4.	64
Tabla 3.13: Dosificación de materias primas del esmalte E-5.	64
Tabla 3.14: Dosificación de materias primas del esmalte E5-1.	64
Tabla 3.15: Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-6.....	65
Tabla 3.16: Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-7.....	65
Tabla 3.17: Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-8.....	66
Tabla 3.18: Dosificación de materias primas del esmalte E-6.	67
Tabla 3.19: Dosificación de materias primas del esmalte E-7.	67
Tabla 3.20: Dosificación de materias primas del esmalte E-8.	68
Tabla 3.21: Ciclo de cocción referencia.	69
Tabla 3.22: Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-1 (TM).....	69
Tabla 3.23: Resultados de la cocción del esmalte E-1 con tiempo de maduración de 10 minutos.....	70
Tabla 3.24: Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-1 (tm).	71
Tabla 3.25: Resultados de la cocción del esmalte E-1 con temperatura de maduración de 840°C.....	72
Tabla 3.26: Resultados de la cocción del esmalte E-1 con temperatura de maduración de 850°C.....	72
Tabla 3.27: Ciclo de cocción A.	73
Tabla 3.28: Ciclo de cocción B.	74
Tabla 3.29: Resultados de la cocción del esmalte E-2.	75
Tabla 3.30: Resultados de la cocción del esmalte E2-1.	76

Tabla 3.31: Resultados de la cocción del esmalte E-3.	77
Tabla 3.32: Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-4 (TM).....	79
Tabla 3.33: Resultados de la cocción del esmalte E-4 con tiempo de maduración de 8 minutos.....	79
Tabla 3.34: Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-4 (tm).	81
Tabla 3.35: Resultados de la cocción del esmalte E-4 con temperatura de maduración de 840°C.....	81
Tabla 3.36: Ciclo de cocción C.	82
Tabla 3.37: Resultados de la cocción del esmalte E-5.	84
Tabla 3.38: Resultados de la cocción del esmalte E5-1.	84
Tabla 3.39: Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-6 (TM).....	85
Tabla 3.40: Resultados de la cocción del esmalte E-6 con tiempo de maduración de 9 minutos.....	86
Tabla 3.41: Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-6 (tm).	87
Tabla 3.42: Resultados de la cocción del esmalte E-6 con temperatura de maduración de 845°C.....	87
Tabla 3.43: Ciclo de cocción D.	88
Tabla 3.44: Resultados de la cocción del esmalte E-7.	90
Tabla 3.45: Resultados de la cocción del esmalte E-8.	90
Tabla 3.46: Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-1, ciclo de cocción A.....	92
Tabla 3.47: Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-1, ciclo de cocción B.	92
Tabla 3.48: Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-2, ciclo de cocción A.....	93
Tabla 3.49: Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-4, ciclo de cocción C.	94
Tabla 3.50: Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-5, ciclo de cocción C.	95
Tabla 3.51: Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-6, ciclo de cocción D.	96
Tabla 3.52: Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-8, ciclo de cocción D.	96
Tabla 3.53: Resistencia al impacto del esmalte E-1, con el ciclo de cocción A.	98

Tabla 3.54: Resistencia al impacto del esmalte E1, con el ciclo de cocción B.	99
Tabla 3.55: Resistencia al impacto del esmalte E-2, con el ciclo de cocción A.	100
Tabla 3.56: Resistencia al impacto del esmalte E-4, con el ciclo de cocción C.....	101
Tabla 3.57: Resistencia al impacto del esmalte E-5, con el ciclo de cocción C.....	102
Tabla 3.58: Resistencia al impacto del esmalte E-6, con el ciclo de cocción D.	104

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1.2: Tetera fabricada en acero esmaltado y tradicional cazuela de cocina fabricada en hierro esmaltado.....	3
Figura 2.1: Pulverizador.....	29
Figura 2.2: Mortero con pistilo.....	30
Figura 2.3: Malla No. 200 ASTM.....	30
Figura 2.4: Horno de fusión y atronado.....	33
Figura 2.5: Crisol de cerámica.....	34
Figura 2.6: Esmalte atronado.....	35
Figura 2.7: Método de aplicación del esmalte crudo.....	42
Figura 2.8: Mufla.....	43
Figura 2.9: Equipo para la prueba de Choque Térmico.....	53
Figura 2.10: Equipo para la prueba de impacto.....	55
Figura 3.1: Ciclo de cocción A.....	74
Figura 3.2: Ciclo de cocción B.....	75
Figura 3.3: Ciclo de cocción C.....	83
Figura 3.4: Ciclo de cocción D.....	89

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXOS I	
Formulación de los esmaltes porcelánicos.....	112
ANEXOS II	
Choque térmico.....	119
ANEXOS III	
Pruebas de resistencia al impacto.....	120

RESUMEN

A través del presente proyecto se estudió el efecto de los óxidos de calcio, de magnesio y de níquel en las propiedades de los esmaltes porcelánicos tipo capa base sobre superficies de acero. Como parte de la materia prima se introdujo vidrio de desecho, el cual se recolectó, molió y tamizó.

Se formularon esmaltes porcelánicos para la posterior aplicación en seco. Se trabajó primero variando los óxidos de calcio y magnesio, manteniendo constante el óxido de níquel en 0,1 moles y entre los tres una suma de 0,48 moles, con lo cual se obtuvieron los esmaltes denominados E-1, E-2, E2-1 y E-3. Luego se variaron los óxidos de magnesio y níquel, manteniendo constante el óxido de calcio en 0,278 moles y la suma entre los tres de 0,48 moles y se obtuvo los esmaltes E-4, E-5 y E5-1. Por último se variaron los óxidos de níquel y calcio, manteniendo constante el óxido de magnesio en 0,1 moles y la suma entre los tres en 0,48 moles y se obtuvo los esmaltes E-6, E-7 y E-8.

Se determinaron mediante ensayos experimentales las condiciones óptimas de cocción, tanto de temperatura como de tiempo de maduración, para cada esmalte porcelánico. Se obtuvieron cuatro ciclos óptimos de cocción que fueron el A con temperatura de maduración de 840°C y tiempo de maduración de 10 minutos, el B con temperatura de maduración de 850°C y tiempo de maduración de 10 minutos, el C con temperatura de maduración de 840°C y tiempo de maduración de 8 minutos y el D con temperatura de maduración de 845°C y tiempo de maduración de 9 minutos. Los ciclos A y B fueron aplicados a los esmaltes E-1, E-2, E2-1 y E-3, el ciclo C fue aplicado a los esmaltes E-4, E-5 y E5-1, y el ciclo D fue aplicado a los esmaltes E-6, E-7 y E-8.

Se evaluó la calidad de las superficies esmaltadas mediante pruebas de resistencias al choque térmico y al impacto.

INTRODUCCIÓN

La función principal del esmalte porcelánico es recubrir y proteger de la corrosión química o del desgaste mecánico a superficies metálicas, así como también de darles acabados decorativos excelentes. (Contreras, 2003)

Los recientes adelantos en la industria del esmalte porcelánico han producido un nuevo concepto del esmaltado. Esta industria ha progresado enormemente desde los recubrimientos de esmalte en utensillos de cocina como decoración, hasta el diseño de productos fabricados técnicamente para fines específicos. (Kirk, 1962)

El esmalte porcelánico es una mezcla de óxidos que dependiendo de la composición química alcanzan determinadas propiedades como color, brillo, dureza, adherencia al metal, resistencia a los cambios de temperaturas entre otras; las cuales dependen del uso que se le de al producto.

Lo más importante en cualquier tipo de aplicación es lograr la unión entre el metal y el esmalte, para formar un solo cuerpo, para lo cual la adherencia es fundamental. Para obtener buenos resultados se analizan los componentes de la composición química del esmalte porcelánico. (Tipán y Vizcaíno, 2008)

El óxido de calcio por sí mismo es refractario, pero al reaccionar con la sílice y la sosa a altas temperaturas se comporta como fundente, por lo general proporciona al esmalte porcelánico una alta dureza y resistencia a los ataques ácidos. (Singer, 1976)

El óxido de magnesio se emplea en la preparación de los esmaltes porque es fundente en cantidades pequeñas y a altas temperaturas, permite que el esmalte sea más homogéneo, también puede aumentar la opacidad y disminuir el coeficiente de dilatación. (Morales, 2005)

En los esmaltes tipo capa base el óxido de níquel actúa como una sustancia adherente, y en la industria del esmalte éste es básico dentro de la composición química. (Vielhaber, 2002)

Por lo arriba anotado los objetivos del presente trabajo son:

- Formular esmaltes porcelánicos con diferentes concentraciones de óxidos de calcio, níquel y magnesio, utilizando como materia prima básica vidrio de desecho.
- Preparar los esmaltes porcelánicos formulados y aplicarlos sobre superficies de láminas de acero.
- Establecer las mejores condiciones de cocción de los esmaltes tipo capa base preparados.
- Analizar el efecto de la concentración de óxidos tipo MO en los esmaltes porcelánicos de acuerdo con la calidad de la superficie.
- Evaluar las resistencias al choque térmico y al impacto de las superficies esmaltadas aplicándolas los ciclos de cocción optimizados.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. ESMALTES PORCELÁNICOS

El esmalte en forma de barniz vidriado para embellecer y proteger las obras de cerámica fue conocido desde tiempos remotos en las civilizaciones Asiría y Egipticia. De ellas, tomó la civilización prehelénica pues se han descubierto en las ruinas del palacio de Minos en Cnossos azulejos parecidos a los orientales. De los egipcios lo aprendieron sin duda los fenicios, según puede comprobarse en las vasijas halladas en Camiros (Rodas) de factura fenicia y reminiscencia egipcia. De los asirios fueron continuadores los persas y de éstos lo recibieron los bizantinos, los árabes y tal vez los chinos. No dejaron de practicar esta industria los griegos y romanos, aunque de ella hicieran escaso uso, salvo sencillas decoraciones vidriosas en algunas vasijas.

En cuanto al esmalte para la decoración de objetos metálicos y de joyas se ignora si fue conocido por los pueblos antiguos de Oriente, pues las alhajas que se han descubierto con apariencia de tener esmaltes alveolados parecen más bien decoradas con piedras finas y con fragmentos de vidrio engastados en los alvéolos de las piezas. Los griegos y romanos hicieron algún uso del verdadero esmalte, como aparece en el adorno de algunas de sus fíbulas y joyas y asimismo los bárbaros de su época, pues se descubre en el Caucazo y en Siberia bronce, sobre todo fíbulas con esmaltes campeados. [López y Martínez, 1995; Rialp S.A, 1991]



Figura 1.1 Placa de la dormición, en la que se utiliza esmalte de bajo-relieve. (López y Martínez, 1995)

La palabra esmalte proviene de la palabra alemana “smelzan” y luego de la antigua palabra francesa “esmail”. El diccionario del idioma inglés *Collins* define al esmalte como “una sustancia vidriosa coloreada, transparente u opaca, fusionada a la superficie de artículos realizados en metal, vidrio, etc. con funciones ornamentales o de protección”. El esmaltado vitrificado es específico sobre una base metálica. Es por lo tanto definido como una cubierta vítrea, similar al vidrio, fusionada a una base metálica. En inglés americano se refiere a ella como “Esmalte Porcelanizado”. (Magol, 2001)

Esmalte porcelánico es todo compuesto, o mezcla de ellos, que se funden total o parcialmente a temperaturas superiores a 650°C y que a merced a esta vitrificación, se une íntimamente con un soporte que puede ser una pasta cerámica, un vidrio o un metal. (Vicentiz, 1999)

Como los metales ferrosos tienen bajo costo son protegidos de la corrosión y proporcionados de un aspecto decorativo con el esmalte porcelánico. El esmalte porcelánico liso y brillante es fácil de limpiar, normalmente con sólo un detergente y esfuerzo del frotamiento muy pequeño. No importa su textura, su dureza y resistencia a la abrasión permiten el uso de métodos de limpieza que serían dañinos a otros recubrimientos. La higiene es una propiedad inherente del esmalte. La superficie densa y dura es una barrera contra el olor y retención de la bacteria. El propio esmalte de porcelana es inodoro, insípido y no-tóxico. Los

esmaltes de porcelana también son muy resistentes a la contaminación radiológica y biológica. La contaminación de la superficie puede ser quitada rápidamente y fácilmente, simplemente lavando. Las superficies lisas resisten soluciones germicidas comunes y sobre todo pueden esterilizarse con vapor vivo sin daño. Los esmaltes de porcelana también resisten atmósferas industriales corrosivas, sal, aire, gases y humos. Estas características lo convierte en un material idóneo para su aplicación en el material de cocina, en productos como: baterías de acero esmaltado, sartenes, freidoras, consomeras, fondues, cafeteras, teteras, pavas, asadoras, etc, todo ello fabricado con la más alta calidad.

Las piezas pueden fabricarse en líneas recta o abombada, mediante el uso de acero esmaltado de alto espesor. Sus mangos y pomos de baquelita aislante (según modelos) son de alta resistencia al fuego. Todos con un aro de acero inoxidable protector del esmalte. Válidas para todo tipo de fuentes de calor. Aptas para lavavajillas. (Contreras, 1995)



Figura 1.2 Tetera fabricada en acero esmaltado y tradicional cazuela de cocina fabricada en hierro esmaltado

Como es muy usual el esmaltado porcelánico como revestimiento, en muchas aplicaciones, es comparado con acabados orgánicos de lacas y esmaltes

sintéticos cuyos principales ingredientes son diversos plásticos. Aunque algunas veces se confunden los usos de dichos acabados, en general son complementarios y no competidores. El resultado de los ensayos comparativos se puede resumir de la siguiente manera: el esmalte porcelánico es superior en dureza, en resistencia contra la abrasión, en durabilidad y en termorresistencia; los acabados orgánicos se aplican con más facilidad, se curan más rápidamente y tienen mayor tenacidad y resistencia al choque. Entre ambos tienen gran resistencia química. Los costos de materia prima de algunos acabados orgánicos son mayores y los de otros son menores que los de los esmaltes porcelánicos más modernos. Por consiguiente, al escoger un acabado para sus productos el fabricante debe considerar las cualidades que desee en dicho acabado, su costo y la aceptación que tendrá por parte del cliente. (Kirk, 1962)

En la corrosión electroquímica se utilizan los esmaltes porcelánicos para aislar las regiones anódicas de las catódicas. Para materiales cerámicos avanzados y para metales de alta temperatura de servicio se utilizan esmaltes porcelánicos especiales. A los materiales compuestos carbono-carbono se les aplican esmaltes porcelánicos de SiC para mejorar su resistencia a la oxidación. A las superaleaciones con base níquel se les puede aplicar esmaltes porcelánicos de circonia, como barreras térmicas que protejan al metal contra la fusión o contra reacciones adversas. (Askeland, 2001)

1.1.1. FUNCIONES

El esmalte porcelánico puede aplicarse a cualquier metal que no se funda ni se volatilice a la temperatura de maduración del esmalte. Con el descubrimiento de los esmaltes porcelánicos de cocción baja es posible aplicar éstos esmaltes no sólo a metales férreos, sino también a oro, cobre, aluminio, titanio, molibdeno y magnesio. Sin embargo, el mayor volumen de la industria del esmaltado abarca los revestimientos sobre lámina de hierro, acero, fundición y aluminio. La selección del metal se basa en muchos factores, entre ellos el costo, uso último,

temperatura del esmaltado y fabricación de la forma. Los últimos adelantos en el campo de alta temperatura y en la protección de los metales a temperatura alta indican la importancia de la resistencia a la tracción en corto tiempo en la selección de metales.

Acero para esmaltar.- Gran parte de los artículos de forma hueca, como estufas y refrigeradoras, y la industria de máquinas lavadoras, usan el acero dulce de bajo costo, como AISI-C 1005, AISI-C 1008 ó AISI-C 1010, con las composiciones químicas que se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Composiciones químicas de aceros dulces.

AISI N°	Composición Química			
	%C	%Mn	%P	%S
C 1005	0,06 máx	0,35 máx	0,040 máx	0,050 máx
C 1008	0,10 máx	0,25-0,50	0,040 máx	0,050 máx
C 1010	0,08-0,13	0,30-0,60	0,040 máx	0,050 máx

(Kirk, 1962)

El acero dulce es inferior al hierro para esmaltar, debido principalmente a causa de que contiene una concentración más alta de otros elementos, particularmente carbono y manganeso. (Kirk, 1962)

Acero descarburado.- La elección de la chapa descarburada como soporte para el esmalte porcelánico se debe a la especificidad de este tipo de acero, que posee un bajísimo porcentaje de carbono, inferior al 0,004%. Dicha característica permite evitar deformaciones por el cambio de fase del acero a temperaturas por encima de 911°C, es decir, superiores a la de vitrificación del esmalte porcelánico durante la fase de cocción, que alcanza como máximo 860°C. Para este tipo de aplicaciones se utiliza el acero Solfer®+ (identificable también por el código DC04ED según la norma EN 10209:1996), que se encuentra disponible en placas de dimensiones estandarizadas de 1 250 mm x 3 000 mm y 1 500 mm x 3 000

mm o bien en bobinas de 100 quintales de peso medio. Tanto las placas como las bobinas pueden encontrarse en distintos espesores: 0,8; 1,0; 1,5 y 2,5 mm.

El acero porcelánico se puede considerar en la actualidad, en el campo arquitectónico, uno de los mejores materiales disponibles para el revestimiento de superficies verticales gracias a algunas notables peculiaridades que lo caracterizan. A grandes rasgos, se puede definir como un soporte de chapa de acero descarburado revestido de esmalte vítreo que ofrece una simbiosis perfecta entre ambos materiales, de los que sintetiza las características de resistencia y un agradable impacto visual. (Pezzotti, 2009)

Capa Base.- Los métodos actuales de esmaltar metales férricos no difieren básicamente de los antiguos. Sin embargo, se están perfeccionando mucho las técnicas y el equipo. La mayoría de los esmaltes porcelánicos se aplican en dos capas, con excepción de los esmaltes especiales para aplicar en una sola capa y los esmaltes de aluminio. (Kirk, 1962)

Las principales funciones de la capa base o primera capa son:

- 1) Promover la adherencia entre el metal y el esmalte.
- 2) Cerrar el metal y de este modo evitar el desprendimiento de gas durante la cocción de la segunda capa o capa de cubierta.
- 3) Actuar como una barrera para impedir la reacción química entre el metal y la segunda capa.

