

Reutilización del vidrio de desecho para preparar esmaltes porcelánicos de primera capa

Luis Mera, Pedro Vásquez, Sandra Bolaños y Lorena Oscullo

Departamento de Ingeniería Química

Resumen

Según EMASEO, Quito genera alrededor de 42 t/día de vidrio de desecho. El vidrio es un material que prácticamente no se degrada en un largo período de tiempo. Las piezas fabricadas con acero, están expuestas a la acción química del medio ambiente, esto obliga a someterlas a algún proceso de protección. Uno de los métodos de protección de superficies de acero consiste en recubrirlas con una delgada capa de esmalte porcelánico. El esmalte porcelánico es un vidrio que se adhiere al metal y resiste a cambios de temperatura.

A través del presente proyecto, se prepararon esmaltes añadiendo al vidrio de desecho otras materias, se los aplicó se obtuvo la temperatura y el tiempo de maduración. Se logró una capa de esmalte porcelánico lisa, con espesor homogéneo, sin fallas, con excelentes resistencias a cambios de temperatura y al ataque del ácido cítrico en ebullición, muy buena resistencia al impacto y lista para la aplicación de la segunda capa.

Palabras claves: vidrio de desecho, esmalte porcelánico, adherencia, resistencias al cambio de temperatura, al impacto y al ácido cítrico.

Abstract

According to EMASEO, Quito generates 42 t/day of waste glass. Glass is a material which basically does not decompose in a long period of time. Moreover, the objects made of steel are exposed to the chemical action of the environment, due to this they need protection. One of the steel surfaces protection method consists in recover it with a thin layer of porcelain enamel, furthermore, the porcelain enamel is a glass that sticks to the metal and resists to the temperature changes.

Through the present project enamels were prepared adding to the waste glass other raw materials. They were applied over the steel surface and the time and temperature of cooking were got. Finally, porcelain enamel smooth were got, with a uniform layer, without faults, with excellent resistance to the temperature changes and the boiling citric acid action, good resistance to the impact and ready to the second layer application.

Keywords: waste glass, porcelain enamel, sticking, resistance to the temperature changes, to the impact and the citric acid action.

1 Introducción

1.1 Recubrimientos para la protección de acero

Generalidades. Uno de los materiales de ingeniería más utilizados es el acero al carbono, a pesar de su poca resistencia a la corrosión, se usa en grandes cantidades en aplicaciones marinas, energía nuclear, plantas de combustible fósil, transporte, procesos químicos, producción y refinación de petróleo, tuberías, equipos de construcción, procesamiento de metales, etc.

El problema de la corrosión del acero al carbono y en general de los metales es muy significativo en términos económicos y técnicos; se estima que, aproximadamente el 5% de los ingresos de una nación industrializada se

destina a la prevención de la corrosión así como al mantenimiento o cambio de productos defectuosos como resultado de las reacciones de degradación metálica.

Protección contra la corrosión de metales mediante recubrimientos. La ASTM define como revestimiento a una sustancia líquida, licuable, o masilla que se convierte en una capa delgada de un sólido protector, decorativo o funcional. Para proteger la superficie del acero contra la corrosión, se han desarrollado los siguientes métodos:

1. Hacer la superficie anódica por eliminación del cátodo (protección anódica).

2. Hacer la superficie catódica por eliminación del ánodo (protección catódica).
3. Aislar el ánodo y el cátodo del electrolito mediante protección con recubrimientos.
4. Adecuada selección de materiales.
5. Aplicación de principios de buen diseño.

Los revestimientos anticorrosivos se desarrollaron como una estrategia para utilizar metales o aleaciones poco resistentes a la corrosión y ofrecer la oportunidad de mejorar estéticamente un componente o estructura. Los sistemas de revestimientos son muy diversos y se aplican al sustrato a través de una variedad de técnicas. Los recubrimientos pueden clasificarse como:

1. Recubrimientos metálicos
2. Recubrimientos orgánicos
3. Recubrimientos inorgánicos

El revestimiento debe tener alto grado de adherencia al sustrato, lo que requiere un tratamiento previo a su aplicación.

Los metales, las cerámicas y los polímeros se utilizan como recubrimientos para acero y sus aleaciones.

