

# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ESMALTADO INSENSIBLE A LAS VARIACIONES DE VISCOSIDAD DEL ESMALTE

G. Mallol<sup>(1)</sup>, J. Boix<sup>(1)</sup>, D. Llorens<sup>(1)</sup>, Y. Bautista<sup>(1)</sup>, M. D. Rodrigo<sup>(2)</sup>, F. Font

<sup>(1)</sup> Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)  
Universitat Jaume I. Castellón. España.

<sup>(2)</sup> Departamento de Ingeniería Química. Universitat Jaume I. Castellón. España.

Palabras clave: campana, esmaltado, tonalidades, viscosidad

## RESUMEN

En este trabajo se presenta un nuevo sistema de alimentación de esmalte para aplicación por campana insensible a las variaciones de viscosidad del esmalte. En una primera parte del trabajo se han descrito las ecuaciones que explican el comportamiento de un sistema de alimentación de esmalte con el fin de conocer las causas por las cuales los sistemas convencionales de alimentación son sensibles a las variaciones de viscosidad.

En una segunda parte, basándose en los conceptos teóricos previamente analizados, se ha construido un prototipo de alimentador de esmalte, objeto de patente [1], cuya forma constructiva lo hace insensible a las variaciones de viscosidad del esmalte. Para comprobar el buen funcionamiento del prototipo desarrollado se ha ensayado su comportamiento en condiciones piloto e industriales.

## 1 INTRODUCCIÓN

Uno de los defectos más comunes en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas y que conduce a una importante pérdida de calidad del producto final es la falta de homogeneidad de color entre piezas de un mismo modelo. Numerosos estudios [2][3][4][5] han puesto de manifiesto que el origen de este defecto se encuentra, por un lado, en la falta de estabilidad en las propiedades físico-químicas de los materiales que intervienen en el proceso de decoración (soporte, engobes, esmaltes, tintas, etc.) y, por otro lado, en el inadecuado desarrollo de las etapas que constituyen el proceso de fabricación: aplicación del engobe y del esmalte, decoraciones y cocción, fundamentalmente.

En la actualidad, los sistemas de aplicación de esmalte por campana son ampliamente utilizados en el sector de fabricación de baldosas cerámicas. A pesar de que en los últimos años el uso de sistemas de aplicación por cortina o “filera” se ha extendido considerablemente, existe todavía un gran número de fabricantes que utilizan las campanas en las aplicaciones de engobes y esmaltes, dado que su coste es sensiblemente inferior al de las “fileras”.

Gran parte de los defectos asociados a una falta de homogeneidad de color entre piezas son debidos a los cambios de caudal de descarga [6] que experimentan los sistemas convencionales de alimentación de esmalte para aplicación por campana como consecuencia de las variaciones de viscosidad que sufre el esmalte contenido en los depósitos de agitación y bombeo. Dichas variaciones de viscosidad, debidas principalmente a los cambios de temperatura que experimenta el esmalte por efecto de la agitación y de las fluctuaciones de la temperatura ambiente, provocan una variación importante de la cantidad de esmalte aplicado sobre las piezas cerámicas, habitualmente denominada “gramaje”, lo cual origina diferencias de color en el producto final. Como se demostrará a continuación, los cambios de viscosidad originan variaciones en el caudal de descarga al modificarse las pérdidas de energía mecánica que experimenta el esmalte a su paso por el alimentador.

La mayor parte de los sistemas de alimentación de esmalte para su aplicación por campana, utilizados actualmente, están constituidos por un conducto metálico en cuyo interior el esmalte, alimentado por la parte superior mediante un sistema de bombeo, alcanza una altura constante gracias a un sistema de rebose, el cual puede adoptar diferentes formas constructivas dependiendo del fabricante. La parte inferior de este conducto está

dotada de una tobera troncocónica en cuyo extremo inferior se sitúa una válvula que permite regular de forma manual el caudal de esmalte que cae sobre la campana y, de esta forma, modificar la cantidad de esmalte aplicado sobre las piezas. Inmediatamente después de esta válvula existe un tramo recto de conducción, con el mismo diámetro que el diámetro de salida de la válvula, y al final del mismo, se sitúa una boquilla de diámetro constante a través de la cual la suspensión de esmalte fluye sobre la campana.

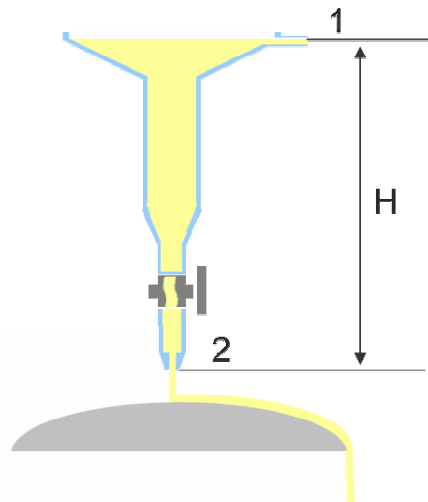
El método de control utilizado para corregir las variaciones del caudal de esmalte consiste en realizar medidas manuales y periódicas (cada media hora, en el mejor de los casos) del “gramaje” aplicado sobre una placa metálica de control que se hace pasar a través de la cortina de esmalte creada por la campana, de manera que, cuando la cantidad de esmalte medida se desvía de los valores de consigna prefijados, el operario actúa modificando la posición de la válvula para aumentar o disminuir el caudal de esmalte aplicado. Esta forma de operar, dada su periodicidad, no garantiza la estabilidad de la cantidad de esmalte aplicado, lo cual origina defectos asociados a una falta de homogeneidad del color en el producto final.