La capa base está compuesta aproximadamente entre 75 y 85% de cuarzo, feldespatos y bórax, entre 0,3 y 0,5% de óxido de cobalto, uno de los productores de la adherencia más potentes, aunque para este fin también se agregan a veces óxidos de níquel y manganeso. La capa base se aplica usualmente con un espesor de 0,076 a 0,127 mm por inmersión o rociado y se cuece entre 788 y 815,5 °C durante 4 a 6 minutos.

Segunda Capa.- Las funciones de la segunda capa o capa de recubrimiento son procurar la protección y dar al metal un aspecto decorativo. El número de fritas

para segundas capas en el esmaltado de metales férreos es enorme, abarcan amplias gamas de color, brillo, textura, dureza, resistencia a la abrasión, resistencia química, resistencia al impacto y propiedades de resistencia térmica. Por regla general se aplica una segunda capa más fina que la capa base, y de cocción a una temperatura entre 16,5 y 22°C más baja que la cocción de la capa base, con el fin de evitar la efervescencia o desprendimiento de gas que se produce cuando el objeto se somete a temperatura más alta que la cocción original. La mayoría de los esmaltes usados para segunda capa son opacos y contienen dióxido de titanio como productor de opacidad. (Kirk, 1962)

Esmaltes de una capa.- El lograr el esmaltado del acero con una capa de esmalte de cubierta, blanco o de color, ha constituido siempre la aspiración de todos cuantos se han dedicado al esmaltado. En el transcurso del tiempo se han realizado muchos intentos en este sentido, pero en todos los casos éstos han ido acompañados de algunas desventajas con respecto a los procedimientos empleados hasta ahora. En Estados Unidos se han propuesto en los últimos tiempos tres métodos:

- El esmaltado del acero al titanio,
- El procedimiento Ferro-Republic,
- El procedimiento Perder.

Esmaltado del acero al titanio.- Los aceros con una relación Ti/C de 4.2-9.0 pueden recubrirse con un esmalte de titanio blanco, siempre que se haya logrado la correspondiente adherencia del esmalte mediante un previo niquelado del objeto logrado por inmersión del mismo en un baño de níquel. El procedimiento parece de ejecución sencilla, pero, sin embargo, los aceros al titanio son considerablemente más caros que las chapas que habitualmente se esmaltan. (Vielhaber, 2002)

El procedimiento de Ferro-Republic.- Puede aplicarse a todas las clases de acero. Exige un mordentado profundo de las chapas por inmersión en ácido nítrico y un previo niquelado. Para obtener una capa de níquel coherente, el niquelado se

obtiene no por simple inmersión en una disolución de sal de níquel (desplazamiento galvánico), sino por reducción química. La calidad del esmaltado no es suficiente para todos los casos, siendo necesaria en algunos la aplicación de una segunda capa, método que da muy buenos resultados en la mayoría de los casos.

El procedimiento Perder.-Consiste en un tratamiento con baño de fosfato que se aplica después de una operación normal de desengrasado y mordentado. Como consecuencia del tratamiento la superficie metálica queda recubierta mediante una película de fosfato de hierro. Si el recubrimiento de fosfato fuera defectuoso, debe ser eliminado por decapado con ácido sulfúrico, debiendo aplicarse de nuevo. Los esmaltes defectuosos pueden corregirse mediante una segunda capa. (Vielhaber, 2002)

1.1.2. FACTORES CONTROLADORES DE LA COMPOSICIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS

La composición de un esmalte porcelánico presenta sin duda, una mayor complejidad que la de los cuerpos cerámicos dada la cantidad de elementos que participan en su composición. Para que una industria alcance una alta competitividad, se requiere un buen nivel tecnológico y para ello es indispensable una buena planificación de los ensayos de control. [Hevia *et al.*, 2002; Vásquez, 2005]

1.1.2.1. Control de la materia prima

Los requerimientos de calidad que hoy exige el mercado, tanto en lo técnico como en lo estético, imponen un control preciso de las materias primas. Cuando se recibe la materia prima en la planta industrial, la primera acción del laboratorio de

control es la toma de muestra, siendo la representatividad de ésta, la base del éxito de los resultados obtenidos posteriormente. (Paetsch, 1978)

Análisis Químico

Se realiza la disolución de la materia prima fundiendo con carbonatos alcalinos y compuestos de boro y se analizan los elementos siguientes:

- Por espectrofotometría de absorción atómica: Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Cu, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Ba, Sr, Pb, Li, Sb, Sn.
- Por colorimetría: Ti
- Por gravimetría: Zr, PO_4^{-3}
- Por volumetría: B
- Por potenciometría con electrodo selectivo: F (Hevia *et al.*, 2002)

Ensayos Físicos

Materias Primas no solubles en agua.

Cuarzo

- Análisis Granulométrico: con tamices ASTM 200 (74 μm) y ASTM 325 (44 μm).
- Poder endurecedor: se introduce el cuarzo a controlar, en una proporción de 15-20% respecto de la composición de un esmalte brillante y transparente. Se esmalta, se cuece y se comprueba su poder endurecedor. El porcentaje de cuarzo debe ser el mínimo necesario para hacer pasar el esmalte de brillante a mate, por endurecimiento.
- Color quemado: La materia prima molida se cuece a 1100 °C en una cápsula de porcelana. El color obtenido se compara con una muestra estándar.

Silicato de Circonio (circón)

- Control granulométrico: es muy importante la relación entre el tamaño de las partículas y el poder opacificante. Se utilizan tamices ASTM 200 (74 μm) y ASTM 325 (44 μm).
- Poder opacificante: se mezcla en un determinado porcentaje con una frita cristalina brillante y transparente. El porcentaje se establece como el valor mínimo necesario para obtener una buena opacidad.

Alúmina Calcinada

- Control granulométrico: se utilizan tamices ASTM 200 (74 μm) y ASTM 325 (44 μm).
- Control de poder endurecedor: introduciendo un porcentaje de 6-8% de alúmina en una frita viscosa opacificada de circonio.

Óxidos de Estaño, cerio y titanio

- Poder opacificante: agregando un porcentaje variable del 5-10% de óxido de estaño, cerio o titanio en una frita brillante y transparente. (Hevia *et al.*, 2002)

Ácido bórico, bórax, carbonato de sodio, minio, etc.

Poder de fusión: se preparan dos fritas, una con todas las materias primas estándar y otra con todas menos la que es objeto del control. Con ambas fritas se preparan botones de visibilidad para hacer el ensayo de comparación.

Botón de fusibilidad.- Se muele la muestra húmeda, en las mismas condiciones de granulometría, densidad y peso que otra muestra estándar, se preparan pastillas con las cuales se realiza el ensayo. Finalmente las muestras se cuecen en iguales condiciones de temperatura y ciclo, debiendo permanecer constantes los parámetros.

El ensayo del botón de fusibilidad consiste en:

- Prensar piezas cilíndricas de 8 mm de diámetro.
- Colocar la pastilla de prueba sobre una placa porosa o de porcelana, y en forma paralela con una pastilla testigo. La placa

tiene una depresión con forma semiesférica para colocar la pastilla, conectada con una canaleta graduada por donde fluye el esmalte.

- Ubicar la placa sobre un soporte de porcelana con un ángulo de 45° y cocerla en un horno de prueba.
- Comparar la longitud del escurrimiento de las pastillas.

1.1.2.2. Control del proceso de esmaltado.

Para que cualquier industria alcance una alta competitividad, se requiere un buen nivel tecnológico que se logra con una planificación adecuada de los ensayos de control especialmente en el esmaltado.

Ensayos durante el esmaltado.- Los ensayos realizados durante el esmaltado deben comprender el control de los siguientes procesos:

Preparación del esmalte crudo

- La molienda del esmalte que está sujeta a alcanzar una determinada granulometría. Se utilizan tamices ASTM 200 (74 μm) y ASTM 325 (44 μm).
- Dilatación térmica: la técnica de la medición del coeficiente de dilatación está dada en la norma DIN 51045. (Hevia *et al.*, 2002)

Aplicación del esmalte crudo

- Espesor de la capa de esmalte: es importante que la capa de esmalte no sea demasiado gruesa, pues de lo contrario se rompe y desprende del acero. Los esmaltes con espesores delgados tienen alta resistencia a la fractura, mientras que los esmaltes con recubrimientos gruesos tienen mejores propiedades eléctricas y resisten al ataque químico. El espesor mínimo de la capa base

debe de ser 0,089 mm, el espesor total de la capa base y de recubrimiento puede oscilar desde 0,127 mm a 0,508 mm. Se mide los espesores con un micrómetro. (Mora, 2008)

- Aplicación del esmalte en seco: en este tipo de proceso se aplica directamente el esmalte seco sobre la placa de acero mediante espolvoreo; éste consiste en pasar el esmalte por un tamiz y dejar caer sobre la superficie metálica hasta lograr una capa homogénea. (Tipán y Vizcaíno, 2008)

Cocción

La cocción es muy importante de controlar, generalmente en los hornos se cuece a temperaturas ascendentes. La magnitud de la temperatura de cocción se escoge de acuerdo con el tipo de esmalte porcelánico. Los esmaltes para primera capa se cuecen a temperaturas más altas que las de segunda capa. Los esmaltes para primera capa se debe cocer siempre a temperaturas comprendidas entre 800 y 950 °C, mientras que los esmaltes de segunda capa se cuecen entre 720 y 820 °C. La duración del proceso de cocción queda determinada fundamentalmente por el grosor del material. Este comportamiento térmico, se puede evaluar con un microscopio de calefacción, con este equipo se puede apreciar cuando comienza a desarrollarse los primeros líquidos, a qué temperaturas se producen contracciones o expansiones importantes, y a qué temperaturas funde y fluye el esmalte porcelánico. (Vielhaber, 2002)

1.1.2.3. Control de la superficie esmaltada

Aspecto General.- Luego de la cocción, el producto debe recibir un primer control visual referido a un estándar. El examen visual se puede reforzar con controles instrumentales, como por ejemplo: el brillo y la blancura con un espectrofotómetro, y la presencia de puntos y defectos en el esmalte puede ser cuantificada con la ayuda de un microscopio. (Hevia *et al.*, 2002)

Ensayos de dureza.- Se utilizan en menor medida ensayos como el de Spot y el de Mohs, pero actualmente el método más utilizado para el control de la dureza del esmalte es el de abrasión PEI, norma ISO 10.545-7.

Resistencia química.- Muchos productos esmaltados que están sometidos a un lavado periódico, se controlan según la norma DIN 51035, para determinar el efecto de los detergentes y los jabones alcalinos. El ensayo consiste en exponer la pieza esmaltada durante 30 minutos, a la acción de una solución de 1% de trifosfato de sodio, a la temperatura de ebullición. Luego del ensayo el aspecto general del producto (brillo, color, etc.) no debe sufrir variaciones. (Hevia *et al.*, 2002)

1.1.3. FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS

La mayoría de los materiales para el esmalte porcelánico se derivan de rocas y minerales comunes que se obtienen fácilmente de la naturaleza. Dentro de los materiales, los compuestos de plomo y bario son los más tóxicos. Algunos son cáusticos, por lo que se debe evitar el contacto prolongado con la piel. También es importante no respirar el polvo de sílice, porque puede causar silicosis, una enfermedad de los pulmones. Los materiales para el esmalte porcelánico no se deterioran ni en estado bruto ni cuando se mezclan y pueden guardarse indefinidamente. Gran parte de los materiales terrestres, incluidos aquellos que utilizamos para los vidriados, se encuentran en forma de óxidos. (López y Martínez, 1995)

Hay varios métodos para expresar la composición de los esmaltes porcelánicos, de los cuales el más usual es el porcentaje en peso. Otros métodos, como el análisis químico que se observa en la Tabla 1.2, la fórmula molecular empírica también conocida como fórmula de Seger que se muestra en la Tabla 1.3 y la fórmula iónica empírica que se presenta en la Tabla 1.4, son útiles para predecir las propiedades de un esmalte porcelánico. La fórmula iónica empírica encierra

conceptos acerca de las unidades de la estructura del vidrio. Todos los métodos se ilustran a continuación para la composición de un esmalte porcelánico de primera capa sobre una lámina de acero, y, por consiguiente, representa la mayor parte de posibles variaciones en la estructura. (Kirk, 1962)

Tabla 1.2 Composición con porcentaje en peso y análisis químico de un esmalte porcelánico.

Peso de la partida		Análisis químico	
Componentes	% en peso	Componentes	% en peso
Feldespató potásico	31.0	SiO ₂	40.8
Cuarzo	11.4	Al ₂ O ₃	7.7
Bórax (Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O)	37.1	B ₂ O ₃	17.5
Carbonato sódico anhidro	5.9	CaO	8.4
Nitrato de sodio	3.8	K ₂ O	4.5
Fluoruro de sodio	9.0	Na ₂ O	15.3
Óxido de cobalto (Co ₃ O ₄)	0.5	F	3.5
Óxido de níquel (NiO)	0.4	CoO	0.6
Dióxido de manganeso	0.9	NiO	0.5
		MnO	1.2

(Kirk, 1962)

Por convención se expresa la fórmula molecular empírica de manera que la suma de todos los óxidos y fluoruros monovalentes y divalentes es igual a la unidad, explicado de otra manera la fórmula de Seger se calcula clasificando los óxidos en básicos (M₂O, MO), anfóteros (M₂O₃) y ácidos (MO₂) y se indica la cantidad de sustancia de cada tipo de óxido con respecto a un mol de óxidos básicos totales. [Morales, 2005; Fuentes *et al.*, 2007]

Tabla 1.3 Composición con fórmula molecular empírica o fórmula Seger de un esmalte porcelánico.

Fórmula molecular empírica (Equivalentes moleculares)		
Álcalis	Neutros	Ácidos
0.155 K ₂ O	0.155Al ₂ O ₃	1.45 SiO ₂
0.475 Na ₂ O		0.527 B ₂ O ₃
0.312 CaF ₂		
0.016 CoO		
0.014 NiO		
<u>0.027 MnO</u>		
0.999 Total		

(Kirk, 1962)

Por otra parte, para calcular la fórmula iónica empírica se multiplican primero los coeficientes moleculares de la fórmula molecular por las cargas iónicas, con lo cual se obtiene el número de equivalentes iónicos. Éstos se colocan en su respectiva clasificación, según se indica en la fórmula. Por comodidad y por razones científicas, se obtiene la expresión final dividiendo todos los equivalentes iónicos por la suma de los equivalentes de los iones que forman la red estructural.

En vista que la teoría acerca de la estructura del vidrio reconoce los iones y no la moléculas como las unidades estructurales, y dado que se obtienen informes considerables acerca de la influencia de diversos iones sobre las propiedades del vidrio, la fórmula iónica empírica es el método más claro para expresar la composición del esmalte porcelánico.

Tabla 1.4 Composición con fórmula iónica empírica de un esmalte porcelánico.

Fórmula iónica empírica (Equivalentes iónicos)		
Cationes		Aniones
Modificadores de la red	Formadores de la red	
0.110 K ⁺ 0.338 Na ⁺ 0.111Ca ²⁺ 0.006 Co ²⁺ 0.005 Ni ²⁺ 0.009 Mn ²⁺	0.110 Al ³⁺ 0.515 Si ⁴⁺ <u>0.375 B³⁺</u> 1.000 Total	2.00 O ²⁻ 0.222 F ⁻

(Kirk, 1962)

Para formular un esmalte, se debe tener en cuenta las propiedades de las materias primas. La mayor parte del esmalte se funde y convierte en vidrio antes de su aplicación, y en tal estado se conoce con el nombre de frita. Se agregan los demás ingredientes cuando se pone la frita en el molino para su trituración. El feldespato y el cuarzo se consideran como materiales refractarios. El bórax, el espato flúor, el carbonato sódico anhidro, el fluosilicato de sodio (silicofluoruro sódico), la criolita, el minio, la ceniza de huesos, el óxido de cinc y el carbonato de bario actúan principalmente como fundentes, pero pueden tener funciones secundarias. El nitrato de sodio es también un fundente, pero se agrega principalmente en virtud de su propiedad oxidante. Los óxidos de cobalto y de níquel aumentan la adhesividad en capas de fondo. La criolita y el flúor son opacificadores secundarios; el antimoniato de sodio y el óxido de estaño son opacificadores primarios. La adición de gran proporción de sílice en forma de feldespato y cuarzo reduce el coeficiente de dilatación y la adición de fuertes proporciones de álcali, óxido bórico y flúor tiende a aumentarlo. El óxido sódico derivado del bórax, el carbonato sódico y el citrato de sodio aumentan dicho coeficiente. (Kirk, 1962)

1.2. EFECTO DE LOS ÓXIDOS TIPO MO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL ESMALTE PORCELÁNICO

Las propiedades de un esmalte, que tienen características diferentes en las distintas etapas del proceso productivo, son determinantes en la calidad final del objeto esmaltado y de su utilización exitosa en aplicaciones específicas. [Hevia *etal.*, 2002]

Básicamente, las características del esmalte porcelánico sobre una superficie de acero dependen de varios factores entre los que se pueden anotar: la composición química del esmalte porcelánico, la calidad de las materias primas fuente de los óxidos componentes del esmalte porcelánico, los ciclos de obtención del esmalte y del esmaltado, las condiciones del proceso de recocción y la forma y tipo de metal como sustrato.

La adición de óxidos tipo MO como el óxido de níquel en la composición química de los esmaltes porcelánicos, inicialmente se realiza debido a las propiedades inherentes de este metal. Básicamente su capacidad de absorber selectivamente la luz, por lo que ha sido usado para producir esmaltes coloreados o directamente como pigmento.

Otra de las características del óxido de níquel, que encuentra aplicación industrial se da por la capacidad de los iones níquel de ser reemplazados por iones hierro dentro de las soluciones electrolíticas, que son utilizadas en procesos de recubrimiento electrolítico como la galvanostegia y la galvanoplastia. (Estévez, 2008.)

En los esmaltes porcelánicos tipo capa base el óxido de níquel es un buen promotor de la adherencia, además de influir sobre la viscosidad, y en la industria éste es básico dentro de la composición química. (Vielhaber, 2002.)