La elección y la aplicación de un sistema de revestimiento depende de varias consideraciones; las más importantes son las siguientes:

1. La economía (costo por unidad de superficie o el número de piezas).
2. Evaluar las condiciones ambientales en las que el sustrato trabajará.
3. Aplicabilidad a un determinado sustrato.
4. Aplicabilidad de un determinado material de revestimiento.
5. Revestimiento vs. durabilidad.

Mecanismos de Protección de los revestimientos. Los sistemas de revestimientos se clasifican de acuerdo con el proceso por el cual protegen; se distinguen tres mecanismos y un ejemplo de cada uno de ellos se muestra en la figura 1.

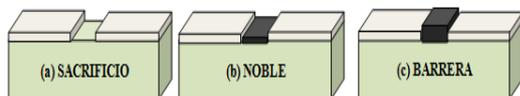


Figura 1. Mecanismos de protección

Recubrimientos de sacrificio: el revestimiento se corroe y no el sustrato de metal.

Revestimientos nobles : son más resistentes a la corrosión que el sustrato protegido.

Revestimientos de barrera: son principalmente no metálicos y no conductores. Su principal mecanismo de protección es separar el sustrato del medio ambiente corrosivo.

El éxito de un sistema de recubrimiento depende de la preparación de la superficie del sustrato.

Recubrimientos inorgánicos. Una de las características de los revestimientos cerámicos y esmaltes es su elevada resistencia a la oxidación y a la corrosión, frente a los diferentes agentes químicos, agua y a la mayoría de los climas.

El esmaltado porcelanizado tiene como objetivo fundamental proteger y mejorar la pieza, lo que se consigue mediante la aplicación de una o varias capas y su posterior vitrificación en horno.

Entre las técnicas de aplicación de esmaltes porcelánicos, se encuentran:

1. **Por aspersion térmica:** comprende un grupo de procesos por los cuales se recubre un sustrato con materiales de revestimiento fundidos, solidifican y se adhieren a la superficie. Las tecnologías usadas para calentar el revestimiento son la flama de oxígeno y gas combustible, el arco eléctrico y el arco de plasma.
2. **Procesos de deposición en fase vapor:** los procesos de deposición en fase vapor (VPD), tienen como objetivo depositar sobre el sustrato una película delgada del recubrimiento como vapor que luego se condensa en la superficie de la pieza. Pueden distinguirse dos familias dominantes de los procesos de deposición: los basados en fenómenos físicos de pulverización y evaporación y los fundamentados en reacciones químicas, los reactantes activados por calor reaccionan y el producto se deposita sobre el mismo sustrato.
3. **Por Inmersión:** las piezas cuya superficie se desea revestir son sumergidas en recipientes llamados cubas, que contienen suspensiones o el revestimiento en estado líquido.
4. **Electrostático:** este método es empleado en revestimientos orgánicos e inorgánicos pulverizados, los cuales se aplican como partículas sólidas y secas, luego se las funde en la superficie para formar una película líquida uniforme, la que al enfriarse forma el recubrimiento.

2 Materiales y métodos

2.1 Preparación del material vítreo

En la realización del proyecto se reutilizó el vidrio de botellas en las que antes se envasaron licores de producción ecuatoriana, de 750 cm³ de capacidad y 528,3 g de peso promedio.

Recolección. Las botellas de vidrio se las obtuvo en expendios de reciclaje de Quito.

Limpieza. Las etiquetas y los residuos se retiraron aplicando el siguiente procedimiento:

- Se mantuvo en agua durante un día y posteriormente se retiraron las etiquetas.
- Se sumergieron en una solución de detergente durante 2 horas, se las enjuagó con agua potable y se las secó al ambiente.

Trituración y pulverización del vidrio. El objetivo es obtener el vidrio a reutilizar con tamaño de partícula igual al de las otras materias primas del esmalte.

1. Tributación de botellas

Equipo: Estufa marca MEMMERT.

Materiales reactivos:

- Botellas de capacidad de 750 cm³, limpias y secas;
- pinza para crisoles;
- cubeta de plástico; y
- agua a temperatura ambiente.

Procedimientos:

- Se calienta cada una de las botellas hasta alcanzar más o menos los 200 °C.
- Se deja caer, la botella, en agua a temperatura ambiental con lo que se logra el vidrio con tamaño de partícula menor a 0,5 cm.