## 2 OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un nuevo sistema de alimentación de esmalte para aplicación por campana que, a diferencia de los convencionales, fuese insensible a los cambios de viscosidad del esmalte, permitiendo, de este modo, asegurar una constancia de la cantidad de esmalte aplicado y reducir los defectos asociados a las variaciones de viscosidad.

## 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS: BALANCES DE ENERGÍA MECÁNICA

Para explicar el comportamiento de los sistemas de alimentación de esmalte frente a las variaciones de la viscosidad es interesante utilizar los balances de energía mecánica. La ecuación 1 representa el balance completo de energía mecánica en régimen estacionario de un fluido incompresible y newtoniano [7] entre la entrada (1) y la salida (2) de un sistema de alimentación de esmalte genérico como el que se muestra en el esquema de la figura 1.



**Figura 1.** Esquema de un sistema de alimentación de esmalte genérico al cual se aplica un balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 2.

Ecuación 1

$$\frac{v_2^2}{2\alpha_2} - \frac{v_1^2}{2\alpha_1} + g(z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \Delta F = W$$

siendo:

- $v_i$  : velocidad del fluido en la sección de entrada ( $i=1$ ) o de salida ( $i=2$ ) del sistema (m/s)
- $z_i$  : altura de la sección de entrada ( $i=1$ ) o de salida ( $i=2$ ) del sistema (m)
- $g$  : aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
- $p_i$  : presión del fluido en la sección de entrada ( $i=1$ ) o de salida ( $i=2$ ) del sistema ( $N/m^2$ )
- $\rho$  : densidad del líquido o suspensión ( $kg/m^3$ )

- $\Delta F$ : pérdida de energía mecánica del fluido por fricción a lo largo de todo el sistema (J/kg)
- $W$ : trabajo realizado por fuerzas externas (J/kg)
- $\alpha_1$ : parámetro de corrección que tiene en cuenta las variaciones de velocidad en el sentido radial permitiendo usar la velocidad media del fluido en los cálculos ( $\alpha = 1$ , régimen turbulento, y  $\alpha = 0,5$ , régimen laminar)

La ecuación 1 puede transformarse en la ecuación 2, teniendo en cuenta las simplificaciones que a continuación se describen:

- la velocidad a la entrada del sistema ( $v_1$ ) es mucho menor que la velocidad a la salida del mismo ( $v_2$ ), ya que la sección de entrada del sistema es mucho mayor que la sección de salida
- la diferencia ( $z_2 - z_1$ ) es igual a la altura de la columna de líquido en el interior del sistema con signo negativo (-H)
- la presión a la entrada ( $p_1$ ) y a la salida del sistema ( $p_2$ ) es la misma e igual a la presión atmosférica al estar descargándose el líquido al ambiente y estar la parte superior de la columna de líquido en contacto directo con la atmósfera
- el trabajo realizado por fuerzas externas es nulo, ya que el líquido fluye exclusivamente por efecto de la acción de la gravedad

**Ecuación 2**

$$\frac{v_2^2}{2\alpha_2} - gH + \Delta F = 0$$

La ecuación 2, correspondiente al balance simplificado de energía mecánica de un dispositivo genérico de alimentación de esmalte, relaciona la velocidad de descarga del líquido con la altura del mismo y la pérdida de energía mecánica experimentada por fricción.

Experimentalmente se ha podido comprobar que, para un sistema con las características del estudiado y para las propiedades reológicas de los esmaltes, el número de Reynolds es inferior a 2100 en cualquier punto del sistema, lo cual indica que el régimen de circulación es completamente laminar. Teniendo en cuenta que el parámetro  $\alpha_2$  adopta un valor de 0,5 en régimen de circulación laminar, la velocidad de descarga del fluido puede calcularse haciendo uso de la ecuación correspondiente al balance de energía mecánica, que toma la forma de la ecuación 3.

**Ecuación 3**

$$v_2 = \sqrt{gH - \Delta F}$$

Como puede comprobarse, según la ecuación 3, la velocidad de descarga de esmalte depende exclusivamente de la altura de la columna de esmalte y de la pérdida de energía mecánica experimentada por este en su recorrido a lo largo del sistema de alimentación.

La ecuación 4, conocida como ecuación de Poiseuille, permite calcular las pérdidas por fricción experimentadas irreversiblemente por un fluido circulando en régimen laminar, siendo  $\mu$  la viscosidad del fluido, L la longitud de la conducción, v la velocidad del fluido,  $\rho$  la densidad del fluido y D el diámetro de la conducción.

**Ecuación 4**

$$\Delta F = \frac{32\mu Lv}{\rho D^2}$$

Estas pérdidas de energía mecánica se deben a dos factores distintos. Por un lado, al rozamiento o fricción del fluido con las paredes interiores del sistema por el que circula. Y por otro lado, a los rozamientos originados por los cambios de geometría del sistema, o modificaciones de la vena fluida, originadas por la presencia en las conducciones de una serie de accidentes tales como válvulas, dispositivos de medida, codos u otros accesorios. De acuerdo con esto, la pérdida de energía mecánica se calcula como la suma de las pérdidas por fricción de los tramos rectos del sistema y de las pérdidas de energía mecánica en todos los accidentes del sistema, en el cálculo de las cuales se utiliza la conocida como longitud equivalente del accidente. La longitud equivalente de un accidente es la longitud de tramo recto de conducción de un diámetro determinado, que originaría la misma pérdida de carga que dicho accidente.

