

MEDIDA Y CONTROL DE LA PRESIÓN MÁXIMA EN LOS ALVEOLOS DE UN MOLDE DE FABRICACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS

G. Mallol⁽¹⁾, D. Llorens⁽¹⁾, J. Boix⁽¹⁾, N. Pascual⁽¹⁾,

A. Poyatos⁽²⁾, R. Bonaque⁽²⁾

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

⁽²⁾ MACER S.L. Camino Estación s/n, 12550 Almazora. España

jboix@itc.uji.es

RESUMEN

En este trabajo se ha desarrollado un sistema de medida en tiempo real que proporciona la presión máxima aplicada en cada uno de los alvéolos de un molde industrial durante cada ciclo de prensado. Los experimentos realizados demuestran la importancia de disponer de la medida de la presión máxima en cada alveolo con vistas a realizar el control de la densidad aparente en seco de los soportes obtenidos en un mismo ciclo de prensado.

El trabajo se completa con la implementación de un sistema de control que, actuando de forma individualizada sobre la posición de la primera caída de cada uno de los bloquitos del molde, consigue mantener constante la presión máxima aplicada en cada alveolo y asegura la constancia de la densidad aparente de todos los soportes procesados.

1. INTRODUCCIÓN

Gran cantidad de referencias bibliográficas muestran que la densidad aparente en seco de los soportes cerámicos es una de las variables más importantes de todo el proceso de fabricación de baldosas cerámicas, en la medida en que afecta al resto de variables del proceso y determina la gran mayoría de las propiedades del producto final [1] [2].

El procedimiento de control de la densidad aparente media empleado en la actualidad por la mayoría de los fabricantes de baldosas cerámicas persigue un doble objetivo. Por un lado, asegurar la constancia en el tiempo de la densidad aparente media de las piezas procesadas y, por otro lado, garantizar que todas las piezas obtenidas en un mismo ciclo de prensado posean una misma densidad aparente media [3]. El primer objetivo se consigue mediante la modificación de la presión máxima del ciclo de prensado, en base a medidas de la humedad del polvo atomizado y de la densidad aparente en húmedo de los soportes. El segundo objetivo se alcanza tradicionalmente gracias a la incorporación de finas láminas metálicas de diferentes espesores entre los punzones y la placa portapunzones. Actuando de este modo se altera la distribución de las presiones aplicadas en los diferentes huecos del molde y, por tanto, es posible controlar la densidad aparente media alcanzada por cada soporte al finalizar el ciclo de prensado.

Si bien el control de la densidad aparente mediante la regulación de la presión máxima de prensado, en base a las variaciones de humedad del polvo atomizado, es un procedimiento que hoy en día puede ser completamente automatizado [4], el control de la distribución de las densidades aparentes medias de las piezas obtenidas en un mismo ciclo de prensado se realiza todavía de una forma manual y discontinua. Por esta razón, esta forma de operar no permite actualmente asegurar la constancia de la densidad aparente de todos los soportes obtenidos en cada prensada.

En los últimos años, han aparecido en el mercado varios dispositivos que intentan corregir las diferencias de densidad aparente entre las piezas conformadas en un mismo ciclo de prensado. Por un lado, existen los llamados moldes de placa isostática en los cuales los bloquitos no se apoyan directamente sobre la bancada del molde sino que reposan sobre una cámara de aceite común mediante la cual se compensan las diferencias de presión que pueden aparecer entre los diferentes alvéolos. Este tipo de moldes, por el momento, no han tenido una gran aceptación debido a su gran complejidad mecánica y al hecho de que la regulación de presiones se realiza a costa de generar diferencias en el espesor medio de las piezas.

Por otro lado, también se han empezado a comercializar los conocidos como moldes de bloquitos móviles [5]. Estos moldes presentan la peculiaridad de poder modificar de forma individualizada la posición de la primera caída de cada bloqueito, lo cual permite modificar la cantidad de polvo alimentada en cada hueco, y con ello, la presión efectiva realmente aplicada en el mismo. Este sistema presenta la

ventaja de no crear diferencias de espesor entre las piezas y tener una complejidad mecánica menor que la de los moldes de placa isostática. Sin embargo, hasta el momento, su control es manual y requieren la actuación de un operario que, en base a medidas rutinarias de la densidad aparente de los soportes, regule las posiciones de consigna de los bloquitos para igualar las densidades aparentes.