2. Pulverización

Equipo: BLEULER - MILL NAEF.

Materiales reactivos: Vidrio triturado.

Procedimientos:

- Se limpió el interior del molino para eliminar los residuos de otros minerales tratados y así evitar la contaminación del vidrio.
- Se colocaron, alrededor de 200g de vidrio triturado y se mantuvo en funcionamiento el equipo durante 2 minutos y se tamizó a través de la malla # 200 ASTM.
- El cuarzo utilizado, se presenta como arena por lo que únicamente fue pulverizado y tamizado.
- Las otras materias primas constituyen reactivos químicos importados, por lo que, antes de utilizarlos, se los tamizó.

2.2 Obtención del esmalte crudo

Para obtener un esmalte porcelánico crudo se siguieron los procesos que se describen a continuación:

Formulación del esmalte porcelánico. En el Laboratorio de producción de vidrio, antes de la presentación del presente Proyecto, se obtuvieron esmaltes porcelánicos de primera capa para recubrir superficies de acero, en la formulación de estos, se introdujeron como materias primas fuentes de los óxidos componentes del esmalte, reactivos químicos importados.

En la tabla 1 se reporta la fórmula molecular del esmalte (E - 1) que cumple con las características de uno de primera capa.

Tabla 1. Fórmula molecular del esmalte E - 1

| | | | |
|-------------------|------|-------------------------------|-------|
| Na ₂ O | 0.87 | SiO ₂ | 3.475 |
| MgO | 0.13 | B ₂ O ₃ | 1.368 |

La dosificación de las materias primas utilizadas para la obtención del esmalte E - 1, se reporta en la tabla 2.

Tabla 2. Dosificación de materias primas del esmalte E - 1

| Materia prima | % peso/peso |
|------------------|-------------|
| Cuarzo | 53 |
| Bórax | 35 |
| Sodio nitrato | 8 |
| Magnesio sulfato | 4 |

Mediante el presente Proyecto se logró reproducir, en un alto porcentaje, su composición química, utilizando como materia prima básica vidrio de desecho con las siguientes características:

Tabla 3. Composición química del vidrio de desecho

| Componente | % peso/peso |
|--------------------------------|-------------|
| SiO ₂ | 68.14 |
| Al ₂ O ₃ | 3.11 |
| CaO | 10.06 |
| MgO | 17.34 |
| Na ₂ O | 0.93 |
| K ₂ O | 0.42 |

Tabla 4. Fórmula molecular del vidrio de desecho

| | | | |
|-------------------|-------|--------------------------------|-------|
| Na ₂ O | 0.583 | Al ₂ O ₃ | 0.063 |
| K ₂ O | 0.021 | SiO ₂ | 2.367 |
| CaO | 0.375 | | |
| MgO | 0.021 | | |

Del análisis de los resultados reportados en las tablas 1 y 4, se observa que reproducir, a partir del vidrio de desecho, el esmalte E - 1, es imposible ya que esta materia prima posee componentes químicos que no están presentes en E - 1; sin embargo, mediante la adición de otras materias primas se formularon los esmaltes E - 2 y E - 3 cuyas características se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 5. Fórmula molecular del esmalte E - 2

| | | | | | |
|-------------------|------|--------------------------------|------|------------------|------|
| Na ₂ O | 0.62 | Al ₂ O ₃ | 0.05 | SiO ₂ | 2.49 |
| K ₂ O | 0.02 | B ₂ O ₃ | 0.98 | | |
| CaO | 0.27 | | | | |
| MgO | 0.09 | | | | |

Tabla 6. Dosificación de materias primas del esmalte E - 2

| Materia prima | % peso/peso |
|------------------|-------------|
| Ácido bórico | 19.21 |
| Bórax | 21.42 |
| Cuarzo | 13.31 |
| Magnesio sulfato | 5.26 |
| Vidrio | 40.8 |

Se preparó, para determinar el efecto de las materias primas, otro esmalte E - 2.

La dosificación de las materias primas fuentes de los óxidos componentes del nuevo esmalte porcelánico E - 2, se reporta en la tabla 7.