Del análisis de la ecuación 3 y de la ecuación 4 se deduce que si la pérdida de energía mecánica del sistema,  $\Delta F$ , es tan baja que puede considerarse despreciable respecto al producto de la aceleración de la gravedad por la altura,  $gH$ , la velocidad del esmalte a la salida del alimentador,  $v_2$ , únicamente depende de la altura de la columna, H, ya que la ecuación 3 quedaría como:

Ecuación 5

$$v_2 = \sqrt{gH}$$

Por lo tanto, de acuerdo con la ecuación 5, la cantidad de esmalte que se aplicaría utilizando un sistema de alimentación diseñado de manera tal que la pérdida de carga,  $\Delta F$ , experimentada por el esmalte fuese muy baja, dependería exclusivamente de la altura del rebose,  $H$ , siendo independiente de la viscosidad del esmalte.

#### 4 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DESARROLLADO

Basándose en los fundamentos físicos expuestos en el apartado 3 se desarrolló un prototipo de alimentador de esmalte cuya forma constructiva minimizase las variaciones de la velocidad de descarga debidas a los cambios de viscosidad del esmalte.

La principal restricción que debía cumplir el diseño del prototipo era no contener la válvula existente en la mayor parte de los sistemas convencionales, o cualquier otro accidente que provocase unas pérdidas de energía mecánica elevadas y, por consiguiente, variaciones importantes del caudal de descarga con la viscosidad. Así pues, a priori, se supuso que la forma constructiva con menos pérdidas de energía mecánica asociadas sería aquella en la que el paso de esmalte únicamente se viese restringido en el orificio de la boquilla que genera la vena de fluido descargada sobre la campana. En base a esta hipótesis se construyó el prototipo cuyo esquema puede verse en la figura 2. Éste consistía básicamente en un tubo metálico de 10 cm de diámetro dotado en la parte superior de un sistema de rebose que permitía mantener la altura del esmalte en un nivel constante de 50 cm de altura. La parte inferior del tubo de alimentación estaba dotada de un sistema inyector troncocónico en el centro del cual se ubicaba una boquilla de acero inoxidable de bordes romos.

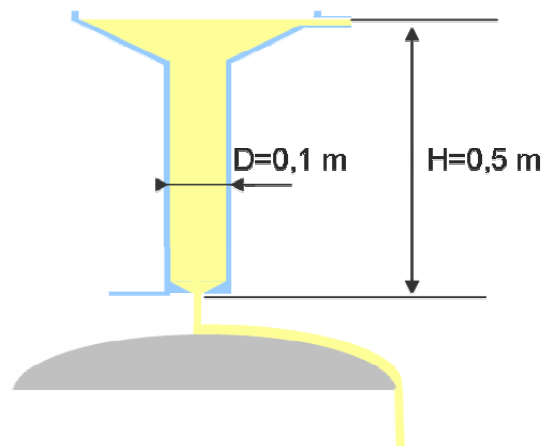
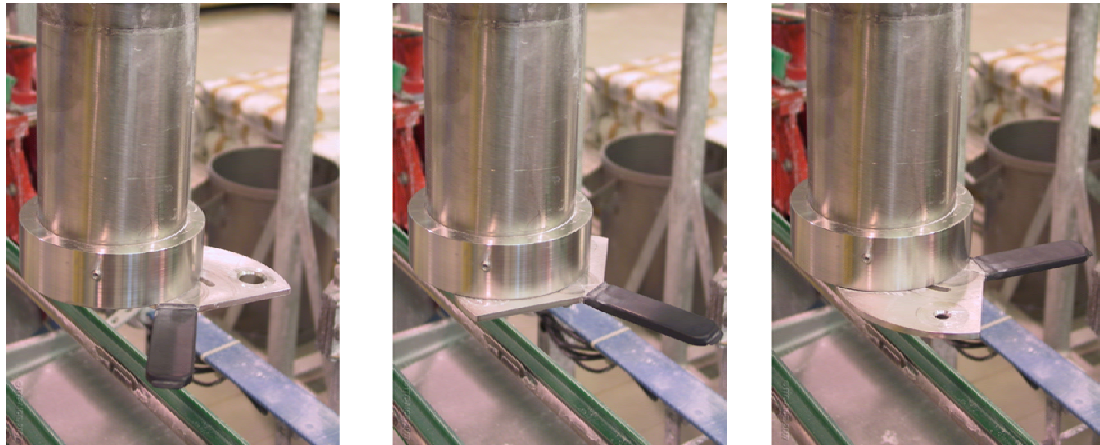


Figura 2. Esquema del prototipo de alimentador desarrollado.

Para no perder la versatilidad de los sistemas que incluyen una válvula como elemento regulador de caudal, se decidió dotar al prototipo de un sistema de cambio rápido de boquillas que se muestra en detalle en la figura 3. Este dispositivo posee un mecanismo de tipo revólver que permite, mediante el accionamiento de una leva lateral, desplazar la boquilla de trabajo y reemplazarla instantáneamente por otra de diámetro diferente situada en un porta boquillas secundario. Con este mecanismo es posible modificar la cantidad de esmalte alimentada a la campana de una forma rápida y sin detener la alimentación de esmalte a la misma, lo cual supone una gran ventaja con respecto a los actuales sistemas de cambio de boquillas.