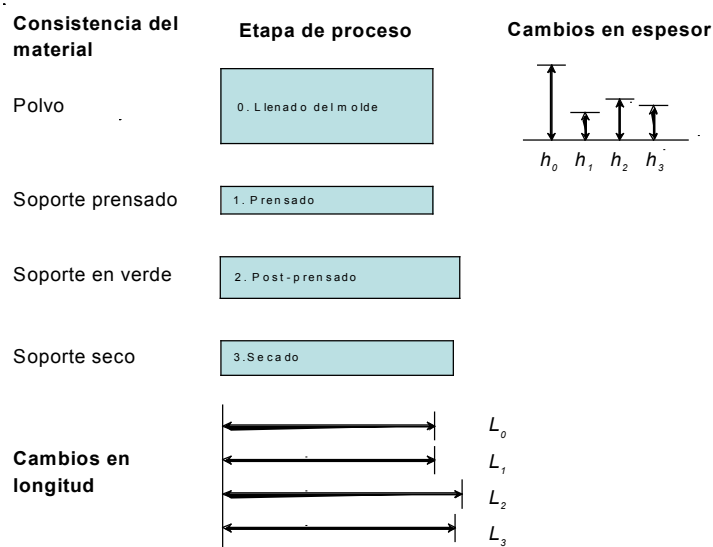


Figura 1. Cambios dimensionales experimentados por el lecho de polvo en las etapas de prensado y secado.

La densidad aparente media en seco de los soportes prensados depende, para una misma composición química del polvo atomizado y una distribución de tamaños de partícula dentro de los márgenes habituales de trabajo, de la presión máxima aplicada sobre el polvo y de su humedad. La relación entre estas tres variables constituye el conocido como diagrama de compactación de la composición.

Aunque el diagrama de compactación es ampliamente utilizado en el control de la operación de prensado, éste no es suficiente para comprender el funcionamiento de los sistemas de regulación de la carga por bloquitos móviles, ya que no permite identificar el efecto de otras variables que, junto a la humedad y la presión, intervienen en la operación de prensado, como por ejemplo, la densidad del lecho de polvo tras el llenado del alveolo, el espesor inicial del mismo o el espesor final del soporte. Para establecer la relación entre la densidad aparente en seco del soporte y estas variables es necesario tener presentes los diferentes cambios dimensionales que experimenta el lecho de polvo atomizado, desde su alimentación al alveolo de la prensa, hasta su secado, una vez adquirida la consistencia de soporte tras el conformado.

Durante el llenado del alveolo, correspondiente al estadio 0 del proceso descrito en la figura 1, las dimensiones del lecho de polvo (espesor, h , y longitud de lados, L) están directamente relacionadas con el volumen del propio hueco (h_0 y L_0). En el prensado, la compactación del lecho de polvo disminuye progresivamente.

te hasta alcanzar una compactación máxima D_1 , correspondiente a un espesor h_1 y a una longitud L_1 . Tras el prensado una expansión, denominada expansión post-prensado, S_2 , tiene lugar, y el posterior tratamiento térmico de secado provoca una contracción de secado, S_3 . Estos cambios dimensiones pueden calcularse mediante la ecuación 1 y la ecuación 2.

$$S_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right)$$

Ecuación 1

$$S_3 = \frac{1}{3} \left(\frac{V_3 - V_2}{V_2} \right)$$

Ecuación 2.

siendo V_1 el volumen del soporte prensado, V_2 el volumen del soporte tras su expansión y V_3 el volumen del soporte seco.