Tabla 7. Dosificación de materias primas del nuevo E - 2

| Materia prima | % peso/peso |
|-------------------|-------------|
| Ácido bórico | 20.10 |
| Bórax | 22.40 |
| Cuarzo | 13.92 |
| Óxido de magnesio | 4.39 |
| Vidrio | 42.67 |

Tabla 8. Fórmula molecular del esmalte E - 3

| | | | | | |
|-------------------|------|--------------------------------|------|-------------------------------|------|
| Na ₂ O | 0.43 | Al ₂ O ₃ | 0.06 | SiO ₂ | 1.93 |
| K ₂ O | 0.09 | | | B ₂ O ₃ | 0.58 |
| CaO | 0.26 | | | | |
| MgO | 0.09 | | | | |
| NiO | 0.15 | | | | |

Tabla 9. Dosificación de materias primas del E - 3

| Materia prima | % peso/peso |
|--------------------|-------------|
| Ácido bórico | 24.04 |
| Aluminio óxido | 0.56 |
| Bórax | 0.79 |
| Cuarzo | 5.96 |
| Magnesio carbonato | 5.26 |
| Níquel sulfato | 13.49 |
| Vidrio | 49.45 |

Atronado del esmalte crudo.

1. **Objetivo.** Crear fuerzas de tensión dentro de la red vítrea para que el posterior proceso de molienda se realice sin riesgos.

2. Equipos y materiales.

- Horno para atronar vidrio:
 - cámara: diámetro de 10 cm y altura 13 cm;
 - calentamiento: combustión de LGP;
 - máxima temperatura: 1100 °C.
- Crisol de material refractario:
 - diámetro en la base: 4 cm;
 - diámetro en la base: 5 cm;
 - altura: 6 cm.

3. Procedimiento

- Se inició la combustión y se regularon los flujos de aire y de combustible.
- Se depositó, dentro de la cámara del horno, el crisol con 40g de mezcla de materias primas.
- Se tapó la cámara del horno y se esperó que el proceso inicie.
- Se recoge el esmalte fundido en un recipiente de cobre lleno con agua fría.
- Se recupera el esmalte atronado, se lava y pesa.

2.3 Preparación de las piezas a esmaltar

Se cortaron piezas de acero de 3cm × 3cm

Objetivo. Eliminar la suciedad como grasa y el óxido de las placas de acero.

Materiales:

- Placas de acero de 3cm × 3cm;
- lija para metal número 240;
- bayeta de fibra sintética;
- papel absorbente;
- cápsula de porcelana; y
- cepillo con cerdas de hierro.

Reactivos:

- Ácido sulfúrico;
- hidróxido de sodio;
- bicarbonato de sodio;
- Hexametilentetramina;
- ácido clorhídrico 1 N; y
- agua destilada.

Procedimiento. Para determinar el tratamiento con mejores resultados, se probaron dos métodos de limpieza:

1. **Método de limpieza utilizado en una industria de electrodomésticos.** Se desengrasan las piezas mediante el tratamiento con una solución de hidróxido de sodio.

Se decapa el acero mediante el tratamiento con una solución de ácido sulfúrico.

Se neutraliza el exceso de ácido sulfúrico con una solución de bicarbonato de sodio.

Se secan las piezas y se las almacena en bolsas de plástico.

Las concentraciones de las soluciones y los tiempos de exposición de las placas en cada una de ellas se reportan en la tabla 10

Tabla 10. Preparación de las placas de acero

| Paso | Etapas | Solución | Concentración (% en peso) | T (°C) | t _{exposición} (min) |
|------|--------------|--------------------------------|---------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | Desengrasado | NaOH | 6.3 | 90 | 10 |
| 2 | Decapado | H ₂ SO ₄ | 6.8 | 65-70 | 5 |
| 3 | Neutralizado | Bicarbonato de sodio | 0.8 | 65-70 | 1 |
| 4 | Secado | Aire caliente | – | 100 | – |

2. Método aplicado en el Laboratorio de Termodinámica de la Escuela Politécnica Nacional

- **Limpieza mecánica de las placas.** Se lija y lava, simultáneamente, hasta que se obtiene la superficie metálica limpia y rugosa, de tal manera que se facilite la adherencia del esmalte crudo.

Se secan con papel absorbente.