A pesar de estas ventajas, la utilización de boquillas con diámetros fijos, sin la posibilidad de disponer de un rango continuo de diámetros de boquilla, no permite conseguir una variación continua de la cantidad de esmalte aplicado. Sin embargo, la posibilidad de modificar la velocidad de la línea de esmaltado en el tramo deseado permite un ajuste fino del sistema con el que se consigue, en todo momento, las cantidades de esmalte deseadas.



**Figura 3.** Detalle del sistema de cambio rápido de boquillas en sus tres posiciones (de izquierda a derecha) boquilla 1, cerrado y boquilla 2.

## 5 ENSAYOS EN PLANTA PILOTO

Antes de ensayar el prototipo en condiciones industriales, se decidió realizar una serie de experimentos en la línea de esmaltado de la planta piloto del Instituto de Tecnología Cerámica (ITC), en los que se comparó su comportamiento con el de un sistema convencional de alimentación de esmalte dotado de una válvula de diafragma o válvula Saunders. Con esta finalidad, los dos sistemas de alimentación se dispusieron en serie sobre la línea de esmaltado y fueron alimentados con el esmalte contenido en un único tanque de agitación haciendo uso de un mismo grupo de bombeo.

### 5.1 Descripción de los experimentos

Los ensayos realizados consistieron en determinar cómo se modificaba el caudal de descarga de ambos sistemas de alimentación a medida que se producían variaciones en la viscosidad del esmalte. Inicialmente, las variaciones de viscosidad tuvieron lugar por efecto del incremento de temperatura que experimentaba el esmalte como consecuencia de la agitación continua a la que era sometido. Una vez alcanzado un estado prácticamente estacionario, en el que los cambios de viscosidad eran muy lentos, se continuó modificando el comportamiento reológico del esmalte mediante el uso de aditivos. La determinación de la viscosidad se realizó midiendo el tiempo de caída en copa Ford número 4, que es el método de medida habitualmente utilizado para realizar el control de la viscosidad de esmaltes.

Para facilitar la realización de los ensayos no se instaló la campana de esmaltado debajo de ninguno de los dos sistemas de alimentación. Por este motivo, tampoco se midió directamente la cantidad de esmalte que se aplicaría sobre una pieza de un formato determinado, sino el caudal másico de esmalte descargado por el alimentador. Esta medida se realizó utilizando una cubeta de plástico de dimensiones conocidas que, circulando sobre la línea de transporte, se hacía pasar por debajo de la vena de descarga generada por el alimentador, recogiendo así una cierta cantidad de esmalte. Conociendo la velocidad de la línea de transporte se determinó el tiempo de paso de la cubeta por debajo de la vena de esmalte y el caudal másico pudo calcularse como el cociente entre la cantidad de esmalte recogida y el tiempo de paso de la cubeta. Posteriormente, a partir de la densidad del esmalte, medida con un picnómetro, se calculó también el caudal volumétrico de descarga.

Con el objetivo de observar el comportamiento de los dos sistemas en todo su rango de trabajo, para cada una de las viscosidades ensayadas se determinó el caudal de descarga del alimentador convencional en tres posiciones diferentes de la válvula Saunders (100%, 75% y 50% de apertura) y una boquilla de 19 mm y el caudal de descarga del prototipo para tres diámetros diferentes de boquilla (12, 11 y 10 mm).

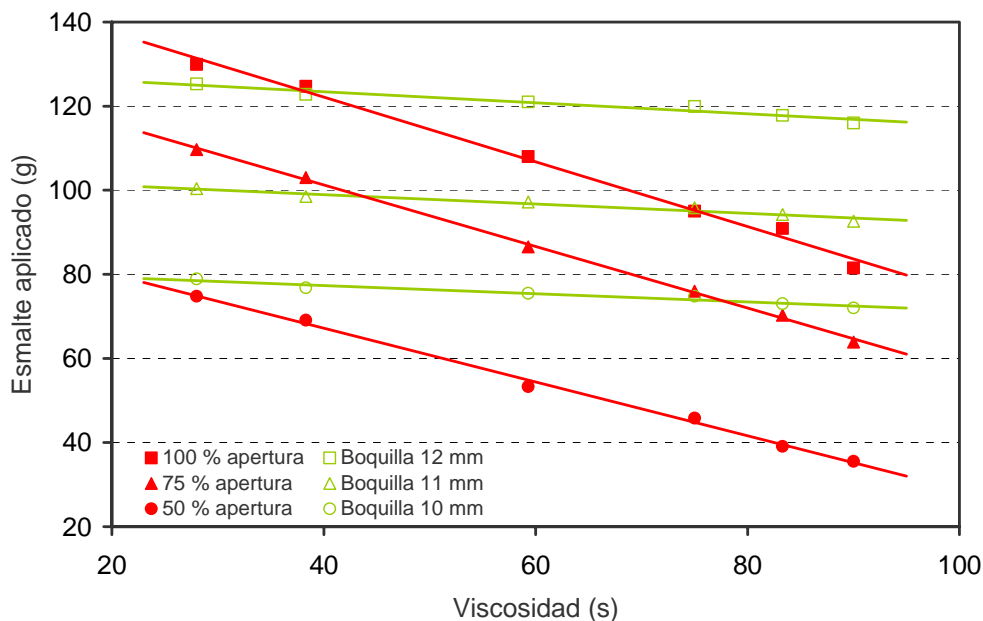
Para llevar a cabo los ensayos se partió de una suspensión de esmalte con una viscosidad de aproximadamente 90 s para la cual se midió el caudal de descarga en ambos sistemas utilizando una boquilla de 12 mm y con la válvula Saunders completamente abierta. A continuación, y antes de que se modificase la viscosidad de la suspensión, se realizaron dos medidas más en cada sistema utilizando las boquillas de 11 mm y de 10 mm en el prototipo y cerrando la válvula hasta un 75% y un 50% de apertura en el sistema convencional. Procediendo de