La densidad aparente en seco del soporte tras el secado puede calcularse mediante la ecuación 3.

$$D_3 = \frac{M_3}{V_3}$$

Ecuación 3.

siendo M_3 la masa del soporte seco, la cual, a su vez, puede calcularse, según la ecuación 4, a partir de la humedad en base seca del polvo atomizado en el momento del conformado (W_0) y de la masa de polvo inicialmente contenida en el hueco, M_0 .

$$M_3 = \frac{M_0}{1 + W_0}$$

Ecuación 4.

Combinando las ecuaciones 1, 2, 3 y 4, y teniendo en cuenta que el volumen del soporte tras el prensado puede calcularse como $V_1 = h_1 L_1^2$ (suponiendo un formato cuadrado) y que la densidad inicial del lecho es $D_0 = M_0 / (h_0 L_1^2)$ se obtiene la ecuación 5.

$$D_3 = \frac{D_0}{(1 + W_0)(1 + 3S_2)(1 + 3S_3)} \frac{h_0}{h_1}$$

Ecuación 5.

Considerando la ecuación 6 y definiendo la razón de compresibilidad del polvo, ϕ , como el cociente entre el espesor inicial del lecho y el espesor final del soporte conformado, la ecuación 5 puede simplificarse adoptando la forma de la ecuación 7.

$$K(W_0, P_1) = \frac{1}{(1 + W_0)(1 + 3S_2)(1 + 3S_3)}$$

Ecuación 6.

$$D_3 = K(W_0, P_1)D_0\phi$$

Ecuación 7.

Puesto que la expansión post prensado depende de la humedad del polvo y de la presión de prensado y la contracción de secado, aunque se puede demostrar que es prácticamente independiente de la presión, también depende de la humedad, K es un parámetro que varía, tanto con la humedad del polvo atomizado, como con la presión máxima aplicada durante el prensado (P_1).

De acuerdo con la ecuación 7 la densidad del soporte seco puede modificarse actuando sobre la densidad inicial del lecho o sobre la razón de compresión del polvo. Ahora bien, en la práctica industrial, tan sólo es viable actuar sobre la razón de compresión puesto que la densidad aparente del lecho, al ser un parámetro que depende fundamentalmente de la composición del atomizado y de su fluidez, es difícilmente controlable.

Por ejemplo, dadas unas condiciones de operación, una forma sencilla de aumentar la razón de compresión es aumentar el espesor inicial del lecho de polvo antes del prensado, manteniendo constante el espesor final del soporte. Esto se consigue aumentando la masa de polvo alimentada al alveolo, gracias al incremento del recorrido de la primera caída del bloqueto, y aumentando la presión de prensado hasta alcanzar el espesor final deseado. La mayor presión requerida para alcanzar el mismo espesor final, que en las condiciones iniciales, es la que origina un incremento de la densidad aparente en seco del soporte.

$$D_3 = M \ln P_1 + N$$

Ecuación 8.

Los conceptos que se acaban de introducir quedan englobados en la ecuación 9, la cual se obtiene combinando la ecuación 7 con la ecuación que representa el diagrama de compactación de la composición para una humedad dada (ecuación 8). La ecuación 9 relaciona las diferentes variables que intervienen en la operación de prensado: presión máxima, humedad del polvo, densidad aparente y espesor inicial del lecho de polvo y espesor final de la pieza.

$$P_1 = \exp\left(\frac{K(W_0, P_1)D_0\phi - N}{M}\right)$$

Ecuación 9.

siendo M y N los parámetros característicos del diagrama de compactación, que dependen de la humedad del polvo atomizado.

La resolución de esta ecuación es relativamente complicada si se tiene en cuenta la dependencia del parámetro K con la humedad y la presión. Sin embargo, para los rangos de variación habituales de la presión en condiciones industriales, puede considerarse que, la expansión post prensado, depende únicamente de la humedad. En estas condiciones, la ecuación 9 adopta la forma de la ecuación 10, según la cual, para una humedad constante, si se desea mantener constante el espesor final del soporte, un aumento del espesor inicial del lecho requerirá un incremento de la presión de prensado que, a su vez, originará un incremento de la densidad aparente. Al contrario, si se incrementa el espesor inicial del lecho, pero se mantiene constante la presión de prensado, para que se cumpla la igualdad definida por la ecuación 10, será necesario que el espesor final del soporte se incremente.

$$P_1 = \exp\left(\frac{K(W_0)D_0\phi - N}{M}\right)$$

Ecuación 10.