El óxido de calcio y el de magnesio (óxidos tipo MO) por si mismos son refractarios; sin embargo, en la mezcla del esmalte reaccionan con la sílice y la sosa para dar productos de bajo punto de fusión y, por lo tanto, actúan como fundentes. Con la utilización de estos óxidos se logra disminuir la cantidad de energía necesaria para la aplicación del ciclo de cocción. (Singer, 1976.)

1.2.1. ADHERENCIA DE ESMALTES A METALES

El esmaltado de metales es probablemente el primer ejemplo conocido de “soldadura” de vidrio a metal. La adherencia es la resistencia que presenta el esmalte porcelánico a daños mecánicos por impacto, torsión o choque térmico, debido al enlace formado entre el metal y el esmalte porcelánico, como resultado de las reacciones que generan la formación de la capa intermedia, por óxidos de hierro, que ocurren durante la cocción del esmalte. [Kirk, 1962; Mora, 2008]

La naturaleza de la unión es aún tema de discusión, pero se conocen los siguientes hechos: sólo unos cuantos compuestos, como los óxidos de cobalto, de níquel y de molibdeno, producen adherencia eficaz en operaciones industriales entre capas de fondo de esmalte porcelánico y la lámina de hierro y de acero del grado más puro. Sólo se requiere una pequeña cantidad de los óxidos: entre 0.5 y 1% en peso del de cobalto y de níquel y, aproximadamente, 3% de trióxido de molibdeno. No es necesaria la adición de estos óxidos para obtener eficaz adherencia en artículos de hierro colado. Cuando se usan estos óxidos se forma en la frontera del esmalte y el hierro una mezcla de óxido de hierro, cobalto y níquel en forma dendrítica. Cualquiera de estas sustancias, o todas ellas, pueden ser, entre otras, la causa de la unión de las dos fases. (Kirk. 1962)

1.2.2. COEFICIENTE DE DILATACIÓN

La dilatación del vidrio depende de los materiales constituyentes. Con una relativa aproximación se puede determinar la dilatación de un vidrio con la siguiente fórmula: coeficiente de dilatación = $A_1F_1 + A_2F_2 + A_3F_3 + \dots + A_XF_X$, en donde $A_1, A_2, A_3, \dots, A_X$ son los porcentajes en peso de los diversos óxidos, y $F_1, F_2, F_3, \dots, F_X$ son factores de Mayer y Hayas determinados por medio de la experimentación que representa el influjo que estos óxidos tienen en el coeficiente de dilatación del vidrio. Diversos experimentadores han determinado varios grupos de factores, pero los de Mayer y Hayas, que aparecen en la Tabla 1.5, son los que se usan generalmente. Si se multiplican dichos factores por los respectivos porcentajes de los óxidos se obtiene el coeficiente de dilatación cúbica del compuesto. [Kirk, 1962; Morales, 2005]

Tabla 1.5 Factores de Mayer y Hayas

Óxido	Factor x 10 ⁷ (°C ⁻¹)	Óxido	Factor x 10 ⁷ (°C ⁻¹)	Óxido	Factor x 10 ⁷ (°C ⁻¹)
SiO ₂	0.8	MgO	0.1	AlF ₃	4.4
Al ₂ O ₃	5.0	BaO	3.0	CaF ₂	2.5
B ₂ O ₃	0.1	As ₂ O ₃	2.0	Cr ₂ O ₃	5.1
Na ₂ O	10.1	P ₂ O ₅	2.0	Sb ₂ O ₃	4.4
K ₂ O	8.5	Sb ₂ O ₃	3.6	CoO	2.2
PbO	4.2	SnO ₂	2.0	CuO	4.0
ZnO	2.1	TiO ₂	4.1	Fe ₂ O ₃	4.0
CaO	5.0	ZrO ₂	2.1	NiO	2.2
		Na ₂ AlF ₆	7.4	MnO	

(Kirk, 1962)

Para disminuir el coeficiente de dilatación de un esmalte se puede disminuir los álcalis y aumentar el anhídrido bórico, y al revés si se desea aumentar.

Puesto que el coeficiente de dilatación de un vidrio no es uniforme en el intervalo de 0 a 500 °C., es necesario comparar los valores reales y los calculados en diferentes intervalos de temperatura. Observaciones recientes indican que los valores calculados son más bajos que los reales en el intervalo de 0 a 200 °C., pero más altos en el intervalo de 0 a 500 °C. (Morales, 2005)

No es necesario que sean iguales los coeficientes de dilatación del vidrio y del metal; antes al contrario, parece conveniente que el del metal sea un tanto más alto que el del esmalte a efecto de que éste se halle en estado de compresión al enfriarse. Si la compresión es excesiva, el esmalte tiende a descascararse, y si queda en tensión se agrieta. El coeficiente de dilatación lineal del hierro es aproximadamente $12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

La densidad, la resistencia a la tracción, la elasticidad, la dureza, el calor específico, la termoconductividad y la resistencia contra el aplastamiento son propiedades y se pueden calcular con fórmulas aditivas que dan valores aproximados, útiles en trabajos de investigación y desarrollo. Los intervalos ordinarios de datos experimentales de estas propiedades son: densidad, 2.5 a 3.5 gr/cm³; dureza (Mohs), 5 a 6; resistencia a la tracción, 3 a 8 kg/mm²; módulo de Young, 8200 a 8400 kg/mm²; módulo de ruptura, 12 a 16 kg/mm²; resistencia a la compresión, 77 a 78 kg/mm². (Kirk, 1962)

1.2.3. OPACIDAD

Los esmaltes opacos contienen sustancias para cubrir, que no permiten ver el soporte. Esta propiedad es desarrollada mediante la adición de materiales opacificadores a la partida en crudo, a la carga de molido o a ambas. Estos ingredientes o no se disuelven o forman cristales insolubles durante el enfriamiento, los cuales tienen índice de refracción diferente del de la fase vítrea y hacen que se difunda gran parte de la luz incidente. Cuando se funden en esmaltes fluoruro de calcio y criolita, aparecen fluoruros de calcio y de sodio en el

vidrio enfriado y dan a éste opacidad, aunque insuficiente. Estos compuestos se completan fundiendo en la cochura óxido de antimonio (o antimoniato de sodio), óxido de estaño, de circonio o de titanio. Los tres últimos pueden también obrar como opacificadores de molino; esto es: algunas veces se agregan a la carga de molino. Los índices de refracción de estos compuestos opacificadores son los siguientes: fluoruro de calcio, 1.44; fluoruro de sodio, 1.33; óxido de antimonio, 2.60; óxido de circonio, 2.40; óxido de titanio, 2.50; y óxido de estaño, 2.04. El índice de los vidrios de esmalte varía entre 1.50 y 1.55. La investigación indica que el óxido de cerio es un buen opacificador, pero su alto costo y otras razones han impedido que se use en la industria del esmaltado. Los esmaltes opacos se caracterizan por ser casi siempre lisos y brillantes, la opacidad blanca se aprovecha en casi todos los esmaltes comerciales para ocultar coloraciones indeseadas. Dicha opacidad se origina cuando la radiación luminosa se dispersa fuertemente, debido a que la luz incidente se refracta y refleja en el mayor número posible de límites de fase del cuerpo vítreo. [Kirk, 1962; Hevia *et al.*, 2002]

1.2.4. VISCOSIDAD Y TENSIÓN SUPERFICIAL

En los esmaltes porcelánicos la viscosidad permite la formación de una película que fluye sobre una superficie para formar una capa uniforme. Debe ser moderada a la temperatura máxima de cocción de tal manera que no se produzca un flujo global hacia abajo en las superficies inclinadas o verticales, por lo que está directamente relacionada con la tensión superficial. La viscosidad que se logre durante la formación del esmalte porcelánico desde sus componentes, determina la facilidad de escape de la burbujas de gas desprendidas en el proceso. La velocidad de cambio de la viscosidad depende fuertemente de la composición del esmalte, depende también del tiempo durante el cual se somete a un esmalte porcelánico a temperatura de calentamiento; por lo tanto, se lo puede regular con un adecuado ciclo de cocción y así lograr disminuir defectos y favorecer la adherencia. (Tipán y Vizcaíno, 2008)

La tensión superficial es la fuerza que hace que el vidriado, cuando se encuentra en estado líquido, pueda contraerse en forma de esfera. El mercurio a temperatura ambiente tiene una alta tensión superficial que lo hace formar “bolitas” en casi toda su superficie, en contraposición, el aceite con una baja tensión superficial, se extiende muy fácilmente en las superficies. En los esmaltes porcelánicos, una tensión superficial baja favorece la eliminación de burbujas, cráteres y picaduras; más regular será la capa formada y más lisa será su superficie. Por lo contrario, una tensión superficial alta es favorable para la reabsorción de las burbujas durante el enfriamiento, provocando el conocido defecto de “arrugado” o “crawling”. A 850°C, la tensión superficial de los esmaltes que no contienen plomo es aproximadamente de 250 dinas por centímetro, y de los esmaltes que lo contienen es alrededor de 200 dinas por centímetro. [Singer, 1976; Vásquez, 2005]

1.2.5. RESISTENCIA CONTRA ÁCIDOS

En general, se aumenta la resistencia contra ácidos en un esmalte reduciendo la proporción de óxidos y fluoruros alcalinos y aumentando la sílice. El dióxido de titanio es también muy eficaz para aumentar la resistencia contra ácidos además de ser poderoso opacificador. Los esmaltes de segunda capa contienen hasta 18% de óxido de titanio y son sumamente acidorresistentes. Se considera que un esmalte es acidorresistente cuando no se mancha ni se vuelve opaco después de estar quince minutos en contacto con solución de 10% de ácido cítrico. (Kirk, 1962)

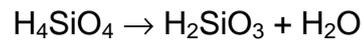
1.2.6. RESISTENCIA CONTRA ÁLCALISIS

El ataque de un esmalte por soluciones alcalinas provoca la destrucción de la red de sílice y la disolución de los productos de reacción. (Mari, 1999)

Las reacciones que ocurren en forma secuencial, son las siguientes:

- $\text{Si} - \text{O} - \text{Si} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Si} - \text{OH} + \text{Si} - \text{O}^-$
- $\text{Si} - \text{OH} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$
- $\text{Si} - \text{O}^- + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Los ácidos orto y metasilícicos están a su vez en equilibrio en la solución.



Ambos ácidos son débiles y tienden a polimerizar si las soluciones no son fuertemente alcalinas. El ataque es apreciable a $\text{pH} > 9$. Esta situación se puede mejorar con un contenido alto de alúmina y bajo de boro, y además se requieren condiciones muy alcalinas ($\text{pH} 13 - 14$). También el circonio incrementa la resistencia de los esmaltes a los álcalis, por formación de una capa protectora de ZrO_2 hidratado.[Hevia *et al.*, 2002]

1.2.7. ESPESOR DE LA PELÍCULA DE ESMALTE

La textura, el color y las técnicas de procesamiento para obtener una superficie esmaltada, influyen en la cantidad de esmalte a aplicar. En la mayoría de las piezas esmaltadas es importante que la capa de esmalte no sea demasiado gruesa, pues de lo contrario se rompe y se desprende del acero. La capa aplicada debe ser siempre la misma, con el fin de encontrar idéntica cantidad de esmalte sobre el objeto. Los esmaltes con espesores delgados tienen alta resistencia a la fractura, mientras que los esmaltes con recubrimientos gruesos tienen mejores propiedades eléctricas y resisten al ataque químico por más tiempo. El espesor de la capa base debe tener un mínimo de 0.089 mm, el cual provee de alta durabilidad al esmalte. El espesor total de la capa base y capa de recubrimiento, puede oscilar desde 0.127 mm a 0,508 mm, dependiendo del proceso a realizar y la pariencia que se quiera del objeto esmaltado, pero no debe exceder el valor de 0,508 mm, excepto cuando se necesite un recubrimiento más grueso. Estos datos

se refieren a los esmaltes para acero laminado. Los esmaltes para hierro colado aplicados por el proceso en seco pueden ser más gruesos. (Mora, 2008)

1.2.8. COLOR Y TEXTURA

Hay una gran variedad de texturas y colores que depende de los materiales y los tratamientos de cocción. Cuando son transparentes podemos mirar a través de ellos, pero en ocasiones son opacos y tienen el efecto de un vidrio oscuro y deslustrado, ocultando lo que hay bajo. La transparencia puede considerarse el estado normal, cuando un esmalte es cocido hasta su maduración y todos sus óxidos alcanzan el estado de fusión completo. Los esmaltes sobre metal, además de darle una superficie tenaz, higiénica y fácil de limpiar, tienen la virtud de poseer una serie excepcionalmente amplia de colores. Esto se debe a los óxidos metálicos disueltos en el esmalte, o a las capas vítreas que se encuentran sobre la superficie. La causa más común y sencilla es la presencia de óxidos disueltos. Algunos óxidos de hierro, cobre, manganeso y cobalto son solubles en el vidrio: cuando se disuelven en él le comunican un color característico. (López y Martínez, 1995)

La primera capa sobre láminas de acero dulce suele tener color azul negruzco por su contenido de óxido de cobalto, níquel y manganeso, de los cuales los dos primeros son indispensables para fomentar la adhesividad. El hierro de la lamina de acero que se disuelve en el esmalte también coopera a dar color a éste. Mediante la introducción de molibdeno en la frita o en la carga de molino, se pueden producir primeras capas de color blanco. Estas capas pueden actuar como primeras capas y como segundas capas por su color.

Las primeras capas para hierro colado son generalmente blancas, pues no necesitan de óxido de cobalto ni de níquel para que tengan buena adherencia. Todas las primeras capas suelen ser brillantes o semi-brillantes, pero algunos de

los que se aplican al hierro colado tienen textura mate. Su superficie debe estar exenta de discontinuidad y otros defectos.

La superficie de la segunda capa debe ser brillante, aunque algunas veces es semi-mate y de muy distintos colores. Cuando la capa es blanca, por regla general es necesario que sea opaca. Su reflectancia difusa debe ser de 70% o más, determinada por los métodos normales. [Kirk, 1962; López y Martínez, 1995]

1.2.9. RESISTENCIA CONTRA EL CHOQUE TÉRMICO

Dependiendo del uso que se den a las placas esmaltadas, éstas pueden estar sometidas a cambios más o menos bruscos de temperatura; por lo tanto, se debe otorgar al esmalte cierta resistencia térmica. Esto se logra adaptando el coeficiente de dilatación del esmalte. Además el esmalte porcelánico tiene como características ser ignífugo, lo que le da resistencia a altas temperaturas siempre y cuando no se sobrepase su temperatura de ablandamiento, la que depende de la concentración de materiales fundentes en la composición. (Tipán y Vizcaíno, 2008)

1.2.10. RESISTENCIA CONTRA LA ABRASIÓN

La dureza Mohs de los esmaltes es de 5 a 6, es decir, son relativamente duros, no obstante lo cual las superficies esmaltadas de tableros de mesas o de mostradores y los esmaltes de bañeras y fregaderos están expuestos a la abrasión ocasionada por polvos de limpieza, por el polvo de la calle o de la casa y por la arena que llevan consigo las verduras. Por consiguiente, es indispensable que dichas superficies tengan el mayor grado posible de resistencia contra la abrasión. (Kirk, 1962)

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio del efecto de la concentración de óxidos tipo MO en las propiedades del esmalte porcelánico capa base, se prepararon y utilizaron esmaltes en cuya composición química se incorporó como base vidrio de desecho proveniente de botellas utilizadas para envasar licor, y otras materias primas como: cuarzo, bórax, ácido bórico, sulfato de níquel, sulfato de magnesio, carbonato de potasio y óxido de calcio. Luego se esmaltaron láminas de acero proporcionadas por la cerrajería ANDRADE.

Se formuló un esmalte y se determinaron las condiciones óptimas de cocción, tanto en tiempo como en temperatura. Luego se fue variando la composición del esmalte inicial, cambiando la concentración del óxido de calcio, óxido de magnesio y óxido de níquel, obteniéndose un total de diez esmaltes porcelánicos.

Se evaluó la adherencia de los esmaltes que mejores acabados proporcionaron a las placas de acero, para lo que se utilizó el equipo denominado impactómetro de caída libre diseñado por la Ingeniera Ivonne Estévez. (ESTÉVEZ, 2008), esta prueba se la realizó con balines de diferentes pesos.

También se evaluó la resistencia al choque térmico de las mejores placas, las que se las sometió a ciclos térmicos descritos en la Tabla A.17 que se encuentra en el anexo II.

1.3. PREPARACIÓN DE LOS ESMALTES TIPO CAPA BASE CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO

El presente estudio nos permitió determinar el efecto de la concentración del óxido de calcio dentro de la formulación del esmalte porcelánico, sobre la calidad de la superficie lograda luego de someterla a la cocción.

1.3.1. FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS

Para realizar la formulación de los esmaltes con diferentes cantidades de óxido de calcio, se utilizó como base la composición del esmalte tipo capa base E-7 formulado por la Ingeniera Ivonne Estévez (Estévez, 2008), ya que éste presentó mayor adherencia. La formulación del esmalte E-7 se reporta en la Tabla A.4 del anexo I.

La fórmula del esmalte E-7 fue variada en la cantidad de los óxidos básicos ya que se determinó que la suma de los óxidos de sodio y de potasio dan 0,62 moles; es decir, se exceden demasiado al 50% del total de los óxidos básicos; por otro lado, el óxido de calcio se encuentra en mayor cantidad que los óxidos de níquel y de magnesio, lográndose la fórmula molecular del esmalte E-1 que se reporta en la Tabla 3.1, en la que la suma de los óxidos tipo MO da 0,48. Para la formulación de los esmaltes que se utilizaron en el estudio del efecto de éstos óxidos se mantuvo constante este valor.