esta forma, se obtuvieron todos los puntos de caudal correspondientes a una viscosidad de 90 s. Una vez realizada la primera serie de caudales, se dejó que la viscosidad fuese disminuyendo progresivamente por efecto del incremento de la temperatura. Alcanzado un valor de viscosidad de en torno a 85 s se volvió a realizar otra serie de caudales, tanto para el prototipo, como para el alimentador, obteniéndose los puntos correspondientes a la viscosidad de 85 s. El ensayo se completó realizando medidas de caudales a otras 4 viscosidades diferentes del esmalte.

## 5.2 Resultados obtenidos en planta piloto

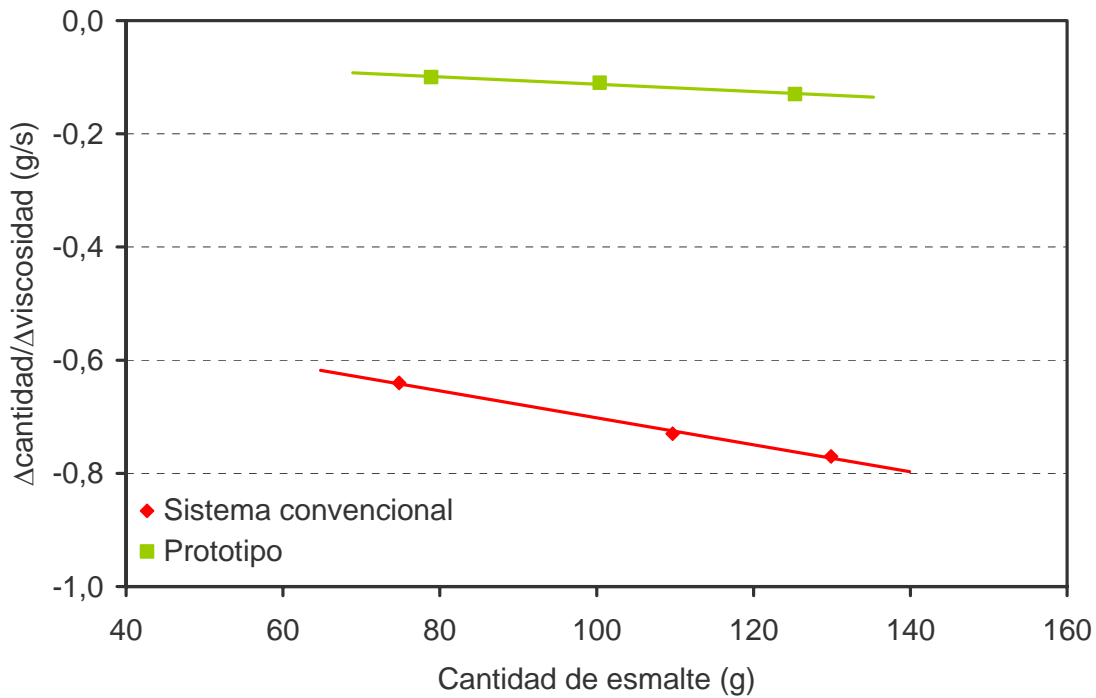
Con fines prácticos, y para facilitar la interpretación de los resultados, se ha obtenido a partir del caudal de descarga de los sistemas de alimentación estudiados, el “gramaje” que se aplicaría sobre una pieza cerámica de tamaño 33 x 33 cm que fuese esmaltada con dichos sistemas. Pese a que experimentalmente no se midieron cantidades de esmalte aplicadas, éstas pueden calcularse teóricamente tras comprobar experimentalmente que son directamente proporcionales al caudal másico descargado por el alimentador.

En la figura 4 se representa, para los dos sistemas estudiados, la variación de la cantidad de esmalte aplicado sobre una pieza de 33 x 33 cm en función de la viscosidad. Se aprecia que, para los dos sistemas, la cantidad de esmalte aplicado disminuye de forma prácticamente lineal al aumentar su viscosidad. Sin embargo, de acuerdo con la hipótesis inicial, la variación del “gramaje” con respecto a la viscosidad es mucho menor en el prototipo que en el sistema convencional, independientemente del diámetro de la boquilla utilizada y del porcentaje de apertura de la válvula.



**Figura 4.** Evolución de la cantidad de esmalte aplicado sobre piezas de dimensiones 33 x 33 cm en función de la viscosidad del esmalte para el prototipo desarrollado (trazo verde y puntos huecos) y un sistema convencional de alimentación de esmalte (trazo rojo y puntos sólidos).

La pendiente de las líneas de ajuste mostradas en la figura 4 cuantifica como se modifica la cantidad de esmalte aplicado al variar la viscosidad del esmalte. Por tanto, estas pendientes indican la sensibilidad de los sistemas estudiados a la variación de la viscosidad. En la figura 5 se representa la pendiente de cada una de estas rectas ( $\Delta$ cantidad/ $\Delta$ viscosidad) en función de la cantidad de esmalte que se aplicaría, en cada situación, a la viscosidad más baja de todas las ensayadas (28 s). Puede observarse que para cualquier valor del “gramaje” la variación de la cantidad de esmalte con respecto a la modificación de la viscosidad es siempre mayor para el sistema convencional que para el prototipo. Además, esta diferencia se acentúa cuanto mayor es la cantidad de esmalte aplicado.