- **Decapado.** Se prepara una solución con 3.5g de hexametilentetramina, 100cm³ de ácido clorhídrico 1N y se completa, con agua destilada, a 1L.

Se sumergen, las placas, en la solución durante 5 minutos.

Se retiran de la solución y se frotran con el cepillo bajo chorro de agua.

Se sumergen nuevamente, las placas, en la solución por 5 minutos más.

- **Lavado y secado.** Se introducen las placas en una cápsula de porcelana con agua destilada durante 10 minutos, se secan con papel absorbente y se almacenan en bolsas de plástico.

2.4 Esmaltado y cocción

Esmaltado de las piezas de acero

1. **Objetivo.** Recubrir las placas de acero, previamente preparadas, con esmalte porcelánico crudo.

2. **Equipos y materiales:**

- Balanza analítica;
- estufa eléctrica;
- tamíz con malla # 200 A.S.T.M.;
- base de cerámica refractaria.

3. **Procedimiento:**

- Se pesan 0,75g de esmalte crudo;
- se pesa la placa a esmaltarse;
- se fija la placa sobre la base de cerámica;
- se recubre una de las superficies de la placa, con el esmalte crudo mediante espolvoreo a través de la malla # 200;
- se pesa la placa recubierta con esmalte, se calienta la placa esmaltada por 1 hora a 110 °C.

Cocción del Esmalte

1. **Objetivo.** Calentar la pieza esmaltada, hasta la temperatura de maduración.

2. **Equipos y materiales:** horno Wise Therm programable y pinzas

3. **Procedimiento**

- **Determinación de la temperatura de maduración del esmalte (TM).** Se diseña un ciclo de cocción con rampa desde la temperatura ambiental hasta 300°C, otra hasta la temperatura de maduración. En el enfriamiento rampa desde la temperatura de maduración hasta 700°C, otra hasta la temperatura ambiental. Se cuecen placas probando el ciclo con la temperatura de maduración variable.

Las temperaturas de maduración aplicadas son: 800°C, 820°C, 850°C, 870°C y 900°C.

El tiempo de maduración, en todos los ciclos aplicados, es de 10min.

La definición de la temperatura de maduración se la realiza a través de la evaluación de los resultados de las pruebas de cocción mediante la determinación de los siguientes parámetros:

1. Área recubierta
2. Homogeneidad de la capa de esmalte
3. Ausencia de fallas.

- **Determinación del tiempo de maduración del esmalte (tM).** Se cuecen placas probando el ciclo con la temperatura de maduración ya definida .

Los tiempos de maduración aplicadas son: 5min, 10min y 15min.

La definición del tiempo de maduración se la realizó a través de la evaluación de los mismos parámetros utilizados en la determinación de la temperatura de maduración.

Determinación de la calidad del esmaltado La calidad de la superficie vítrea lograda se la determinó mediante la evaluación de las resistencias al choque térmico, al impacto y al ácido cítrico en ebullición.

1. **Determinación de la resistencia al choque térmico**

Objetivo. Evaluar la resistencia al cambio brusco de la temperatura de la pieza esmaltada.

Equipos y materiales:

- Mufla;

- termostato con una base metálica a 2,54 cm bajo la superficie del baño;
- cronómetro;
- esponja;
- plancha de cerámica refractaria.

Procedimiento.

- Las pruebas se las realiza a través de un método diseñado en el laboratorio siguiendo la norma ASTM C 385.
- Se analizaron 5 placas esmaltadas.
- El agua del termostato se mantiene a 210°C.
- La primera prueba se la realizó con la mufla a 245°C.
- Se introducen las 5 muestras, en la cámara de la mufla y se la mantiene allí por 3 minutos.
- Se sacan las placas de la mufla y se las dejar caer en el agua del baño termostático.
- Se evalúa el efecto de la prueba sobre la calidad de la superficie esmaltada
- Los pasos antes realizados constituye el ciclo número 1
- Las muestras analizadas no presentaron ninguna falla como efecto del choque térmico aplicado; por lo que, pasaron al ciclo número 2 y se repitieron los procedimientos, según los ciclos reportados en la tabla 11, hasta observar algún efecto superficial.