Dentro de la composición química del esmalte encontramos los tres óxidos tipo MO por lo que en el presente trabajo se empezó formulando esmaltes con contenido de 0,1 moles de óxido de níquel y se varían las cantidades de los óxidos de calcio y de magnesio, recordando que la suma de las moles de los tres óxidos deben dar 0,48, la cantidad de los otros componentes permanecen

inalterados, así se lograron formular los esmaltes E-1, E-2, E2-1 y E-3 que se reportan en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

1.3.2. FRITADO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS.

Antes de obtener cada uno de los esmaltes porcelánicos formulados, se aplicaron los siguientes procesos:

1.3.2.1. Dosificación de las materias primas.

Se realizó los cálculos de la dosificación de las materias primas tomando de base a un óxido, con el cual se facilite su distribución. Se va obteniendo la cantidad necesaria de cada materia prima de acuerdo a la reacción química que se produce en el proceso de cocción, las dosificaciones de las materias primas de cada esmalte porcelánico se reportan en las Tablas 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.

1.3.2.2. Preparación de las materias primas.

Objetivo:

Reducir el tamaño de partícula de las materias primas hasta un tamaño de partícula menor a la malla No. 200 ASTM.

Equipos y materiales:**Tabla 2.1** Equipos para la preparación de materias primas.

Equipos	Marca	Figura No.
Pulverizador	Bleuler Mill (NAEK)	2.1
Mortero y pistilo	Haldenwanger	2.2
Tamiz No. 200 ASTM	Retsch	2.3

**Figura 2.1** Pulverizador.



Figura 2.2 Mortero con pistilo.



Figura 2.3 Malla No. 200 ASTM.

Procedimiento:

- a. PREPARACIÓN DEL VIDRIO DE DESECHO. Los envases utilizados son botellas de vidrio transparente, las cuales se las preparó de la siguiente manera:
- Se lavó con agua y detergente para remover las etiquetas y eliminar cualquier suciedad existente.
 - Se secó a temperatura ambiente.
 - Se las expuso a la llama de un mechero por 5 minutos e inmediatamente se las sumergió en agua fría, para que el cambio brusco de temperatura las fracturen y así obtener pedazos pequeños de vidrio.
 - Los pedazos de mayor tamaño de vidrio se los fragmentó con un martillo.
 - Estos pedazos se los pulverizó con la ayuda del equipo del departamento de Metalurgia Extractiva, colocando en cada carga 100 gramos de vidrio durante un minuto.
 - Se tamizó el vidrio pulverizado utilizando la malla No. 200 ASTM y luego fue almacenado.
- b. PREPARACIÓN DEL CUARZO. El cuarzo que se utilizó provino de Misahualli y se sometió al siguiente procedimiento:
- Se molió en el pulverizador utilizado para el vidrio cargas de 100 gramos por un minuto.
 - Luego se tamizó con la malla No. 200 ASTM y se almacenó.
- c. PREPARACIÓN DEL BÓRAX. Se utilizó bórax de grado técnico y se lo proceso de la siguiente manera:
- Se pulverizó cargas de 100 gramos por un minuto en el mismo equipo anterior.
 - Se tamizó utilizando la malla No. 200 ASTM y luego fue almacenó.
- d. PREPARACIÓN DEL SULFATO DE NÍQUEL Y ÓXIDO DE CALCIO. Se utilizó sulfato de níquel de grado analítico y óxido de calcio técnico, se los preparó de la siguiente manera:

- Se molió una muestra en un mortero con pistilo.
 - Luego se tamizó con la ayuda de la malla No. 200 ASTM y se almacenó.
- e. PREPARACIÓN DEL ÁCIDO BÓRICO. Se utilizó ácido bórico comercial y se no hubo la necesidad de prepararlo porque tenía un tamaño adecuado.
- f. PREPARACIÓN DEL SULFATO DE MAGNESIO Y CARBONATO DE POTASIO. Se utilizó sulfato de magnesio y carbonato de potasio con un grado de humedad alto por lo que no se los pudo tamizar, solamente se los secó antes realizar la mezcla.

1.3.2.3. Preparación de la mezcla de materias primas.

Para la obtención de cada esmalte porcelánico se procedió de la siguiente manera:

Se preparó 40 gramos de cada mezcla de materias primas para lo que se pesaron cada una de las materias primas en las cantidades que se muestran en las Tablas A.7, A.8, A.9 y A.10 que se observan en el anexo I. Se depositaron en una bolsa para homogenizarlas.

1.3.2.4. Obtención y fritado de los esmaltes.

Objetivo:

Obtener el esmalte atronado y con el tamaño de partícula adecuado para proceder al esmaltado de láminas de acero en seco.

Equipos y materiales:**Tabla 2.2** Equipo para la obtención del esmalte atronado.

Equipo y Materiales	Figura No.
Horno de fusión y atronado	2.4
Crisol de cerámica	2.5

**Figura 2.4** Horno de fusión y atronado.



Figura 2.5 Crisol de cerámica.

Procedimiento:

Para la obtención de la frita del esmalte se realizó el siguiente procedimiento:

- Se preparó los crisoles de arcilla roja útiles para la fusión del esmalte, haciendo un orificio de aproximadamente 0,5 cm de diámetro en la base, y luego se cierra el orificio con papel.
- Se colocó la mezcla homogeneizada en el crisol, éste se ubicó en el horno de fusión y atronado, donde se lo dejó por alrededor de 1 hora tiempo necesario para que alcance los 1000°C y fluya a través del orificio. Desde la caída de la primera gota hasta la terminación del proceso se necesitó de alrededor de 30 minutos.
- El esmalte fluido se lo recibió en un recipiente con agua fría; éste es el proceso conocido como atronado.

- Al esmalte atronado se lo lavó con agua destilada, para eliminar cualquier impureza que podría existir en el horno de algún material refractario o residuos de otro esmalte, un ejemplo se observa en la Figura 2.6.



Figura 2.6 Esmalte atronado.

- Luego el esmalte totalmente seco, se molió en un mortero con pistilo.
- Se tamizó en una malla No. 200 A.S.T.M.
- A cada esmalte se lo almacenó en una bolsa plástica e identificó.

1.4. PREPARACIÓN DE LOS ESMALTES TIPO CAPA BASE CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.

El presente estudio nos permitió determinar el efecto de la concentración del óxido de magnesio dentro de la formulación del esmalte porcelánico, sobre la calidad de la superficie lograda luego de someterla a la cocción.

1.4.1. FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS.

Para realizar la formulación de los esmaltes con diferentes cantidades de óxido de magnesio, se utilizó el mismo método descrito en el capítulo 2.1.1.

Para formular los esmaltes porcelánicos con diferentes cantidades de los óxidos de magnesio y de níquel, se mantuvo constante la cantidad de óxido de calcio en 0,278 moles y la suma entre los tres óxidos es de 0,48 moles con lo cual se obtuvo los esmaltes porcelánicos identificados como: E-4, E-5 y E5-1, cuyas fórmulas moleculares se observan en las Tablas 3.9, 3.10 y 3.11.

1.4.2. FRITADO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS.

El proceso para la obtención del esmalte porcelánico y posterior fritado, es similar al reportado en el capítulo 2.1.2. Antes de obtener y luego de fritar cada uno de los esmaltes formulados, se aplicaron los siguientes procesos:

1.4.2.1. Dosificación de las materias primas.

Se realizó los cálculos de la dosificación de las materias primas como en el capítulo 2.1.2.1 los resultados se reportan en las Tablas 3.12, 3.13 y 3.14, y se obtuvieron las mezclas de materia prima para cada esmalte porcelánico,

1.4.2.2. Preparación de las materias primas.

La preparación de las materias primas también se realizó con el mismo procedimiento que el capítulo 2.1.2.2.

1.4.2.3. Preparación de la mezcla de materias primas.

Para la obtención de cada esmalte porcelánico se procedió de la siguiente manera:

La obtención de la mezcla es similar a la de la sección 2.1.2.3, pero se pesó cada una de las materias primas según las Tablas A.11, A.12 y A.13 que se encuentran en el anexo I, y se introdujo en una bolsa de plástico se mezcla y se homogeneiza.

1.4.2.4. Obtención y fritado de los esmaltes.

El procedimiento que se siguió es igual al que se describe en el capítulo 2.1.2.4.

1.5. PREPARACIÓN DE LOS ESMALTES TIPO CAPA BASE CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.

El presente estudio nos permitió determinar el efecto de la concentración del óxido de níquel dentro de la formulación del esmalte porcelánico, sobre la calidad de la superficie lograda luego de someterla a la cocción.

1.5.1. FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS.

Para realizar la formulación de los esmaltes con diferentes cantidades de óxido de níquel, se utilizó el mismo método descrito en el capítulo 2.1.1.

Se formularon los esmaltes porcelánicos con variaciones en las concentraciones de los óxidos de níquel y de calcio, manteniendo constante la concentración de óxido de magnesio en 0,1 moles y la suma entre los tres óxidos es de 0,48 moles con lo cual se obtuvo los esmaltes porcelánicos identificados como: E-6, E-7 y E-8, los cuales se observan en las Tablas 3.15, 3.16 y 3.17.

1.5.2. FRITADO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS.

El proceso de obtención y fritado del esmalte porcelánico es similar al reportado en el capítulo 2.1.2. Antes de obtener y luego de fritar cada uno de los esmaltes formulados, se aplicaron los siguientes procesos:

1.5.2.1. Dosificación de las materias primas.

Se realizó los cálculos de la dosificación de las materias primas como en el capítulo 2.1.2.1 los resultados se reportan en las Tablas 3.18, 3.19 y 3.20, y se obtuvieron las mezclas de materia prima para cada esmalte porcelánico.

1.5.2.2. Preparación de las materias primas

La preparación de las materias primas también se realizó con el mismo procedimiento que el capítulo 2.1.2.2.

1.5.2.3. Preparación de la mezcla de materias primas

Para la obtención de cada esmalte porcelánico se procedió de la siguiente manera:

La obtención de la mezcla es similar a la de la sección 2.1.2.3, pero se pesó cada una de las materias primas según las Tablas A.14, A.15 y A.16 que se encuentran en el anexo I, y se introdujo en una bolsa de plástico se mezcla y se homogeneiza

1.5.2.4. Obtención y fritado de los esmaltes

El procedimiento que se siguió es igual al que se describe en el capítulo 2.1.2.4.

1.6. DETERMINACIÓN DE LOS MEJORES CICLOS DE COCCIÓN

Este estudio tuvo como objetivo el lograr las condiciones de cocción que mejores resultados reportan; para lo que, se evaluó la calidad de la superficie del esmalte cocido mediante la observación de los siguientes parámetros: porcentaje de la superficie recubierta, homogeneidad de la capa de esmalte y presencia o no de fallas.

1.6.1. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.

Para determinar los ciclos de cocción de los esmaltes porcelánicos se procedió de la siguiente manera:

1.6.1.1. Preparación de las placas de acero.

Objetivo:

Obtener placas de acero libres de grasa y óxidos para que no exista interferencia en la adherencia del esmalte a la placa.

Equipos y materiales:

Tabla 2.3 Instrumentos y materiales para la limpieza de las placas de acero.

Instrumentos	Capacidad
Matraz	1000 ml
Probeta	100 ml
Vaso de precipitación	100 ml
Materiales	Especificaciones
Lija	No. 240
Ácido Clorhídrico	Densidad = 1.19 g/cm ³
Hexametilentetramina	Grado analítico

Procedimiento:

El procedimiento aplicado para la limpieza de las placas es el siguiente:

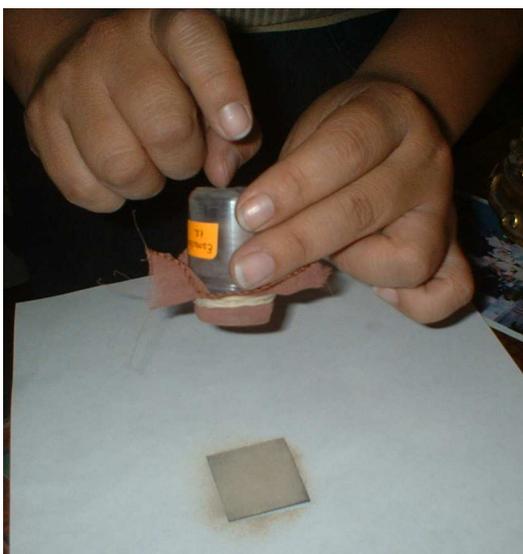
- Se cortaron las placas de acero de 3 x 3 cm.
- Se lavó cada placa utilizando detergente y un estropajo de acero para sacar el óxido y la grasa existente en las mismas.
- Se lijo para sacar óxido bien adherido y limaduras.
- Se preparó una solución disolviendo 3,5 g de hexametilentetramina en 100 ml de ácido clorhídrico con una densidad de $1,19 \text{ g/cm}^3$, y aforando a 1000 ml de agua destilada.
- Se colocó 50 ml de la solución de hexametilentetramina en un vaso de precipitación y se mantienen las placas a esmaltar dentro de ésta por 3 minutos.
- Se restregó las placas con la ayuda de un cepillo de cerdas duras, y luego se enjuagó con agua potable.
- Se sumergió nuevamente las placas en una solución nueva de hexametilentetramina y se dejó durante 3 minutos, luego se enjuagó con agua destilada.
- Se secaron y almacenaron las placas en bolsas plásticas.

1.6.1.2. Aplicación del esmalte crudo.**Objetivo:**

Obtener placas recubiertas en un 100% con el esmalte crudo.

Equipos y materiales:**Tabla 2.4** Instrumentos para la aplicación del esmalte crudo.

Instrumentos	Figura No.
Recipiente y malla	2.7

**Figura 2.7** Método de aplicación del esmalte crudo.**Procedimiento:**

La aplicación del esmalte se la realizó por espolvoreo en seco, para lo que:

- Se pesó 0,8 g de esmalte molido y tamizado.
- Se colocó en el recipiente adecuado para espolvorear a través de una malla colocada en la parte superior.
- Se espolvoreó sobre la superficie de la placa de manera que se logró una capa uniforme.
- Las placas recubiertas con esmalte crudo se depositaron sobre una rejilla refractaria, la que se colocó dentro de la cámara de la mufla.

1.6.1.3. Determinación de la temperatura de maduración.

Para la determinación de la temperatura de maduración de los estos esmaltes porcelánicos se tomó como base el esmalte E-1 el cual se sometió a diferentes temperaturas de maduración como: 830°C, 840°C, 850°C y se mantuvo el tiempo de maduración en 10 minutos.

Objetivo:

Determinar la temperatura de maduración óptima para los esmaltes porcelánicos con variación de la cantidad de óxido de calcio.

Equipos y Materiales:

Tabla 2.5 Equipo para la determinación de la temperatura de maduración.

Equipo	Marca	Temperatura Máxima (°C)	Sensibilidad (°C)
Mufla	Lindberg	1200	1



Figura 2.8 Mufla

Procedimiento:

Para la determinación de la temperatura de maduración se aplicó el siguiente procedimiento:

- Se realizó un calentamiento, por 29 minutos, desde la temperatura ambiente hasta 600°C, y se mantuvo a esta temperatura durante 5 minutos.
- Se subió la temperatura desde 600°C hasta la de maduración en alrededor de 17 minutos dependiendo de la última.
- Se mantuvo la temperatura de maduración constante durante 10 minutos.
- Se enfrió desde la temperatura de maduración hasta los 700°C en alrededor de 42 minutos.
- Se mantuvo constante la temperatura de 700°C durante 5 minutos.
- Se volvió a enfriar desde los 700°C hasta la temperatura ambiente en alrededor de 5 horas.

Los resultados se reportan en la Tabla 3.23

1.6.1.4. Determinación del tiempo de maduración.

Para la determinación del tiempo de maduración también se trabajó con el esmalte E-1 al que se lo sometió a los ciclos de cocción que mejores resultados entregaron; estos son a 840°C y 850°C y se varió el tiempo de maduración, se realizaron pruebas a 5 y 15 minutos.

Objetivo:

Determinar el ciclo de cocción con el tiempo de maduración óptimo; es decir que, las superficies logradas presenten las mejores características.

Equipos y Materiales:

Tabla 2.6 Equipo para la determinación del tiempo de maduración.

Equipo	Marca	Temperatura Máxima (°C)	Sensibilidad (°C)
Mufla	Lindberg	1200	1°C

Procedimiento:

Para la determinación del tiempo de maduración se aplicó el mismo procedimiento anotado en la determinación de la temperatura de maduración, pero en este caso se cambia el tiempo de maduración de cada ciclo.

Los resultados se reportan en las Tablas 3.25 y 3.26.

1.6.1.5. Aplicación del ciclo de cocción óptimo a los esmaltes porcelánicos E-2, E2-1 y E-3.

Una vez determinado el ciclo de cocción óptimo con el esmalte E-1 que en este caso fueron identificados como A y B, se procedió a aplicarlos a los otros esmaltes con variación en las cantidades de óxido de calcio que son: E-2, E2-1 y E-3. El procedimiento de aplicación de los ciclos de cocción es básicamente el mismo que se utilizó para determinar el ciclo de cocción óptimo. Los resultados se observan en las Tablas 3.29, 3.30 y 3.31.

1.6.2. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.

Para determinar los ciclos de cocción óptimos de estos esmaltes porcelánicos se tomó como base el esmalte E-4, donde se trabajó con el mismo procedimiento del capítulo 2.4.1.

1.6.2.1. Preparación de las placas de acero.

Para la preparación de las placas de acero se procedió de la misma manera como se los realizó en el capítulo 2.4.1.1

1.6.2.2. Aplicación del esmalte crudo.

El procedimiento para la aplicación del esmalte crudo es similar al del capítulo 2.4.1.2.

1.6.2.3. Determinación de la temperatura de maduración.

Para la determinación de la temperatura de maduración de los esmaltes con diferentes contenidos de óxido de magnesio, se tomó como base al esmalte E-4 donde las temperaturas de maduración son: 820°C, 840°C y 850°C, con un tiempo de maduración de 8 minutos constante.

Objetivo:

Determinar la temperatura de maduración óptima para los esmaltes porcelánicos con variación de la cantidad de óxido de magnesio.

Equipos y Materiales:

Tabla 2.7 Equipo para la determinación de la temperatura de maduración.