**Figura 5. Variación de la sensibilidad a los cambios de viscosidad de los alimentadores estudiados con la cantidad de esmalte aplicado.**

En la tabla 1 se recoge cual sería la variación de la cantidad de esmalte aplicado que tendría lugar al originarse un cambio en la viscosidad del esmalte de 5 s. Por ejemplo, si se trabaja a un valor nominal de esmalte aplicado de 75 g, en el sistema convencional un cambio de 5 s en la viscosidad provocaría un cambio de 3,2 g en la cantidad de esmalte aplicado sobre la pieza, mientras que en el nuevo sistema esta variación sería tan sólo de 0,5 g. A la vista de estos resultados, puede decirse que el nuevo prototipo es en torno a 5 veces menos sensible a los cambios de viscosidad que los sistemas convencionales de alimentación de esmalte que utilizan una válvula de Saunders como elemento regulador de caudal.

**Tabla 1. Variación de la cantidad de esmalte aplicada sobre una pieza de dimensiones 33 x 33 cm como consecuencia de una variación de la viscosidad del esmalte de 5 s.**

Cantidad nominal de esmalte aplicado (g/pieza)	Variación de la cantidad de esmalte aplicada (g/pieza)	
	Sistema convencional	Prototipo desarrollado
75	3,2	0,5
100	3,6	0,6
125	3,9	0,7

### 5.3 Comprobación de la validez de los balances de energía y de las hipótesis realizadas para estudiar el prototipo desarrollado

Para comprobar la validez de la ecuación 5, se han realizado experimentos en los que se ha medido la velocidad de descarga del esmalte,  $v_2$ , para diferentes alturas del mismo en el tubo de descarga, H. En la figura 6 se representa el valor medio de la velocidad del esmalte en función de  $H^{1/2}$ , junto con el error experimental cometido en la medida de la velocidad de descarga. Se aprecia que los resultados experimentales se ajustan bastante bien a una recta que pasa por el origen y de pendiente igual a  $g^{1/2}$  ( $3,13 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ). Estos resultados corroboran la validez de la ecuación 5 para estudiar el comportamiento del sistema de alimentación propuesto así como las hipótesis realizadas para su obtención.



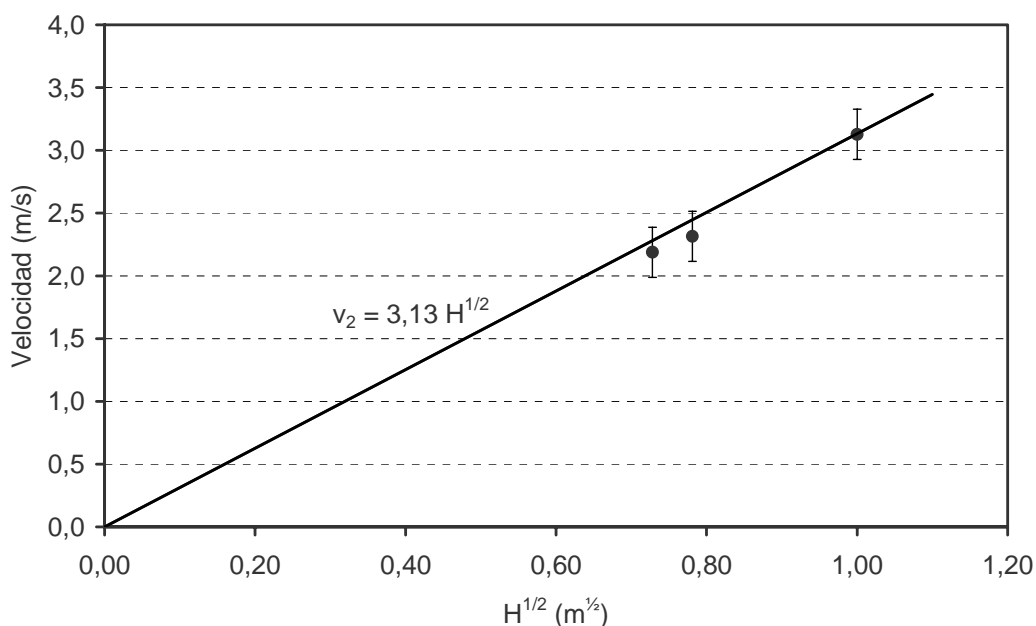


Figura 6. Dependencia entre la velocidad de descarga del esmalte y la altura del mismo. Ajuste de los resultados experimentales a la ecuación 5.

## 6 ENSAYOS EN CONDICIONES INDUSTRIALES

Tras comprobar en la plata piloto del ITC que el sistema desarrollado aportaba importantes ventajas respecto a los alimentadores de esmalte convencionales, se decidió realizar una serie de pruebas en una línea de esmaltado industrial. Para ello se instaló el prototipo sobre la campana utilizada para llevar a cabo las aplicaciones de esmalte base en dicha línea de esmaltado (ver figura 7), y se realizó un seguimiento de la producción con el fin de estudiar el comportamiento del sistema. Con fines comparativos, se llevó a cabo también el seguimiento de un sistema convencional de alimentación de esmalte dotado de una válvula Saunders, siendo alimentados ambos sistemas por el mismo esmalte.