Tabla 11. Ciclos térmicos según norma ASTM C385, 2002

| Ciclo N° | Temperatura de mufla °C | Tiempo dentro de la mufla (min) |
|----------|-------------------------|---------------------------------|
| 1 | 245 ± 5,5 | 3 |
| 2 | 260 ± 5,5 | 8 |
| 3 | 275 ± 5,5 | 8 |
| 4 | 287 ± 5,5 | 8 |
| 5 | 301 ± 5,5 | 8 |
| 6 | 315 ± 5,5 | 8 |
| 7 | 329 ± 5,5 | 8 |
| 8 | 357 ± 5,5 | 8 |
| 9 | 385 ± 5,5 | 8 |
| 10 | 413 ± 5,5 | 8 |
| 11 | 440 ± 5,5 | 8 |

2. Determinación de la resistencia al impacto

Objetivo. Determinar el grado de adherencia que se ha logrado, luego del proceso de cocción, entre la superficie de acero y el esmalte de primera capa. F

Equipo: "Impactómetro" construido en el Laboratorio de producción de vidrio, consta de un tubo de plástico fijado sobre una base de madera y esferas de acero.

Procedimiento.

- Las pruebas se las realiza a través de un método diseñado en el laboratorio siguiendo la norma ASTM B 219.

- Se fija la placa, sobre la base de madera, con la superficie esmaltada hacia la una boca del tubo de plástico.
- Se fija la esfera de acero a una altura definida.
- Se deja caer la esfera de acero sobre la superficie esmaltada.
- Se evalúa el efecto del impacto de la esfera sobre el esmalte.
- Condiciones de la prueba:
 Altura de caída: 1,15m,
 peso de la esfera: 95g.

Evaluación: El grado de la adherencia se determina de acuerdo al siguiente cuadro:

- 0 : el esmalte se desprende
- 1 : aparecen círculos acentuados
- 2 : aparecen círculos medianamente acentuados
- 3 : no aparecen círculos
- 4 : ligera cuarteadura en forma de estrella

3. Determinación de la resistencia al ácido cítrico en ebullición

Objetivo. Determinar la cantidad, en peso, de esmalte que se pierde como producto del ataque del ácido cítrico en ebullición.

Reactivos: Ácido cítrico, solución al 6 % en peso.

Equipos:

- Balanza analítica;
- balón de vidrio de 250cm³ con refrigerante;
- desecador;
- estufa;
- manta de calentamiento.

Procedimiento.

- Las pruebas se las realiza a través de un método diseñado en el laboratorio siguiendo la norma ASTM C 283.
- Se lavan y secan las muestras a analizar.
- Se pesan (W1) y se colocan dentro del balón.
- Se vierten 150cm³ de la solución de ácido cítrico.
- Se acopla el refrigerante a la boca del balón.
- Se calienta la solución y se la mantiene a ebullición por 2.5 horas.
- Se retiran las muestras, lava, seca y pesa (W2).

Evaluación: se determina la cantidad de esmalte que se ha disuelto.

3 Resultados

3.1 Obtención del esmalte crudo

Atronado del esmalte crudo

- 1. Tiempo de duración del proceso total:** aproximadamente 2 horas.

2. Rendimiento del proceso:

- Con la mezcla de materias primas reportada en la tabla 6:

Peso de la mezcla: 40g
 Peso teórico de esmalte atronado: 30.82g
 Peso real de esmalte atronado: 22.83g
 Rendimiento: 74.07%

- Con la mezcla de materias primas reportada en la tabla 7:

Peso de la mezcla: 40g
 Peso teórico de esmalte atronado: 32.26g
 Peso real de esmalte atronado: 26.12g
 Rendimiento: 80.97%

3. Pruebas preliminares de cocción de las placas esmaltadas

- Con la mezcla de materias primas reportada en la tabla 6:

Superficie recubierta aproximadamente el 80 %
 Espesor de la capa de esmalte no homogénea
 Presencia de cráteres, no formación total de la fase vítrea

- Con la mezcla de materias primas reportada en la tabla N° 7:

Superficie recubierta aproximadamente el 95 %
 Espesor de la capa de esmalte no homogénea
 Presencia de cráteres y piel de naranja

Del análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de cocción se decide continuar trabajando con el esmalte obtenido a partir de las materias primas reportadas en la tabla 7.