Equipo	Marca	Temperatura Máxima (°C)	Sensibilidad (°C)
Mufla	Lindberg	1200	1

Procedimiento:

Para la determinación de la temperatura de maduración se aplicó el siguiente procedimiento:

- Se realizó un calentamiento por 31 minutos desde la temperatura ambiente hasta 650°C, y se mantuvo a esta temperatura durante 5 minutos.
- Se subió la temperatura desde 650°C hasta la temperatura de maduración en alrededor de 16 minutos dependiendo de la ésta temperatura.
- Se mantuvo la temperatura de maduración constante durante 8 minutos.
- Se enfrió desde la temperatura de maduración hasta los 700°C en alrededor de 44 minutos.
- Se mantuvo constante la temperatura de 700°C durante 5 minutos.
- Se volvió a enfriar desde los 700°C hasta la temperatura ambiente en alrededor de 5 horas.

Los resultados se reportan en la Tabla 3.33.

1.6.2.4. Determinación del tiempo de maduración.

Para la determinación del tiempo de maduración también se trabajó con el esmalte E-4 el que se lo sometió a al ciclo de cocción que mejores resultados entregaron; este es a 840°C y se varió el tiempo de maduración, se realizaron pruebas a 5 y 15 minutos. Los resultados se observan en la Tabla 3.35.

1.6.2.5. Aplicación del ciclo de cocción óptimo a los esmaltes porcelánicos E-5 y E5-1.

Una vez determinado el ciclo de cocción óptimo con el esmalte E-4 que en este caso fue identificado como el ciclo de cocción C, se procedió a aplicarlo a los otros esmaltes con variación en las cantidades de óxido de magnesio que son: E-5 y E5-1. El procedimiento de aplicación de los ciclos de cocción es básicamente el mismo que se utilizó para determinar el ciclo de cocción óptimo. Los resultados se observan en las Tablas 3.37 y 3.38.

1.6.3. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.

Para determinar los ciclos de cocción óptimos de estos esmaltes porcelánicos se tomó como base el esmalte E-6, donde se trabajó con el mismo procedimiento del capítulo 2.4.1.

1.6.3.1. Preparación de las placas de acero.

Para la preparación de las placas de acero se procedió de la misma manera como se los realizó en el capítulo 2.4.1.1

1.6.3.2. Aplicación del esmalte crudo.

El procedimiento para la aplicación del esmalte crudo es similar al del capítulo 2.4.1.2.

1.6.3.3. Determinación de la temperatura de maduración.

Para la determinación de la temperatura de maduración de los esmaltes con diferentes contenidos de óxido de níquel, se tomó como base al esmalte E-4 donde las temperaturas de maduración son: 835°C, 845°C y 855°C, con un tiempo de maduración de 9 minutos constante.

Objetivo:

Determinar la temperatura de maduración óptima para los esmaltes porcelánicos con variación de la cantidad de óxido de níquel.

Equipos y Materiales:

Tabla 2.8 Equipo para la determinación de la temperatura de maduración.

Equipo	Marca	Temperatura Máxima (°C)	Sensibilidad (°C)
Mufla	Lindberg	1200	1

Procedimiento:

Para la determinación de la temperatura de maduración se aplicó el siguiente procedimiento:

- Se realizó un calentamiento por 33 minutos desde la temperatura ambiente hasta 700°C, y se mantuvo a esta temperatura durante 5 minutos.
- Se subió la temperatura desde 700°C hasta la temperatura de maduración en alrededor de 16 minutos dependiendo de la ésta temperatura.
- Se mantuvo la temperatura de maduración constante durante 9 minutos.
- Se enfrió desde la temperatura de maduración hasta los 650°C en alrededor de 50 minutos.
- Se mantuvo constante la temperatura de 650°C durante 5 minutos.
- Se volvió a enfriar desde los 650°C hasta la temperatura ambiente en alrededor de 5 horas.

Los resultados se reportan en la Tabla 3.40.

1.6.3.4. Determinación del tiempo de maduración.

Para la determinación del tiempo de maduración también se trabajó con el esmalte E-6 el que se lo sometió a al ciclo de cocción que mejores resultados

entregaron; este es a 845°C y se varió el tiempo de maduración, se realizaron pruebas a 5 y 15 minutos. El procedimiento es similar al del capítulo 2.4.2.3 se cambian únicamente los tiempos de maduración. Los resultados se observan en la Tabla 3.42.

1.6.3.5. Aplicación del ciclo de cocción óptimo a los esmaltes porcelánicos E-7 y E-8.

Una vez determinado el ciclo de cocción óptimo con el esmalte E-6 que en este caso fue identificado como el ciclo de cocción D, se procedió a aplicarlo a los otros esmaltes con variación en las cantidades de óxido de níquel que son: E-7 y E-8. El procedimiento de aplicación de los ciclos de cocción es básicamente el mismo que se utilizó para determinar el ciclo de cocción óptimo. Los resultados se observan en las Tablas 3.44 y 3.45.

1.7. EVALUACIÓN DE LAS RESISTENCIAS AL CHOQUE TÉRMICO Y AL IMPACTO.

Para la evaluación de la calidad de las superficies esmaltadas, las placas que mejores resultados presentaron fueron sometidas a las pruebas de resistencias al choque térmico y al impacto.

1.7.1. DETERMINACIÓN DE LAS RESISTENCIAS AL CHOQUE TÉRMICO Y AL IMPACTO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.

Las pruebas para la resistencia al choque térmico permitieron determinar hasta que temperatura pueden calentarse las placas esmaltadas y luego

inmediatamente enfriarlas sin que por causa de este proceso presente fallas en la superficie.

1.7.1.1. Pruebas para la determinación de la resistencia al choque térmico.

Objetivo:

Determinar el esmalte porcelánico con mejor resistencia al cambio brusco de temperatura.

Equipos y Materiales:

El equipo utilizado para la prueba de choque térmico se muestra en la Figura 2.11 y se describe a continuación:

Tabla 2.9 Equipo y material para la prueba de choque térmico.

Equipo	Marca	Temperatura máxima (°C)	Sensibilidad (°C)
Termostato	Thomas Scientific	100	2
Mufla	Lindberg	1200	1
Equipo	Marca	Capacidad	
Baño termostático	Julabo	5,91 galones	
Termómetro		-10 a 110°C	



Figura 2.9 Equipo para la prueba de Choque Térmico

Procedimiento:

Se realizó las pruebas de resistencia al choque térmico con los mejores esmaltes que en este caso fueron los esmaltes E-1, E-2, las placas esmaltas se las sometió al proceso que se describe a continuación:

- Se tomó 5 placas y se las colocó en la cámara de la mufla que se encontraba a 245°C y se las mantuvo por 3 minutos.
- Se las sacó de la mufla y se las sumergió en el baño termostático a una temperatura de alrededor de 20°C y se las mantuvo por 10 segundos.
- Se retiró el exceso de agua de las placas con una esponja humedecida y se examinó si el choque térmico produjo algún daño en el esmalte porcelánico.
- Cuando el resultado fue negativo, las 5 placas se volvieron a colocar en la cámara de la mufla que se encontraba a 260°C y se dejaron por 8 minutos.
- Se las sacó de la mufla y se las sumergió en el baño termostático a una temperatura de alrededor de 20°C y se dejó por 10 segundos.
- Se secó el exceso de agua y se evaluó la existencia de fallas en el esmalte porcelánico de las placas.
- Cuando el resultado fue negativo se procedió con los demás ciclos que se detallan en la Tabla A.17 que se presenta en los anexos II.

Los resultados se reportan en las Tablas 3.46, 3.47 y 3.48.

1.7.1.2. Pruebas para la determinación de la resistencia al impacto.

Se determinó la adherencia del esmalte porcelánico a la superficie de las placas de acero mediante las pruebas de la resistencia al impacto, fundamentada en que a mayor grado de adherencia, mayor es la energía aplicada necesaria para remover el esmalte de la superficie metálica.

Objetivo:

Determinar el esmalte porcelánico que tiene mejor resistencia al impacto.

Equipos y Materiales:

El equipo utilizado para las pruebas fue diseñado por la Ingeniera Ivonne Estévez (Estévez, 2008) el cual se observa en la Figura 2.10.



Figura 2.10 Equipo para la prueba de impacto

Procedimiento:

Las pruebas de resistencia al impacto se realizó utilizando los mejores esmaltes con sus respectivos ciclos de cocción como son: el esmalte E-1 con su temperatura de maduración de 840°C, y el esmalte E-3 con sus temperaturas de maduración de 840°C y 850°C. Estas se sometieron al siguiente procedimiento:

- Se colocó la placa en la parte inferior del impactómetro adecuado para este fin.
- Se colocó la esfera metálica de peso igual a 40,06 gramos en la parte superior a 1 m de la placa esmaltada.
- Se retiró el soporte de la esfera y se dejó caer sobre la placa esmaltada.
- Se observó el efecto del impacto de la esfera metálica sobre la placa esmaltada.

- Si la placa analizada no presentaba ninguna cuarteadura como producto del impacto, se procedió a trabajar con otra placa de las mismas características que la anterior pero con una esfera de mayor peso.

La energía transmitida por la esfera metálica a la placa se la calculó aplicando la fórmula:

$$E = m_b g h_L \quad [2.1]$$

Donde:

m_b = masa de la esfera metálica (Kg)

g = constante de gravitacional (9,81 m / s²)

h_L = altura de caída de la esfera (m)

El ejemplo de cálculo se reporta en el anexo III.

Se utilizaron pesos de 66,81 y 95,05 gramos.

Los resultados se observan en las Tablas 3.53, 3.54 y 3.55.

1.7.2. DETERMINACIÓN DE LAS RESISTENCIAS AL CHOQUE TÉRMICO Y AL IMPACTO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.

Las pruebas para la resistencia al choque térmico se la realizaron para saber cuanto resisten las placas a los cambios bruscos de temperatura.

1.7.2.1. Pruebas para la determinación de la resistencia al choque térmico.

Se realizó las pruebas de resistencia al choque térmico con los mejores esmaltes que en este caso fueron los esmaltes E-4 y E-5 bajo el ciclo de cocción C, las placas esmaltadas se las sometió al proceso que se describió en el capítulo 2.5.1.1. Los resultados se reportan en las Tablas 3.49 y 3.50.

1.7.2.2. Pruebas para la determinación de la resistencia al impacto.

Se determinó la adherencia del esmalte porcelánico a la superficie de las placas de acero mediante las pruebas de la resistencia al impacto, fundamentada en que a mayor grado de adherencia, mayor es la energía aplicada necesaria para remover el esmalte de la superficie metálica. El procedimiento aplicado para los esmaltes E-4 y E-5 bajo el ciclo de cocción C es similar al del capítulo 2.5.1.2.

Los resultados se reportan en las Tablas 3.56 y 3.57.

1.7.3. DETERMINACIÓN DE LAS RESISTENCIAS AL CHOQUE TÉRMICO Y AL IMPACTO DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.

Las pruebas para la resistencia al choque térmico se realizó para saber cuanto resisten las placas a los cambios bruscos de temperatura.

1.7.3.1. Pruebas para la determinación de la resistencia al choque térmico.

Se realizó las pruebas de resistencia al choque térmico con los mejores esmaltes que en este caso fueron los esmaltes E-6 y E-7 bajo el ciclo de cocción D, las placas esmaltas se las sometió al proceso que se describió en el capítulo 2.5.1.1.

Los resultados se observan en las Tablas 3.51 y 3.52.

1.7.3.2. Pruebas para la determinación de la resistencia al impacto.

Se determinó la adherencia del esmalte porcelánico a la superficie de las placas de acero mediante las pruebas de la resistencia al impacto, fundamentada en que a mayor grado de adherencia, mayor es la energía aplicada necesaria para remover el esmalte de la superficie metálica. El procedimiento aplicado para los esmaltes E-6 y E-7 bajo el ciclo de cocción D es similar al del capítulo 2.5.1.2.

Los resultados se observan en las Tablas 3.58 y 3.59.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.8. FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS

La formulación de cada uno de los esmaltes preparados se logró tomando como base el esmalte porcelánico E-7 (Ivonne Estévez) y considerando las materias primas disponibles.

1.8.1. FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO

Para formular estos esmaltes se mantuvo la cantidad del óxido de níquel en 0,1 moles y la suma de los óxidos de calcio y de magnesio da como resultado 0,38 moles.

Las fórmulas de los resultados estudiados se reportan en las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

Tabla 3.1 Fórmula molecular del esmalte E-1.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,32				
MgO	0,06				
NiO	0,1				

Tabla 3.2 Fórmula molecular del esmalte E-2.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,28				
MgO	0,10				
NiO	0,10				

Tabla 3.3 Fórmula molecular del esmalte porcelánico E2-1.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,28				
MgO	0,10				
NiO	0,10				

La fórmula molecular del esmalte E2-1 es la misma que la del esmalte E-2, la diferencia esta en que en la dosificación se reemplazó el sulfato de magnesio por óxido de magnesio.

Tabla 3.4 Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-3.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,25				
MgO	0,13				
NiO	0,1				

Tabla 3.5 Dosificación de materias primas del esmalte E-1.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,728	151,8	51,3
Bórax	0,055	20,97	7,09
Ácido Bórico	0,832	51,43	17,38
Cuarzo	0,461	27,69	9,36
Sulfato de Níquel	0,1	26,28	8,88
Sulfato de Magnesio	0,044	10,84	3,66
Carbonato de Potasio	0,0254	4,2	1,42
Óxido de Calcio	0,047	2,64	0,89
	Total	295,85	

Tabla 3.6 Dosificación de materias primas del esmalte E-2.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,746	150,56	53,96
Bórax	0,044	14,66	5,09
Ácido Bórico	0,876	54,15	18,78
Cuarzo	0,418	25,11	8,71
Sulfato de Níquel	0,1	15,075	5,23
Sulfato de Magnesio	0,0836	20,59	7,14
Carbonato de Potasio	0,025	3,15	1,09
	Total	288,295	

Tabla 3.7 Dosificación de materias primas del esmalte E2-1.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,741	154,51	54,106
Bórax	0,047	17,92	6,275
Ácido Bórico	0,864	53,41	18,703
Cuarzo	0,430	25,83	9,045
Sulfato de Níquel	0,1	26,28	9,203
Óxido de Magnesio	0,0857	3,455	1,209
Carbonato de Potasio	0,0252	4,16	1,456

Total	285,565
-------	---------

Tabla 3.8 Dosificación de materias primas del esmalte E-3.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,667	139,08	44,62
Bórax	0,091	34,5	11,07
Ácido Bórico	0,690	42,66	13,69
Cuarzo	0,605	36,34	11,66
Sulfato de Níquel	0,1	26,28	8,43
Sulfato de Magnesio	0,115	28,42	9,12
Carbonato de Potasio	0,026	4,41	1,41
Total		311,69	

1.8.2. FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.

Para formular estos esmaltes se mantuvo la cantidad del óxido de calcio en 0,278 moles y la suma de los óxidos de magnesio y de níquel da como resultado 0,202 moles.

Las fórmulas de los resultados estudiados se reportan en las tablas 3.9, 3.10 y 3.11.

Tabla 3.9 Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-4.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,278				

MgO	0,058		
NiO	0,144		

Tabla 3.10 Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-5.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,278				
MgO	0,082				
NiO	0,12				

Tabla 3.11 Fórmula Molecular del esmalte porcelánico E5-1.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,278				
MgO	0,082				
NiO	0,12				

La fórmula molecular del esmalte E5-1 es la misma que la del esmalte E-5, la diferencia esta en que en la dosificación se reemplazó el sulfato de magnesio por óxido de magnesio.

Tabla 3.12 Dosificación de materias primas del esmalte E-4.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,741	154,51	50,88
Bórax	0,047	17,92	5,9
Ácido Bórico	0,864	53,41	17,59
Cuarzo	0,430	25,83	8,50
Sulfato de Níquel	0,144	37,84	12,46
Sulfato de Magnesio	0,0407	10,03	3,30
Carbonato de Potasio	0,0252	4,16	1,37
	Total	303,7	

Tabla 3.13 Dosificación de materias primas del esmalte E-5.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,741	154,51	50,9
Bórax	0,047	17,92	5,9
Ácido Bórico	0,864	53,41	17,59
Cuarzo	0,430	25,83	8,51
Sulfato de Níquel	0,12	31,53	10,39
Sulfato de Magnesio	0,0657	16,19	5,33
Carbonato de Potasio	0,0252	4,16	1,37
	Total	303,55	

Tabla 3.14 Dosificación de materias primas del esmalte E5-1.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,741	154,51	53,277
Bórax	0,047	17,92	6,179

Ácido Bórico	0,864	53,41	18,417
Cuarzo	0,430	25,83	8,906
Sulfato de Níquel	0,12	31,53	10,872
Óxido de Magnesio	0,0657	2,649	0,913
Carbonato de Potasio	0,0252	4,16	1,434
Total		290	

1.8.3. FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.

Para formular estos esmaltes se mantuvo la cantidad del óxido de magnesio en 0,1 moles y la suma de los óxidos de calcio y de níquel da como resultado 0,38 moles.

Las fórmulas de los resultados estudiados se reportan en las tablas 3.9, 3.10 y 3.11.

Tabla 3.15 Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-6.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,32				
MgO	0,1				
NiO	0,06				

Tabla 3.16 Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-7.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184

K ₂ O	0,04		B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,278			
MgO	0,10			
NiO	0,102			

Tabla 3.17 Fórmula molecular del esmalte porcelánico E-8.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,25				
MgO	0,1				
NiO	0,13				

Tabla 3.18 Dosificación de materias primas del esmalte E-6.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,741	154,51	51,01
Bórax	0,047	17,92	5,92
Ácido Bórico	0,864	53,41	17,63
Cuarzo	0,430	25,83	8,53
Sulfato de Níquel	0,08	21,02	6,94
Sulfato de Magnesio	0,1057	26,04	8,59
Carbonato de Potasio	0,0252	4,16	1,37
	Total	302,89	

Tabla 3.19 Dosificación de materias primas del esmalte E-7.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,728	151,8	51,42
Bórax	0,055	20,97	7,1
Ácido Bórico	0,832	51,43	17,42
Cuarzo	0,461	27,69	9,38
Sulfato de Níquel	0,06	15,765	5,34
Sulfato de Magnesio	0,084	20,696	7,01
Carbonato de Potasio	0,0254	4,203	1,424
Óxido de Calcio	0,047	2,636	0,893
	Total	295,19	

Tabla 3.20 Dosificación de materias primas del esmalte E-8.