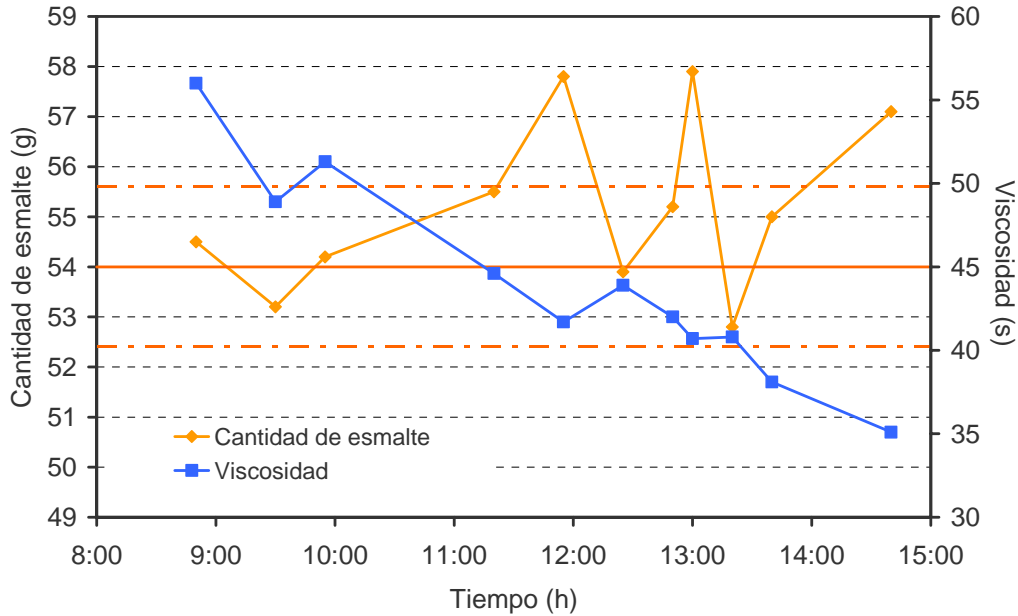
El seguimiento realizado consistió en medir de forma puntual la viscosidad del esmalte en segundos de caída en copa Ford, la densidad con un picnómetro y la cantidad de esmalte aplicado. Esta última medida se realizó haciendo uso de la placa metálica empleada por los operarios de la línea para realizar el control de la operación de esmaltado.



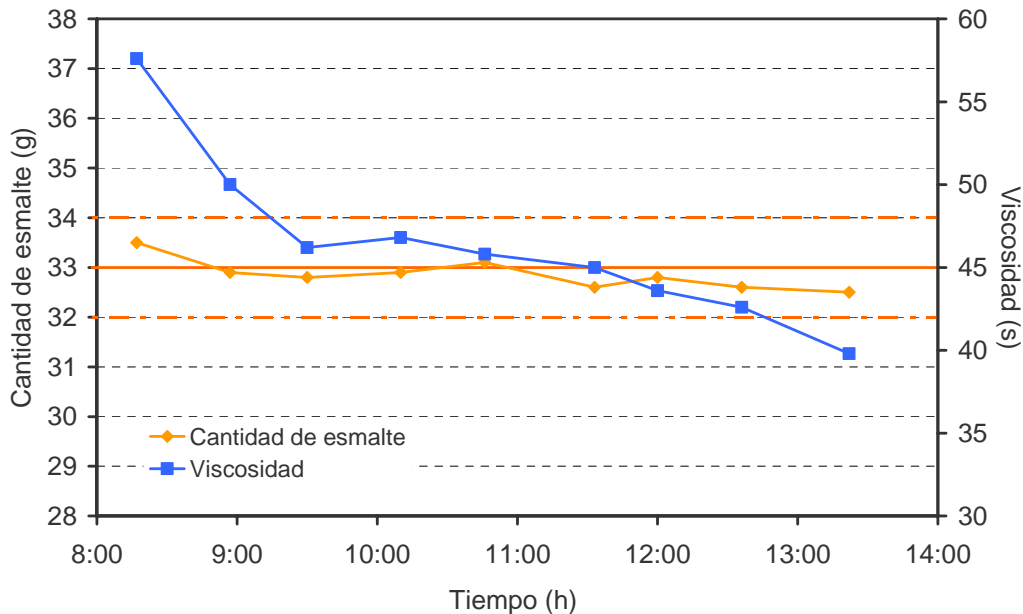
Figura 7. Prototipo instalado en la línea de esmaltado industrial (izquierda) y detalle del sistema de cambio rápido de boquilla (derecha).



En la figura 8 y la figura 9 se representa con cuadros y sobre el eje derecho, la evolución de la viscosidad del esmalte aplicado en los dos sistemas estudiados (el convencional en la figura 8 y el prototipo en la figura 9) durante 7 y 6 horas de producción respectivamente. En las mismas figuras, con rombos y sobre el eje izquierdo, se representa la evolución de la cantidad de esmalte depositado sobre una placa de control en el mismo periodo de tiempo. La línea horizontal de trazo continuo representa el valor nominal de cantidad de esmalte a aplicar y las líneas horizontales de trazo discontinuo corresponden a los límites de control fuera de los cuales pueden aparecer defectos en el producto final.