3.2 Preparación de las piezas a esmaltar

Método de limpieza utilizado en una industria de electrodomésticos. Las placas presentaron coloración amarillenta y ausencia de brillo metálico.

Método aplicado en el Laboratorio de Termodinámica de la Escuela Politécnica Nacional. Las placas presentaron una superficie limpia, con brillo metálico y con rugosidad adecuada. Además, permanecieron alrededor de 2 meses sin ser afectadas por la corrosión; por lo tanto, se concluye que, el proceso aplicado en el Laboratorio de Termodinámica es el más efectivo.

3.3 Esmaltado y cocción

Esmaltado de las piezas de acero. Se logró una capa con espesor homogéneo y recubriendo toda la superficie.

Cantidad del esmalte aplicado:

- Peso de la placa: 5,0886 g

- Peso de la placa mas esmalte: 5,7912 g

- Peso del esmalte: 0,7026 g

Cocción del esmalte Los ciclos de cocción que mejores resultados presentaron con cada esmalte, se reportan en la tabla 12.

Tabla 12. Ciclos de cocción óptimos

| Ciclo | Esmalte |
|---|---------|
| $T_M = 850^\circ\text{C}$ $T_M = 10 \text{ MIN}$ | E - 2 |
| $T_M = 820^\circ\text{C}$ $T_M = 10 \text{ MIN}$ | E - 3 |

El ciclo completo aplicado al esmalte E - 3, se reporta en la figura 2.

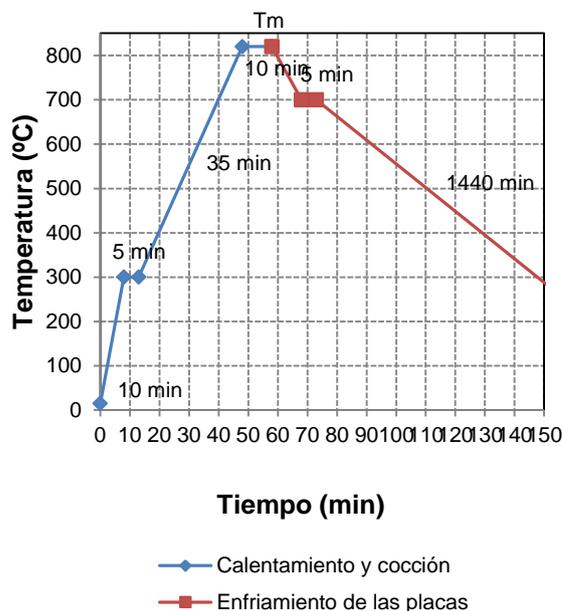


Figura 2. Ciclo de cocción del esmalte E-3

3.4 Calidad del esmalte logrado

Determinación de la resistencia al choque térmico

Tabla 13. Resultados de resistencia al choque térmico

| Ciclo | Esmalte |
|-------|---------|
| 11 | E - 2 |
| 11 | E - 3 |

Determinación de la resistencia al impacto

Tabla 14. Resultados de resistencia al impacto

| Adherencia | Esmalte |
|------------|---------|
| 3 | E - 2 |
| 4 | E - 3 |

Determinación de la resistencia al ataque del ácido cítrico

Tabla 15. Resultados de resistencia al ácido cítrico en ebullición

| Pérdida de peso | Esmalte |
|-----------------------|---------|
| 7.9mg/cm ² | E - 2 |
| 7.7mg/cm ² | E - 3 |