Materias Primas	Peso (mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,667	139,08	44,55
Bórax	0,09	34,505	11,05
Ácido Bórico	0,69	42,66	13,67
Cuarzo	0,605	36,34	11,64
Sulfato de Níquel	0,13	34,16	10,94
Sulfato de Magnesio	0,085	21,02	6,73
Carbonato de Potasio	0,026	4,41	1,41
	Total	312,17	

1.9. DETERMINACIÓN DE LOS CICLOS DE COCCIÓN.

Los ciclos de cocción aplicados a las placas recubiertas con esmalte crudo, constan de 3 etapas: calentamiento, maduración y enfriamiento, estos procesos fueron evaluados mediante la temperatura y el tiempo de maduración bajo los que se lograron superficies esmaltadas homogéneas y sin fallas.

1.9.1. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.

1.9.1.1. Determinación de la temperatura de maduración.

En la Tabla 3.21 se observa una muestra del ciclo de cocción de esmaltes porcelánicos, en ésta no se reportan la temperatura ni el tiempo de maduración ya que estos parámetros son variables hasta alcanzar los mejores resultados.

Tabla 3.21 Ciclo de cocción referencia.

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 600	29
	600 - 600	5
	600 - TM	17
Maduración	TM - TM	tm
Enfriamiento	TM - 700	42
	700 - 700	5
	700 - 20	300

Donde:

TM = temperatura de maduración.

tm = tiempo de maduración.

Para la determinación de la temperatura de maduración se mantuvo el tiempo de maduración en 10 minutos, este ciclo aplicado al esmalte E-1 se observa en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22 Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-1 (TM).

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 600	29
	600 - 600	5
	600 - TM	17
Maduración	TM - TM	10
Enfriamiento	TM - 700	42
	700 - 700	5
	700 - 20	300

TM = 830°C, 840°C y 850°C.

Tabla 3.23 Resultados de la cocción del esmalte E-1 con tiempo de maduración de 10 minutos.

Temperatura de Maduración (°C)	Características	Muestras
830	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 98%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie áspera. ◆ Presencia de pocas burbujas dispersos por toda la superficie de la placa. 	
840	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 100%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ No existe presencia burbujas. 	

Tabla 3.23 Continuación.

Temperatura de Maduración (°C)	Características	Muestras
850	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 100%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ No existe presencia de burbujas. 	

Discusión de Resultados

De acuerdo a las características presentadas en la Tabla 3.32 las temperaturas que dan resultados óptimos son las de 840°C y 850°C, con las cuales se trabajó posteriormente para la obtención del tiempo de maduración óptimo.

1.9.1.2. Determinación del tiempo de maduración.

Se determinó el tiempo de maduración trabajando a 5 y 15 minutos, para el esmalte E-1 con la temperatura de maduración de 840°C y 850°C. En la Tabla 3.24 se presenta el ciclo de cocción de referencia para 840°C de temperatura de maduración.

Tabla 3.24 Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-1 (tm).

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 600	29
	600 - 600	5
	600 - TM	17
Maduración	TM - TM	tm
Enfriamiento	TM - 700	42
	700 - 700	5
	700 - 20	300

TM = 840 y 850°C.

tm = 5 y 15 minutos.

Tabla 3.25 Resultados de la cocción del esmalte E-1 con temperatura de maduración de 840°C.

Tiempo de Maduración (min)	Características	Muestras
5	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 96%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie áspera. ◆ Presencia de burbujas dispersos por toda la superficie de la placa. 	
15	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 97%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ Presencia de burbujas dispersos por toda la superficie de la placa. 	

Tabla 3.26 Resultados de la cocción del esmalte E-1 con temperatura de maduración de 850°C.

Tiempo de Maduración (min)	Características	Muestras
5	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 97%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie áspera. ◆ Presencia de burbujas dispersos por toda la superficie de la placa. 	

15	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 98%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ Presencia de burbujas dispersos por toda la superficie de la placa. 	
----	---	---

Discusión de Resultados

De acuerdo a los resultados presentados en las Tablas 3.25 y 3.26 se observa que al mantener la temperatura de maduración constante durante 5 y 15 minutos no se logra los mejores resultados; por lo que, se toman los ciclos con temperatura de maduración de 840°C y tiempo de maduración de 10 minutos (ciclo A) y con temperatura de maduración de 850°C y tiempo de maduración de 10 minutos (ciclo B) como los óptimos. En las Tablas 3.27, 3.28 y en los gráficos 3.1, 3.2 se reportan los ciclos A y B.

Tabla 3.27 Ciclo de cocción A.

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 600	29
	600 - 600	5
	600 - 840	17
Maduración	840 - 840	10
Enfriamiento	840 - 700	42
	700 - 700	5
	700 - 20	300

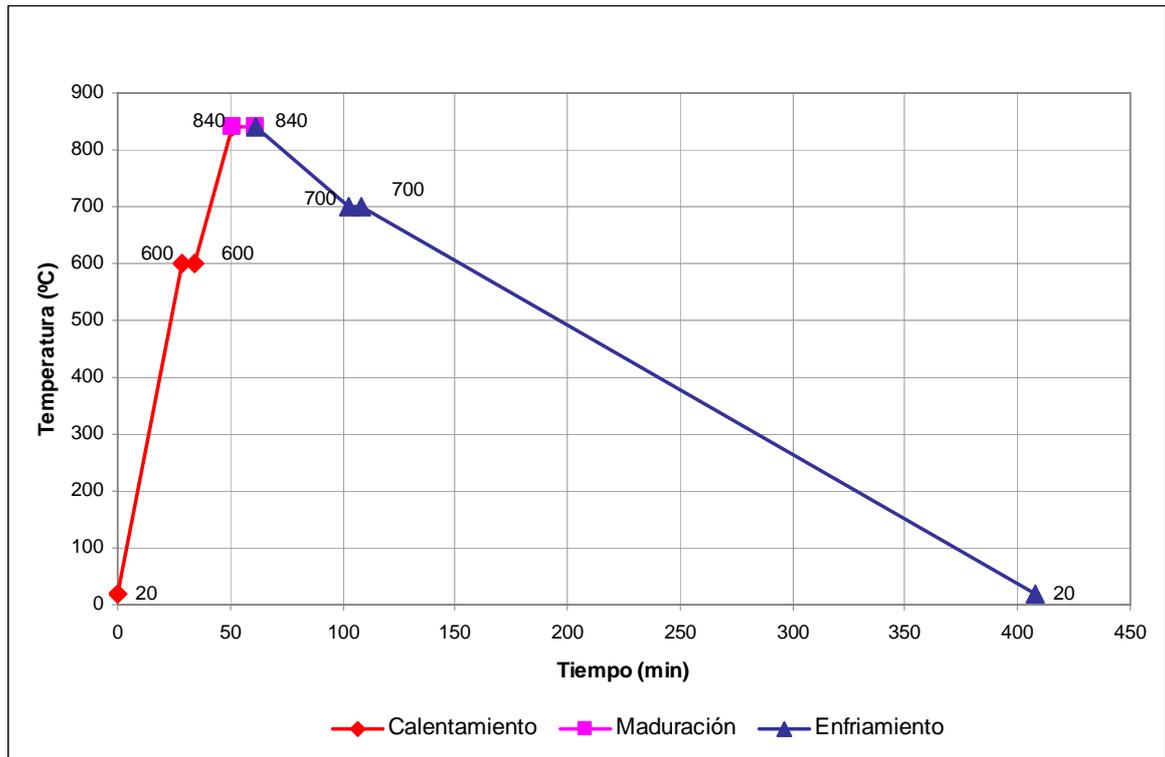


Figura 3.1 Ciclo de cocción A.

Tabla 3.28 Ciclo de cocción B.

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 600	29
	600 - 600	5
	600 - 850	17
Maduración	850 - 850	10
Enfriamiento	850 - 700	42
	700 - 700	5
	700 - 20	300

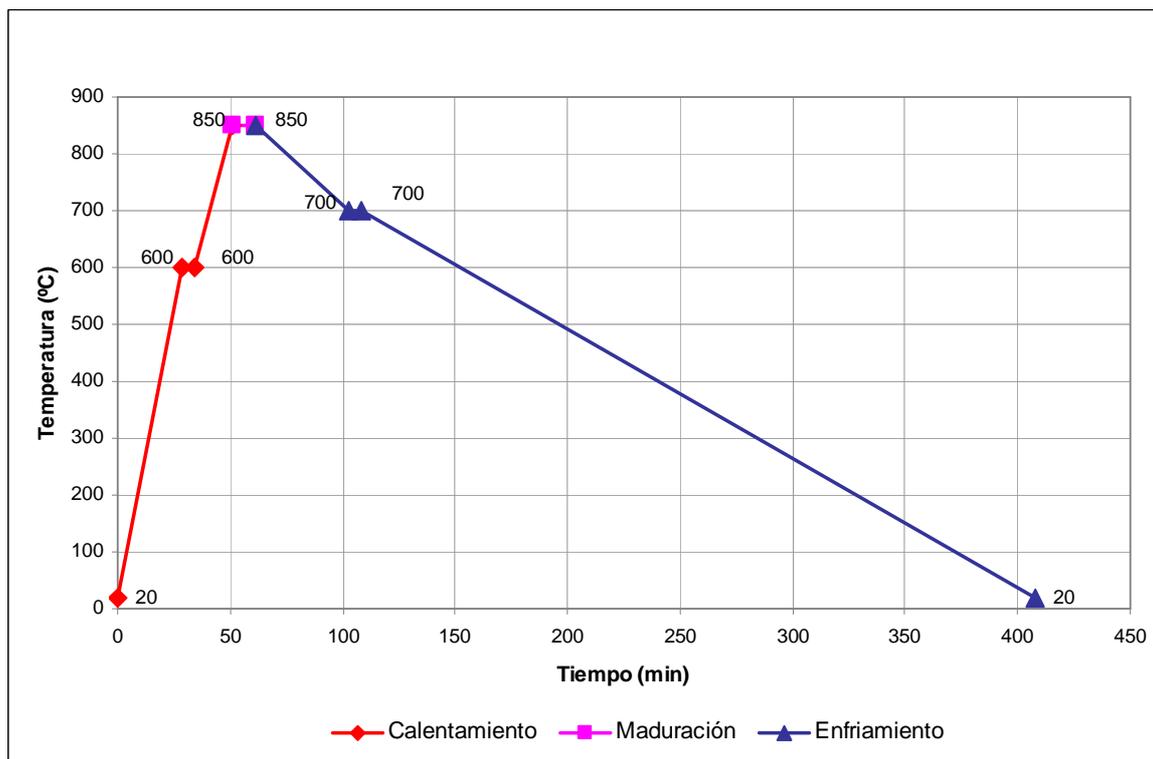


Figura 3.2 Ciclo de cocción B.

Conforme a los resultados obtenidos se eligió a las placas esmaltadas con esmalte E-1 y cocidos con el ciclo A y B, para someterlas a las pruebas de resistencia al choque térmico y al impacto.

1.9.1.3. Aplicación del ciclos de cocción A y B en los esmaltes E-2, E2-1 y E-3.

Se procedió a aplicar los ciclos de cocción A y B a los esmaltes E-2, E2-1 y E-3, los resultados se observan en las Tablas 3.29, 3.30 y 3.31.

Tabla 3.29 Resultados de la cocción del esmalte E-2.

Ciclo	Características	Muestras
-------	-----------------	----------

A	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 100%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ No existe presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	
B	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 100%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ Presencia de puntos negros dispersos por toda la superficie de la placa. 	

Discusión de Resultados

Como se observa en la Tabla 3.29 la placa esmaltada con el ciclo de cocción A da resultados óptimos, pero la placa esmaltada con el ciclo de cocción B tiene puntos que puede deberse a una inadecuada limpieza de placa o a la contaminación de capa de esmalte por suciedad ambiental.

Conforme a los resultados obtenidos se eligió a la placa esmaltada con esmalte E-2 y cocido con el ciclo A, para someterlas a las pruebas de resistencia al choque térmico y al impacto.

Tabla 3.30 Resultados de la cocción del esmalte E2-1.

Ciclo	Características	Muestras
-------	-----------------	----------

A	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 99%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de muchas burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	
B	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 99%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ Presencia de puntos negros dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Discusión de Resultados

Se observa en la Tabla 3.30 que tanto la placa esmaltada con el ciclo de cocción A y la placa esmaltada con el ciclo de cocción B presentan fallas, que podría deberse a la contaminación del esmalte en el proceso de atronado o como producto de las reacciones entre el esmalte y el soporte.

Conforme a los resultados obtenidos no se eligió ninguna placa para someterlas a las pruebas de resistencia al choque térmico y al impacto.

Tabla 3.31 Resultados de la cocción del esmalte E-3.

Ciclo	Características	Muestras
-------	-----------------	----------

A	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 99%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa y porosa. ◆ Presencia de muchas burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	
B	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 99%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa y porosa. ◆ Presencia de muchas burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Discusión de Resultados

Estas placas esmaltadas con el ciclo de cocción A y B, presentan muchas fallas, especialmente poros que son producto de la formación de burbujas de gases que emergen a la superficie, un alto contenido de óxidos bóricos favorece la formación de burbujas, pero el óxido de cinc produce lo contrario, por lo que esta placas no fueron sometidas a las pruebas de resistencia la choque térmico y al impacto.

1.9.2. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.

1.9.2.1. Determinación de la temperatura de maduración.

Se determinó la temperatura de maduración de estos esmaltes tomando como muestra el esmalte E-4, al que se le sometió a temperaturas de maduración de 820°C, 840°C y 860°C, y el tiempo de maduración constante es de 8 minutos. En la Tabla 3.32 se presenta el ciclo de cocción de referencia.

Tabla 3.32 Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-4 (TM).

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 650	31
	650 - 650	5
	650 - TM	16
Maduración	TM - TM	8
Enfriamiento	TM - 700	44
	700 - 700	5
	700 - 20	300

TM = 820°C, 840°C y 860°C.

Tabla 3.33 Resultados de la cocción del esmalte E-4 con tiempo de maduración de 8 minutos.

Temperatura de Maduración (°C)	Características	Muestras
--------------------------------	-----------------	----------

820	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 96%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	
840	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 99%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ No existe presencia burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	
860	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 97%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Discusión de Resultados

De acuerdo a las características presentadas en la Tabla 3.33 la temperatura que dan resultados óptimos es la de 840°C, con las cuales se trabajó posteriormente para la obtención del tiempo de maduración óptimo.

1.9.2.2. Determinación del tiempo de maduración.

Se determinó el tiempo de maduración trabajando a 5 y 15 minutos, para el esmalte E-4 con la temperatura de maduración de 840°C. En la Tabla 3.34 se

presenta el ciclo de cocción de referencia para 840°C de temperatura de maduración.

Tabla 3.34 Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-4 (tm).

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 650	31
	650 - 650	5
	650 - 840	16
Maduración	840 - 840	tm
Enfriamiento	840 - 700	44
	700 - 700	5
	700 - 20	300

tm = 5 y 15 minutos.

Tabla 3.35 Resultados de la cocción del esmalte E-4 con temperatura de maduración de 840°C.

Tiempo de Maduración (min)	Características	Muestras
5	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 93%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Tabla 3.35 Continuación

Tiempo de Maduración (min)	Características	Muestras

15	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 99%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	
----	--	---

Discusión de Resultados

De acuerdo a las características presentadas en la Tabla 3.44 los tiempos de maduración de 5 y 15 minutos no son óptimos, por lo que se puede concluir que el ciclo de cocción óptimo consta de temperatura de maduración de 840°C y tiempo de maduración de 8 minutos (ciclo C) que se observa en la Tabla 3.36 y el gráfico 3.3.

Tabla 3.36 Ciclo de cocción C.

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 650	31
	650 - 650	5
	650 - 840	16
Maduración	840 - 840	8
Enfriamiento	840 - 700	44
	700 - 700	5
	700 - 20	300

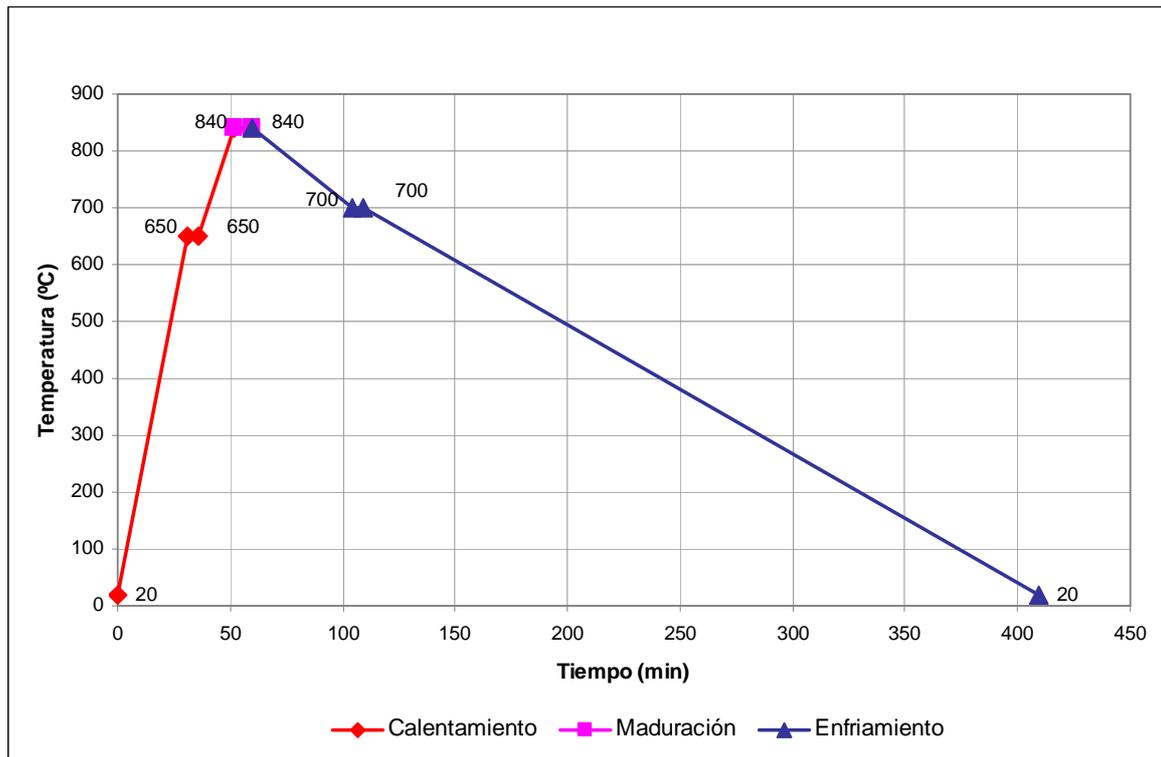


Figura 3.3 Ciclo de cocción C.