**Figura 8. Evolución en el tiempo de la viscosidad y de la cantidad de esmalte aplicado utilizando un sistema convencional de alimentación, en condiciones industriales.**



**Figura 9. Evolución en el tiempo de la viscosidad y de la cantidad de esmalte aplicado utilizando el sistema de alimentación desarrollado en este trabajo, en condiciones industriales.**

Como puede comprobarse en la figura 8, al iniciarse la producción en el sistema convencional, los valores de la cantidad de esmalte aplicado se encontraban dentro de los límites de control pero, a medida que la viscosidad del esmalte fue disminuyendo, la cantidad de esmalte aplicado aumentó, hasta situarse, alrededor de las 11:30 horas,

fuera del límite de control superior. En este momento, como consecuencia de una reducción manual de la apertura de la válvula Saunders, por parte del operario de la línea, la cantidad de esmalte aplicado volvió a situarse dentro de los límites de control. Sin embargo, dado que la disminución de la viscosidad, asociada a un aumento de la temperatura ambiente durante las horas centrales del día, no se detuvo, la cantidad de esmalte aplicada volvió rápidamente a salirse de las especificaciones a las 13:00 horas, lo cual hizo necesario realizar una nueva corrección manual del caudal de descarga. Finalmente, ante la continua disminución de la viscosidad, la cantidad de esmalte rebasó de nuevo el límite de control sobre las 14:00 horas.

En cuanto al prototipo (figura 9) puede apreciarse que, a diferencia de lo ocurrido con el sistema convencional (figura 8), pese a producirse una variación de la viscosidad de aproximadamente 20 s (similar a la de los experimentos con el sistema convencional), los valores de la cantidad de esmalte aplicado se encontraban todos dentro de los límites de control establecidos (líneas horizontales de trazos), todo ello, sin haber realizado ningún tipo de manipulación (cambio de boquilla, cambio de la velocidad de la línea, etc.) sobre el sistema de esmaltado y sin observar ningún tipo de defecto en el producto final achacable a la utilización del prototipo.

Los resultados obtenidos en las pruebas industriales ponen de manifiesto las ventajas del alimentador desarrollado frente a los sistemas tradicionales. En efecto, para una variación de la viscosidad del esmalte de casi 20 s, el prototipo diseñado fue capaz de mantener la cantidad de esmalte aplicada dentro de los límites de control establecidos sin tener que realizar ninguna actuación sobre el sistema. En cambio, con el sistema convencional, para la misma variación de la viscosidad (20 s) la cantidad de esmalte aplicado superó los límites de control en tres ocasiones, siendo necesario regular el caudal de salida para intentar mantener la cantidad de esmalte aplicada dentro de los límites de control.

## 7 CONCLUSIONES

- Se han aplicado los balances de energía mecánica a un sistema de alimentación de esmalte y se ha comprobado que la variación de la cantidad de esmalte aplicado o “gramaje”, debida a modificaciones difícilmente controlables de su viscosidad, está directamente relacionada con las pérdidas de carga del sistema de alimentación (presencia de válvulas, estrechamientos, etc.).
- Se ha comprobado la validez de los balances de energía mecánica para estudiar el comportamiento de los sistemas de alimentación de esmalte utilizados en las aplicaciones por campana.
- Se ha diseñado y construido un nuevo sistema de alimentación de esmalte en el que se minimizan las pérdidas de energía mecánica experimentadas por el esmalte con el objetivo de reducir su sensibilidad frente a los cambios de viscosidad de la suspensión. Las pruebas en planta piloto revelan que el sistema desarrollado es 5 veces menos sensible a las variaciones de viscosidad que los sistemas utilizados en la actualidad.
- Se ha comprobado que el prototipo diseñado funciona correctamente en condiciones industriales manteniendo la cantidad de esmalte aplicado dentro de los límites de control establecidos sin necesidad de realizar ningún tipo de actuación sobre el sistema y manteniendo la calidad del producto final.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dispositivo de alimentación de líquidos o suspensiones. G. Mallol, D. Llorens, J. Boix, F. Font. Patente P2007 02537, 27/09/07.
- [2] PEÑALVER, J. et al. Estudio de las variables de control de la aplicación serigráfica y su influencia sobre la dispersión de tonalidades en baldosas. *Cerámica Información*, 229, 37-43, 1997.
- [3] FERRANDO, F. et al. Desarrollo de color y aparición de tonalidades en piezas de pavimento extruido esmaltado, tipo rústico. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 38(6), 471-476, 1998.
- [4] SHARMA, K.D. Génesis de la variación de tonalidades en las baldosas cerámicas y algunos remedios que se recomiendan. En: *Qualicer : I Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico*. [Castellón: Cámara Oficial de Industria Comercio y Navegación], 1990.
- [5] PERIS FAJARNÉS, G. et al. Revisión de estudios y referencias sobre los parámetros que pueden producir variabilidad tonal y defectos superficiales en la producción de azulejos y pavimentos cerámicos. En: *Qualicer 2002: VII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico III*. Castellón: Cámara oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2002., Pos 27-Pos 34.

- [6] BONET, G. et al. Estudio de factores industriales que influyen en la aparición de tonalidades en baldosas cerámicas. *Cerám. Inf. (Esp)*, 240, 29-34, 1998.
- [7] COSTA NOVELLA, E. et al. *Ingeniería Química*. Vol. 3. Flujo de fluidos. Ed. Alhambra Universidad. 1985.

### **AGRADECIMIENTOS**

Las pruebas industriales recogidas en el presente trabajo han sido desarrolladas en las instalaciones de producción de la empresa SALONI, S.A., a la cual los autores desean agradecer la colaboración prestada en la realización de este estudio.