4 Conclusiones

1. Se han formulado 2 esmaltes porcelánicos de primera capa compatibles con el acero, para su preparación se utilizó vidrio de desecho en cantidades correspondientes al 42,67% y 49,45% demostrándose la factibilidad de su reutilización en la protección de estos artículos.
2. Los ciclos de cocción que permitieron obtener superficies totalmente recubiertas con capas de esmalte de espesor homogéneo y sin fallas detectables por el ojo humano, deben tener 2 rampas tanto en la zona de calentamiento como en la de enfriamiento. El esmalte que contiene níquel presenta su temperatura de maduración igual a 820 °C y el que contiene magnesio de 850 °C.
3. El níquel provocó mejor adherencia entre el esmalte y la superficie de acero que el magnesio, lo que se observa en los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia al impacto.
4. La compatibilidad entre el esmalte y el acero, permiten, a las piezas esmaltadas, soportar choques térmicos con gradiente de temperatura entre 440°C y 210°C.
5. La resistencia al ataque del ácido cítrico en ebullición de los dos esmaltes E - 2 y E - 3, son similares y están dentro de un rango aceptable, lo que podría ser, entre otros factores, el resultado de la estabilidad de la red vítrea.
6. La utilización de vidrio de desecho ha permitido obtener esmaltes porcelánicos con baja temperatura de maduración, lo que no es posible con minerales no metálicos, esto permite concluir que: la formulación de los esmaltes de segunda capa debe necesariamente contener el mismo vidrio de desecho. La preparación de pigmentos que deben utilizarse en estos esmaltes, también debe prepararse tomando como base el vidrio de desecho y también el material en referencia puede ser utilizado, en otros campos, como sustancia fundente, estas constituyen algunas de las ramificaciones que se pueden lograr del proyecto semilla.

Referencias

- [1] Baldwin, C. y Poplar, T., 2007, "Metallic looks that last", *Materials Engineering*, September, 106.
- [2] British Glass Manufactures' Confederation, 2007, "Glass Sustainability Report 2007", <http://www.britglass.org.uk/Files/GlassSustainabilityReportlores>, (10, Junio, 2009).
- [3] British Glass Manufactures' Confederation, 2007, "Glass recycling counts", <http://www.britglass.org.uk/Files/Recycling/GlassRecCounts.pdf>, (10, Junio, 2009).
- [4] British Glass Manufactures' Confederation, 2008, "Glass recycling-Life cycle analysis", http://www.britglass.org.uk/Files/Recycling/Life_cycle_analysis_finalpdf.pdf, (10, Junio, 2009).
- [5] Centritto, N., 2002, "Aplicación de los esmaltes", en Durán, A. y Hevia, R., "Introducción a los esmaltes cerámicos", CYTED (Red Iberoamericana sobre ciencia y tecnología) y Faenza Editrice Ibérica S.L, Faenza, Italia, pp. 57, 58, 64 - 67.
- [6] Dallin, G. y Lynch, R., 2006, "Comité A05 de los Productos de Hierro y Acero con Revestimiento Metálico", <http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/Q206/q206aprdallyn.html>, (15, Junio, 2009).
- [7] Dallin, G. y Lynch, R., 2006, "Cómo protegen los revestimientos metálicos al acero", <http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/Q206/q206aprdallynside.html>, (15, Junio, 2009).
- [8] ECOVIDRIO (SOCIEDAD ECOLÓGICA PARA EL RECICLADO DE LOS ENVASES DE VIDRIO), 2001, "ECOVIDRIO y la prevención, informe de prevención de envases y embalajes", www.recicla vidrio.com, www.ecovidrio.com, (15, Mayo, 2009).
- [9] EUROCORR'96, 1996, "Organic and Inorganic Coatings for Corrosion Prevention: research and experiences: papers from EUROCORR'96", The Institute of Materials for the European Federation of Corrosion, London, Great Britain, pp. 320-336.
- [10] Martínez Gualdrón, J., 2007, "El reciclaje. La forma más fácil de mantener nuestro planeta vivo", <http://www.gestiopolis.com/administracion-estrategia/reciclaje-fundamental-para-la-sostenibilidad-ambiental.htm>, (1, Junio, 2009).
- [11] Martínez, L., 2000, "El reciclaje del vidrio", http://www.internatura.org/estudios/reciclar/r_vidrio.html, (1, Junio, 2009).
- [12] Reviol, 2009, "Defectos de las piezas terminadas y posibles soluciones", <http://www.reviol.com.co/ferrodefectos.pdf>, (1, Julio, 2009).
- [13] Textos científicos, 2006, "Recubrimientos para mejorar la resistencia a la corrosión", <http://www.textoscientificos.com>.

com/quimica/ceramicasavanzadas/
recubrimientos-corrosion, (15, Junio, 2006).

Editorial Reverté S. A., Barcelona, España, pp. 1-3,
7, 11-13, 20-24, 28-36, 39-41, 53, 54, 59, 60, 77, 113-
117, 136, 137.

[14] Vielhaber, L., 2002, "Tecnología de los esmaltes",