Conforme a los resultados obtenidos se eligió a las placas esmaltadas con esmalte E-4 y cocido con el ciclo C, para someterlas a las pruebas de resistencia al choque térmico y al impacto.

1.9.2.3. Aplicación del ciclo de cocción C en los esmaltes E-5 y E5-1.

Se procedió a aplicar el ciclo de cocción C a los esmaltes E-5 y E5-1, donde las características se observan en las Tablas 3.37 y 3.38.

Tabla 3.37 Resultados de la cocción del esmalte E-5.

Ciclo	Características	Muestras
C	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 100%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ No existe presencia de burbujas en la superficie de la placa. 	

Discusión de resultados

Se observa en la Tabla 3.37 que la superficie esmaltada presenta características óptimas, la cual se sometió a las pruebas de choque térmico y de impacto.

Tabla 3.38 Resultados de la cocción del esmalte E5-1.

Ciclo	Características	Muestras
C	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 97%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Discusión de resultados

En el esmalte E5-1 se cambió la materia prima, se sustituyó sulfato de magnesio por óxido de magnesio lo cual contribuyó a producir más fallas en la superficie

esmaltada. Se observa la Tabla 3.38 donde la falla que presenta esta placa son burbujas de gas que se forman en la cocción penetran en el esmalte y explotan en la superficie. En la mayoría de los casos, el problema se atribuye a la producción de CO₂ a partir de los carbonatos en el intervalo de temperatura entre 800°C y 900°C.

1.9.3. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.

1.9.3.1. Determinación de la temperatura de maduración.

Se determinó la temperatura de maduración de estos esmaltes tomando como base el esmalte E-6, donde las temperaturas de maduración son: 835°C, 845°C y 855°C, y el tiempo de maduración constante es de 9 minutos. En la Tabla 3.39 se presenta el ciclo de cocción de referencia.

Tabla 3.39 Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-6 (TM).

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 700	33
	700 - 700	5
	700 - TM	16
Maduración	TM - TM	9
Enfriamiento	TM - 650	50
	650 - 650	5
	650 - 20	300

TM = 835°C, 845°C y 855°C.

Tabla 3.40 Resultados de la cocción del esmalte E-6 con tiempo de maduración de 9 minutos.

Temperatura de Maduración (°C)	Características	Muestras
835	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 99%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	
845	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 99%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ No existe presencia burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	
855	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 97%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Discusión de Resultados

De acuerdo a las características presentadas en la Tabla 3.40 la temperatura que dan resultados óptimos es la de 845°C, con las cuales se trabajó posteriormente para la obtención del tiempo de maduración óptimo.

1.9.3.2. Determinación del tiempo de maduración.

Se determinó el tiempo de maduración trabajando a 5 y 15 minutos, para el esmalte E-6 con la temperatura de maduración de 845°C. En la Tabla 3.41 se presenta el ciclo de cocción de referencia para 845°C de temperatura de maduración.

Tabla 3.41 Ciclo de referencia para la cocción del esmalte E-6 (tm).

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 700	33
	700 - 700	5
	700 - 845	16
Maduración	845 – 845	tm
Enfriamiento	845 - 650	50
	650 - 650	5
	650 - 20	300

tm = 5 y 15 minutos.

Tabla 3.42 Resultados de la cocción del esmalte E-6 con temperatura de maduración de 845°C.

Tiempo de Maduración (min)	Características	Muestras
5	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 98%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Tabla 3.42 Continuación.

Tiempo de Maduración (min)	Características	Muestras
15	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 94%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa. ◆ Presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Discusión de Resultados

De acuerdo a las características presentadas en la Tabla 3.42 los tiempos de maduración de 5 y 15 minutos no son óptimos, por lo que se puede concluir que el ciclo de cocción óptimo consta de temperatura de maduración de 845°C y tiempo de maduración de 9 minutos (ciclo D), lo cual se observa en las Tablas 3.43 y el gráfico 3.4.

Tabla 3.43 Ciclo de cocción D.

Etapa de Cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Calentamiento	20 - 700	33
	700 - 700	5
	700 - 845	16
Maduración	845 - 845	9
Enfriamiento	845 - 650	50
	650 - 650	5
	650 - 20	300

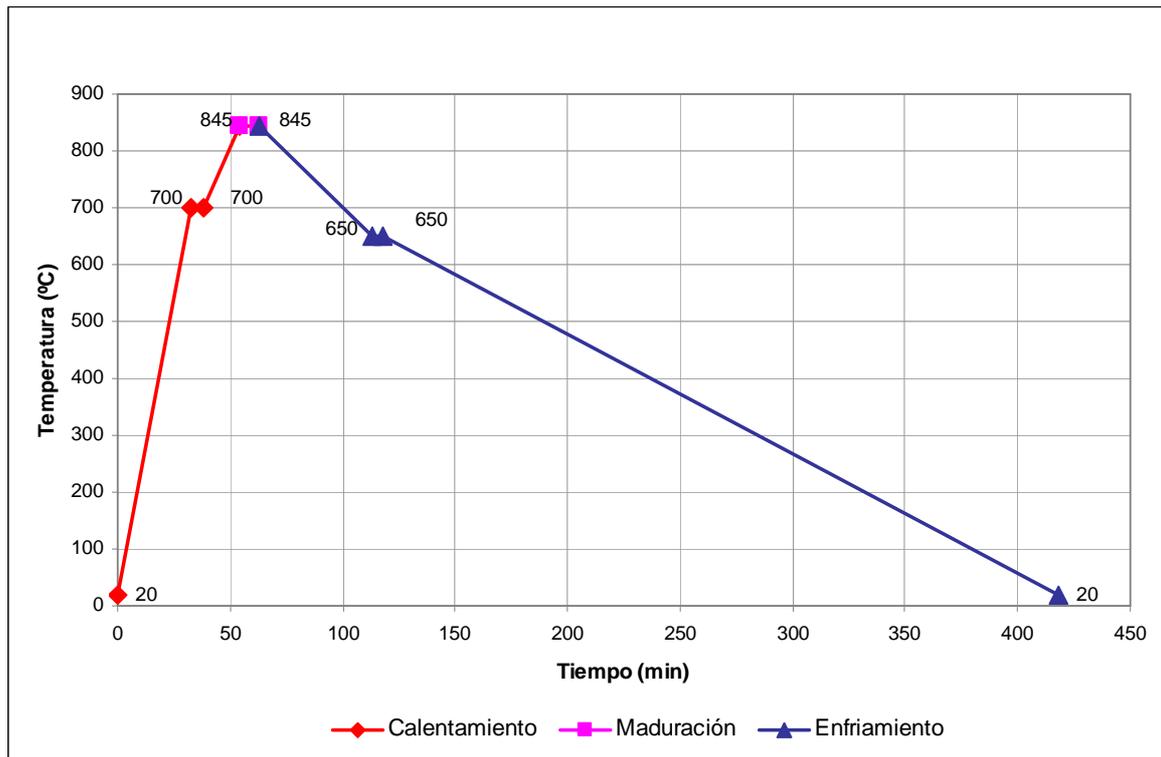


Figura 3.4 Ciclo de cocción D.

Conforme a los resultados obtenidos se eligió a la placa esmaltada con esmalte E-6 y cocido con el ciclo D, para someterlas a las pruebas de resistencia al choque térmico y al impacto.

1.9.3.3. Aplicación del ciclo de cocción D en los esmaltes E-7 y E-8.

Se procedió a aplicar el ciclo de cocción D a los esmaltes E-9 y E-10, donde las características se observan en las Tablas 3.44 y 3.45.

Tabla 3.44 Resultados de la cocción del esmalte E-7.

Ciclo	Características	Muestras
D	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 100%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico no uniforme, superficie rugosa y porosa. ◆ Presencia de muchas burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Discusión de resultados

Se observa en la Tabla 3.44 la falla que presenta esta placa se denomina hervido de esmalte por lo que el recubrimiento es de mala calidad.

Tabla 3.45 Resultados de la cocción del esmalte E-8.

Ciclo	Características	Muestras
D	<ul style="list-style-type: none"> ◆ El recubrimiento del esmalte porcelánico sobre la superficie de la placa es del 100%. ◆ Espesor del esmalte porcelánico uniforme, superficie lisa. ◆ No existe presencia de burbujas dispersas por toda la superficie de la placa. 	

Discusión de resultados

De acuerdo a los resultados que se observan en las Tablas 3.44 y 3.45 se eligió a la placa esmaltada con esmalte E-8 y cocido con el ciclo D, para someterla a las pruebas de resistencia al choque térmico y al impacto

1.10. EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO.

La resistencia al choque térmico que soporta un esmalte porcelánico que recubre la superficie de una pieza de acero, constituyen un parámetro mediante el que se determina la utilización del utensilio en procesos térmicos.

1.10.1. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.

En la Tabla 3.46 se reportan los resultados de las pruebas de resistencia al choque térmico de las superficies esmaltadas del esmalte porcelánico E-1.

Tabla 3.46 Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-1, ciclo de cocción A.

Número de Placa	Ciclo de Resistencia
1	11
2	11
3	11
4	11
5	11

Discusión de Resultados

Como se observa en la Tabla 3.46 las placas esmaltadas con E-1 sometido al ciclo de cocción A resiste muy bien la prueba de choque térmico, se puede determinar el promedio de las categorías de resistencia al choque térmico de las cinco placas recubiertas y tienen un valor de 11; es decir, soporta el choque térmico entre 440°C y 20°C.

Tabla 3.47 Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-1, ciclo de cocción B.

Número de Placa	Ciclo de Resistencia
1	11
2	11
3	11
4	11
5	11

Discusión de Resultados

Se observa en la Tabla 3.47 que las placas esmaltadas con E-1 bajo el ciclo de cocción B resiste muy bien la prueba de choque térmico, por tanto se puede determinar el promedio de las categorías de resistencia al choque térmico de las cinco placas recubiertas y tienen un valor de 11; es decir, soporta el choque térmico entre 440°C y 20°C.

Tabla 3.48 Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-2, ciclo de cocción A.

Número de Placa	Ciclo de Resistencia
1	10
2	11
3	10
4	11
5	10

Discusión de Resultados

Se observa en la Tabla 3.48 que las placas esmaltadas con E-2 con el ciclo de cocción A resisten muy bien la prueba de choque térmico, por tanto se puede determinar el promedio de las categorías de resistencia al choque térmico de las cinco placas recubiertas y tienen un valor de 10; es decir, soporta el choque térmico entre 413°C y 20°C.

1.10.2. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.

En la Tabla 3.49 se reportan las pruebas de resistencia al choque térmico de las superficies esmaltadas de los esmaltes porcelánicos E-4 y E-5.

Tabla 3.49 Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-4, ciclo de cocción C.

Número de Placa	Ciclo de Resistencia
1	10
2	10
3	11
4	10
5	11

Discusión de Resultados

Como se observa en la Tabla 3.49 las placas esmaltadas con E-4 resiste muy bien la prueba de choque térmico, se puede determinar el promedio de las categorías de resistencia al choque térmico de las cinco placas recubiertas y tienen un valor de 10; es decir, soporta el choque térmico entre 413°C y 20°C.

Tabla 3.50 Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-5, ciclo de cocción C.

Número de Placa	Ciclo de Resistencia
1	10
2	11
3	10
4	11
5	10

Discusión de Resultados

Como se observa en la Tabla 3.50 las placas esmaltadas con E-5 resiste muy bien la prueba de choque térmico, se puede determinar el promedio de las categorías de resistencia al choque térmico de las cinco placas recubiertas y tienen un valor de 10; es decir, soporta el choque térmico entre 413°C y 20°C.

1.10.3. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.

En la Tabla 3.51 se reportan las pruebas de resistencia al choque térmico de las superficies esmaltadas de los esmaltes porcelánicos E-6 y E-8.

Tabla 3.51 Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-6, ciclo de cocción D.

Número de Placa	Ciclo de Resistencia
1	9
2	11
3	10
4	10
5	10

Discusión de Resultados

Como se observa en la Tabla 3.51 las placas esmaltadas con el esmalte porcelánico E-6 resiste muy bien la prueba de choque térmico, se puede determinar el promedio de las categorías de resistencia al choque térmico de las cinco placas recubiertas y tienen un valor de 10; es decir, soporta el choque térmico entre 413°C y 20°C.

Tabla 3.52 Resistencia al Choque Térmico del esmalte E-8, ciclo de cocción D.

Número de Placa	Ciclo de Resistencia
1	10
2	9
3	10
4	11
5	11

Discusión de Resultados

Como se observa en la Tabla 3.52 las placas esmaltadas con el esmalte porcelánico E-8 resiste muy bien la prueba de choque térmico, se puede determinar el promedio de las categorías de resistencia al choque térmico de las cinco placas recubiertas y tienen un valor de 10,2; es decir, soporta el choque térmico entre 413°C y 20°C.

1.11. EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA AL IMPACTO.

El valor de la resistencia al impacto de un esmalte porcelánico permite determinar si la pieza con el recubierta puede o no ser utilizada en artículos que deben soportar golpes de diferente intensidad.

1.11.1. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO.

Se reportan en las Tablas 3.53, 3.54, 3.55 datos de los resultados de las pruebas de resistencia al impacto de los esmaltes porcelánicos E-1 y E-2 que recubren las placas de acero.

Altura = 1 m.

Pesos = 40,06; 66,81; 95,05 gramos.

Tabla 3.53 Resistencia al impacto del esmalte E-1, con el ciclo de cocción A.

Energía de Impacto (J)	Placa Inicial	Placa Impactada	Tipo de adherencia
0,393			4
0,655			4
0,933			4

Discusión de Resultados

A través de la comparación de los resultados obtenidos con los de la Figura A.1 que se observa en el anexo III, se determinó la adherencia de cada uno de los esmaltes. La huella del impacto que muestran las placas indica que las energías aplicadas no causan mayor deterioro en el esmalte, por lo tanto se concluye que el esmalte E1 con el ciclo de cocción A tiene una adherencia Excelente.

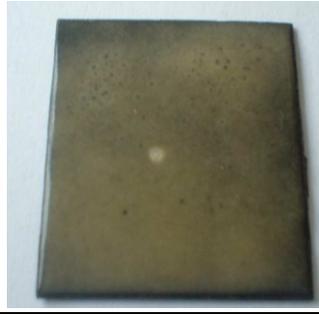
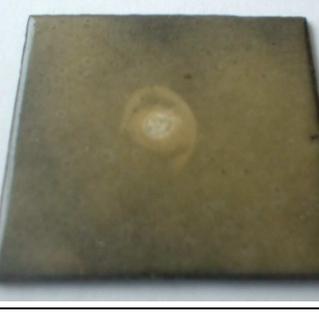
Tabla 3.54 Resistencia al impacto del esmalte E1, con el ciclo de cocción B.

Energía de Impacto	Placa Inicial	Placa Impactada	Tipo de adherencia
0,393			4
0,655			4
0,933			4

Discusión de Resultados

La huella del impacto que muestran las placas indica que las energías aplicadas no causan mayor deterioro en el esmalte, por lo tanto se concluye que el esmalte E1 con el ciclo de cocción B tiene una adherencia Excelente.

Tabla 3.55 Resistencia al impacto del esmalte E-2, con el ciclo de cocción A.

Energía de Impacto (J)	Placa Inicial	Placa Impactada	Tipo de adherencia
0,393			4
0,655			4
0,933			3

Discusión de Resultados

En la Tabla 3.55 se observa que la huella de la placa donde se aplicó la energía mayor, tiene una dimensión más grande por lo tanto el deterioro es mayor, de esta manera se concluye que el esmalte E-2 con el ciclo de cocción A tiene una adherencia Buena.

1.11.2. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE MAGNESIO.

Se reportan en las Tablas 3.56 y 3.57 datos de los resultados de las pruebas de resistencia al impacto de los esmaltes porcelánicos E-4 y E-5 que recubren las placas de acero.

Altura = 1 m.

Pesos = 40,06; 66,81; 95,05 gramos

Tabla 3.56 Resistencia al impacto del esmalte E-4, con el ciclo de cocción C.

Energía de Impacto (J)	Placa Inicial	Placa Impactada	Tipo de adherencia
0,393			4
0,655			4

Tabla 3.56 Continuación.

Energía de Impacto (J)	Placa Inicial	Placa Impactada	Tipo de adherencia
0,933			4

Discusión de Resultados

La huella del impacto que muestran las placas indica que las energías aplicadas no causan mayor deterioro en el esmalte, por lo tanto se concluye que el esmalte E-4 con el ciclo de cocción C tiene una adherencia Excelente.

Tabla 3.57 Resistencia al impacto del esmalte E-5, con el ciclo de cocción C.

Energía de Impacto (J)	Placa Inicial	Placa Impactada	Tipo de adherencia
0,393			4
0,655			4

Tabla 3.57 Continuación.

Energía de Impacto (J)	Placa Inicial	Placa Impactada	Tipo de adherencia
0,933			4

Discusión de Resultados

La huella del impacto que muestran las placas indica que las energías aplicadas no causan mayor deterioro en el esmalte, por lo tanto se concluye que el esmalte E-5 con el ciclo de cocción C tiene una adherencia Excelente.

1.11.3. DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS CON VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE NÍQUEL.

Se reportan en las Tablas 3.58 y 3.59 datos de los resultados de las pruebas de resistencia al impacto de los esmaltes porcelánicos E-6 y E-8 que recubren las placas de acero.

Altura = 1 m.

Pesos = 40,06; 66,81; 95,05 gramos

Tabla 3.58 Resistencia al impacto del esmalte E-6, con el ciclo de cocción D.

Energía de Impacto	Placa Inicial	Placa Impactada	Tipo de adherencia
0,393			4
0,655			4
0,933			3

Discusión de Resultados

En la Tabla 3.58 se observa que la huella de la placa donde se aplicó la energía mayor, tiene una dimensión más grande por lo tanto el deterioro es mayor, de esta manera se concluye que el esmalte E-6 con el ciclo de cocción D tiene una adherencia Buena.

Tabla 3.59 Resistencia al impacto del esmalte E-8, con el ciclo de cocción D.

Energía de Impacto	Placa Inicial	Placa Impactada	Tipo de adherencia
0,393			4
0,655			4
0,933			3

Discusión de Resultados

En la Tabla 3.59 se observa que la huella de la placa donde se aplicó la energía mayor, tiene una dimensión más grande por lo tanto el deterioro es mayor, de esta manera se concluye que el esmalte E-8 con el ciclo de cocción D tiene una adherencia Buena.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.12. CONCLUSIONES.

- Las superficies recubiertas con los esmaltes porcelánicos E-1, E-2, E-4, E-5, E-6 y E-8 no presentan defectos, tuvieron recubrimientos adecuados y superficies lisas de lo que se deduce que los ciclos A, B, C y D están correctamente diseñados.
- Del estudio realizado a los ciclos de cocción, se concluyó que los parámetros de temperatura y tiempo de maduración definen las características de las superficies esmaltadas. El ciclo A consta de temperatura de maduración de 840°C y tiempo de maduración de 10 minutos, el ciclo B de 850°C y de 10 minutos, el ciclo C de 840°C y de 8 minutos y el D de 845°C y de 9 minutos.
- De la aplicación de los ciclos de cocción A y B a los diferentes esmaltes, se concluyó que los esmaltes porcelánicos E-1 y E-2 presentan características óptimas de recubrimiento, uniformidad y no presencia de fallas.
- De la aplicación del ciclo de cocción C a los diferentes esmaltes, se concluyó que los esmaltes porcelánicos E-4 y E-5 presentan características óptimas de recubrimiento, uniformidad y no presencia de fallas.
- De la aplicación del ciclo de cocción D a los diferentes esmaltes, se concluyó que los esmaltes porcelánicos E-6 y E-8 presentan características óptimas de recubrimiento, uniformidad y no presencia de fallas.
- Las pruebas de choque térmico determinaron que el esmalte porcelánico E-1 tiene una excelente resistencia al cambio brusco de temperatura entre 440°C y

20°C, mientras que el esmalte porcelánico E-2 tiene una resistencia buena soporta cambios entre 413°C y 20°C.

- Las pruebas de resistencia al choque térmico determinó que los esmaltes porcelánicos E-4 y E-5 tiene una resistencia buena soporta temperaturas entre 413°C y 20°C.
- De acuerdo a las pruebas de choque térmico aplicadas a los esmaltes E-6 y E-8, se concluyó que éstos esmaltes soportan temperaturas entre 413°C y 20°C.
- Se concluyó mediante las pruebas de impacto que el esmalte porcelánico E-1 tiene una adherencia de 4 (excelente), mientras que el esmalte E-2 tiene una adherencia de 3 (buena).
- De acuerdo a las pruebas de impacto aplicadas a los esmaltes E-4 y E-5, se concluyó que estos esmaltes presentan una adherencia de 4 (excelente), por consiguiente la formulación de estos esmaltes es adecuada.
- Las pruebas de impacto aplicadas a los esmaltes E-6 y E-8, dan como resultado que la adherencia de estos esmaltes es de 3 (buena).

1.13. RECOMENDACIONES.

- Realizar estudios de los ciclos de cocción óptimos utilizando como base una formulación de la variación de los óxidos MO, en un equipo que permita programar el ciclo de cocción.
- Se recomienda estudiar el método de aplicación en húmedo en esmaltes de este tipo, útil para esmaltar superficies inclinadas o redondas.
- Estudiar la formulación de una segunda capa, teniendo como base los esmaltes E-1 y E-2.

BIBLIOGRAFÍA

1. López, T. y Martínez, A., 1995, "El vidriado en cerámica", 1era. Edición, Editorial Fondo de cultura Económica, México D.F., pp. 2, 3.
2. Kirk, R. y Othmer, D., 1962, "Enciclopedia de tecnología química", Vol. 7 y 4, 1era. Edición, Editorial Hispanoamericana, México, pp. 34-42, 252-258.
3. Askeland, D., 2001, "Ciencia e ingeniería de los materiales", Editorial Iberoamericano, Madrid España, p. 453.
4. Contreras, 2003, "Tratamiento de superficies metálicas - Esmaltes vitrificados", <http://html.esmaltes-vitrificados.html>, (Noviembre, 2008)
5. Rialp S.A., 1991, "Esmaltes, Arqueología", http://canalsocial.net/GER/ficha_GER.asp?id=7957&cat=historia, (Diciembre, 2008).
6. Pezzotti, M., 2009, "Aceros esmaltados para la arquitectura", http://www.constructalia.com/es_ES/news/actualidad_detalle.jsp?idDoc=3734964&idCat=117745, (Abril, 2009)
7. Vielhaber, L., 2002, "Tecnología de los esmaltes", Editorial Reverté S.A., Barcelona, España, pp. 19, 50, 51, 97.
8. Hevia, R., Centritto, N., Novaes, P., Bernerdín, A. y Durán, A., 2002, "Introducción a los esmaltes cerámicos", Editorial Litográfica Faenza, Madrid, España, pp. 48, 141, 165, 168-172.
9. Vásquez, E., 2005, "Materiales cerámicos, propiedades, aplicación y elaboración", Editorial UNAM, México D.F., México, pp. 56, 57, 61.

10. Paetsch, D., 1978, "Control de las materias primas cerámicas", Vol. 17, Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Madrid, España, p. 3.
11. Mora, G., 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, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pp. 24, 25.
12. Tipán, P., y Vizcaíno, C., 2008, "Estudio del efecto de la concentración del cobalto, manganeso o magnesio en la adherencia de esmaltes porcelánicos a superficies de acero", Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniera Química, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pp. 5, 6, 8, 15.
13. Morales, Y., 2005, "Tecnología de materiales cerámicos", Editorial Díaz de Santos, México D.F., México, pp. 130, 131, 135, 136.
14. Fuentes, R., Mejía, O., Caudillo, B. y De La Rosa, G., 2007, "Introducción a las pastas y esmaltes cerámicos", <http://química.ugto.mx/revista/9/PASTA%20Y%20ESMALTES.htm>, (Abril, 2009).
15. Estévez, I., 2008, "Influencia de la concentración de sulfato de níquel en la adherencia de esmaltes porcelánicos tipo capa base para recubrimiento de láminas de acero", Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniera Química, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pp. 1, 41-43, 51.
16. Singer, F., 1976, "Enciclopedia de la cerámica industrial", 1ra Edición, Editorial Urmo S.A., Bilbao, pp. 141, 630.
17. Mari, E., 1999, "Los materiales cerámicos", Editorial Alsima, Buenos Aires, Argentina, p.54.

18. Vicentiz, 1999, "Esmaltes cerámicos", <http://www.vicentiz.com>, (Abril, 2009)

19. Magol, 2001, "¿Qué es el vidriado vitrificado?", <http://www.magol.com.ar/Preguntas/4/principal.htm>, (Abril, 2009).

20. 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, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pp. 48-53.

21. Mejía, P, 2003, "Preparación de un esmalte opaco a partir de vidrio reciclado para recubrir cerámica roja", Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Químico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO I

FORMULACIÓN DE LOS ESMALTES PORCELÁNICOS

Tabla A.1 Materias primas utilizadas en la preparación de los esmaltes.

Materia Prima	Fórmula Molecular	Procedencia
Bórax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	MERCK
Ácido Bórico	H_3BO_3	MERCK
Sulfato de Níquel	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	MERCK
Sulfato de Magnesio	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Riedel De Haenag
Cuarzo	SiO_2	Misahualli
Carbonato de Potasio	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	BDH
Óxido de Calcio	CaO	MERCK
Vidrio		Desechos urbanos

Tabla A.2 Composición química del vidrio de desecho.

Componentes	Fórmula Molecular	Peso (g)	Peso (%)
Óxido de Silicio	SiO_2	71,35	68,13
Óxido de Aluminio	Al_2O_3	3,26	3,11
Óxido de Sodio	Na_2O	18,16	17,34
Óxido de Potasio	K_2O	0,96	0,92
Óxido de Calcio	CaO	10,54	10,06
Óxido de Magnesio	MgO	0,44	0,42
Óxido de Plomo (II)	PbO	0,022	0,02

(Mejía, 2003)

Tabla A.3 Fórmula Molecular del vidrio de desecho.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na_2O	0,584	Al_2O_3	0,064	SiO_2	2,367

K ₂ O	0,020		
CaO	0,375		
MgO	0,022		
PbO	1,9E-04		

(Mejía, 2003)

Tabla A.4 Fórmula molecular del esmalte E-7.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,605	Al ₂ O ₃	0,0523	SiO ₂	3,11
K ₂ O	0,016			B ₂ O ₃	0,62
CaO	0,308				
MgO	0,017				
NiO	0,052				

(Estévez, 2008)

Tabla A.5 Fórmula molecular del esmalte E-1.

Óxidos Básicos		Óxidos Anfóteros		Óxidos Ácidos	
Na ₂ O	0,48	Al ₂ O ₃	0,0466	SiO ₂	2,184
K ₂ O	0,04			B ₂ O ₃	0,526
CaO	0,32				
MgO	0,06				
NiO	0,10				

Cálculo de la dosificación de materias primas del esmalte porcelánico E-1

Ejemplo de Cálculo:

❖ Cálculo de la cantidad de vidrio.

Se tomó como base el Al_2O_3 de la fórmula molecular del vidrio.

$$0,0466 \text{ gmol Al}_2\text{O}_3 \frac{1 \text{ gmol vidrio}}{0,064 \text{ gmol Al}_2\text{O}_3} = 0,728 \text{ gmol vidrio}$$

❖ Cálculo de la cantidad de CaO en 0,728 gmol de vidrio.

$$0,728 \text{ gmol vidrio} \frac{0,375 \text{ gmol CaO}}{1 \text{ gmol vidrio}} = 0,273 \text{ gmol CaO}$$

Cantidad de CaO que falta = $0,32 \text{ gmol} - 0,273 \text{ gmol} = 0,047 \text{ gmol}$

Se introduce a la fórmula molecular los 0,047 gmol de CaO como materia prima.

$$0,728 \text{ gmol vidrio} \frac{0,02 \text{ gmol K}_2\text{O}}{1 \text{ gmol vidrio}} = 0,01456 \text{ gmol K}_2\text{O}$$

Cantidad de K_2O que falta = $0,04 \text{ gmol} - 0,01456 \text{ gmol} = 0,02544 \text{ gmol}$.

Se completa el K_2O con K_2CO_3 .



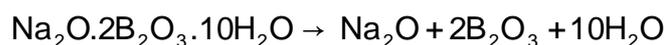
$$0,02544 \text{ gmol K}_2\text{O} \frac{1 \text{ gmol K}_2\text{CO}_3}{1 \text{ gmol K}_2\text{O}} = 0,02544 \text{ gmol K}_2\text{CO}_3$$

❖ Cálculo de la cantidad de Na_2O en 0,728 gmol de vidrio.

$$0,728 \text{ gmol vidrio} \frac{0,584 \text{ gmol Na}_2\text{O}}{1 \text{ gmol vidrio}} = 0,425 \text{ gmol Na}_2\text{O}$$

$$\text{Cantidad de Na}_2\text{O que falta} = 0,48 \text{ gmol} - 0,425 \text{ gmol} = 0,055 \text{ gmol}$$

Se completa la cantidad de Na₂O con bórax.



$$0,055 \text{ gmol Na}_2\text{O} \frac{1 \text{ gmol Bórax}}{1 \text{ gmol Na}_2\text{O}} = 0,055 \text{ gmol Bórax}$$

❖ Cálculo de la cantidad de MgO en 0,728 gmol de vidrio.

$$0,728 \text{ gmol vidrio} \frac{0,022 \text{ gmol MgO}}{1 \text{ gmol vidrio}} = 0,016 \text{ gmol MgO}$$

$$\text{Cantidad de MgO que falta} = 0,06 \text{ gmol} - 0,016 \text{ gmol} = 0,044 \text{ gmol}$$

Se completa la cantidad de MgO con MgSO₄.



$$0,044 \text{ gmol MgO} \frac{1 \text{ gmol MgSO}_4}{1 \text{ gmol MgO}} = 0,044 \text{ gmol MgSO}_4$$

❖ Cálculo de la cantidad de SiO₂ en 0,728 gmol de vidrio.

$$0,728 \text{ gmol vidrio} \frac{2,367 \text{ gmol SiO}_2}{1 \text{ gmol vidrio}} = 1,723 \text{ gmol SiO}_2$$

$$\text{Cantidad de SiO}_2 \text{ que falta} = 2,184 \text{ gmol} - 1,723 \text{ gmol} = 0,461 \text{ gmol}$$

Se completa la cantidad de SiO₂ con cuarzo.

Cuarzo = 0.461 gmol

❖ Cálculo de la cantidad de B₂O₃ en 0,728 gmol de vidrio.

$$0,055 \text{ gmol Bórax} \frac{2 \text{ gmol B}_2\text{O}_3}{1 \text{ gmol Bórax}} = 0,11 \text{ gmol B}_2\text{O}_3$$

Cantidad de B₂O₃ que sobra = 0,526 gmol – 0,11 gmol = 0,416 gmol

Se completa la cantidad de B₂O₃ con H₃BO₃.

$$0,416 \text{ gmol B}_2\text{O}_3 \frac{2 \text{ gmol H}_3\text{BO}_3}{1 \text{ gmol B}_2\text{O}_3} = 0,832 \text{ gmol H}_3\text{BO}_3$$

❖ Cálculo de la cantidad de NiO.



$$0,1 \text{ gmol NiO} \frac{1 \text{ gmol NiSO}_4}{1 \text{ gmol NiO}} = 0,1 \text{ gmol NiSO}_4$$

Tabla A.6 Dosificación de materias primas del esmalte E-1.

Materias Primas	Peso (mol)	PM (g/mol)	Peso (g)	Peso (%)
Vidrio	0,728	208,52	151,8	51,3
Bórax	0,055	381,28	20,97	7,09
Ácido Bórico	0,832	61,82	51,43	17,38
Cuarzo	0,461	60,06	27,69	9,36
Sulfato de Níquel	0,1	262,75	26,28	8,88
Sulfato de Magnesio	0,044	246,38	10,84	3,66
Carbonato de Potasio	0,0254	165,2	4,2	1,42
Óxido de Calcio	0,047	56,08	2,64	0,89
Total			295,85	

Para realizar la fritada de esmalte porcelánico se utiliza 40 g. de la mezcla de materias primas, para lo que multiplica a la dosificación de la Tabla A.6 por 0,4. Estos datos para los esmaltes se reporta en la Tabla A.7 y A.8.

Tabla A.7 Dosificación para 40 gramos de materias primas.

Materias Primas	Peso (g)				
	E-1	E-2	E2-1	E-3	E-4
Vidrio	20,52	21,58	21,64	17,84	20,35
Bórax	2,83	2,04	2,51	4,43	2,36
Ácido Bórico	6,952	7,51	7,48	5,47	7,036
Cuarzo	3,74	3,48	3,61	4,66	3,4
Sulfato de Níquel	3,55	2,09	3,68	3,37	4,98
Sulfato de Magnesio	1,46	2,86	0,48	3,64	1,32
Carbonato de Potasio	0,568	0,44	0,582	0,564	0,54
Óxido de Calcio	0,356				

Tabla A.8 Dosificación para 40 gramos de materias primas.

Materias Primas	Peso (g)				
	E-5	E5-1	E-6	E-7	E-8
Vidrio	20,36	21,31	20,4	20,56	17,82
Bórax	2,36	2,47	2,37	2,84	4,42
Ácido Bórico	7,036	7,36	7,052	6,96	5,46
Cuarzo	3,4	3,56	3,41	3,75	4,65
Sulfato de Níquel	4,15	4,34	2,77	2,13	4,37
Sulfato de Magnesio	2,132	0,365	3,43	2,804	2,69
Carbonato de Potasio	0,548	0,574	0,548	0,569	0,565

ANEXO II**CHOQUE TÉRMICO****Tabla A.17** Condiciones de ensayo del Choque Térmico

Número de Ciclo	Temperatura de la Mufla (°C)	Tiempo de Calentamiento (min)
1	245	3
2	260	8
3	275	8
4	287	8
5	301	8
6	315	8
7	329	8
8	357	8
9	385	8
10	413	8
11	440	8

(Carrillo, 2008)

ANEXO III

PRUEBAS DE RESISTENCIA AL IMPACTO



(Mora, 2008)

Figura A.1 Morfologías de adherencia por impacto de un cuerpo esférico sobre esmaltes porcelánicos.

Referencias sobre el tipo de adherencia:

- Adherencia mala = 0; el esmalte porcelánico se desprende de la placa.
- Adherencia media = 1; el impacto tiene forma de círculos concéntricos acentuados.
- Adherencia media = 2 el impacto tiene forma de círculos concéntricos medianamente acentuados.
- Adherencia buena = 3 el impacto no presenta círculos concéntricos.
- Adherencia excelente = 4 el impacto producido sobre la placa esmaltada tiene forma de una estrella.

Ejemplo de cálculo:

Pesos de las esferas metálicas:

Esfera 1 = 40,06 g.

Esfera 2 = 66,81 g.

Esfera 3 = 95,06 g.

$$\text{Energía} = m_b g h_L \quad [\text{A.1}]$$

donde:

m_b = masa de la esfera metálica, masa en Kg

g = constante de gravitacional, longitud/tiempo² en m/seg².

h_L = altura de lanzamiento, longitud en m.

$$\text{Energía} = (40,06 \times 10^{-3} \text{ Kg})(9,81 \text{ m/s}^2)(1 \text{ m}) = 0,393 \text{ J}$$

Tabla A.18 Energía aplicada a la prueba de Impacto.

Peso Esfera Metálica (Kg)	Energía (J)
40,06E-03	0,393
66,81E-03	0,655
95,06E-03	0,933