Aplicado a un molde con varias salidas, este concepto implica que la presión aplicada por la prensa se distribuirá en los diferentes huecos en función del espesor inicial del lecho y de la densidad inicial del mismo, siendo el espesor inicial en cada uno de los huecos la variable que permite regular la presión aplicada en cada uno de ellos y, con ello, la densidad aparente de los soportes secos.

Por ejemplo, en un hipotético molde de bloquitos móviles con dos salidas, a igualdad del resto de variables, un mismo espesor inicial del lecho de polvo en ambos huecos garantizaría una misma presión máxima. En cambio, de acuerdo con la ecuación 10, una disminución del espesor inicial del lecho en un alveolo supondrá una disminución relativa de la presión aplicada en el mismo, a costa de un aumento de la presión en el otro hueco. Este mecanismo, por el cual es posible generar diferencias de presión en el seno de los alvéolos, es el que en la práctica se emplea, aplicado de forma inversa, para compensar las diferencias de densidad en los moldes de bloquitos móviles.

2. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es determinar la viabilidad técnica de la medida de la presión de prensado en cada uno de los alvéolos de un molde de bloquitos móviles y utilizar dicha variable como variable de control de un sistema de regulación, basado en la modificación individualizada de la cantidad de polvo atomizado alimentado a cada hueco, que permita mantener constante la presión máxima aplicada en todos los alvéolos.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para la realización del trabajo se ha utilizado una composición de polvo atomizado de las habitualmente empleadas para la fabricación de gres porcelánico esmaltado. Utilizando la metodología descrita en otros artículos [6] se ha obtenido el diagrama de compactación de dicha composición, el cual viene representado por la ecuación 11.

$$D_3 = (-5,9W_0 + 166,8) \ln P_1 + (44,7W_0 + 892,9)$$

Ecuación 11.

Las pruebas industriales han sido efectuadas en una prensa hidráulica industrial destinada a la fabricación de soportes de gres porcelánico de formato nominal 33 x 33 cm en cocido. La prensa estaba dotada de un molde penetrante de 4 salidas con sistema de regulación de la carga mediante bloquitos móviles y de un bucle de control automático de la presión máxima de prensado en base a las variaciones de humedad del polvo atomizado.

Para llevar a cabo la medida de presión en cada alveolo se mecanizó en un lateral de los punzones superiores del molde un conducto cilíndrico, similar al utilizado para realizar el llenado de los punzones, que comunicaba la cámara isostática del punzón con el exterior. En la parte final de dicho conducto se ubicó un transductor de presión que permitía conocer la presión existente en el conjunto formado por la cámara de aceite y el conducto de medida.

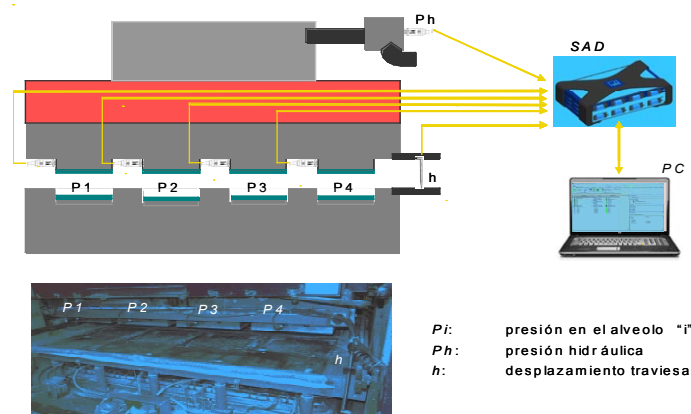


Figura 2. Instrumentación instalada en la prensa objeto del trabajo.

La instrumentación del conjunto (ver figura 2) se completó con un transductor de posición que proporcionaba información sobre el desplazamiento de la traviesa de la prensa y un quinto transductor de presión instalado en el circuito hidráulico. Todas las señales generadas por cada uno de los transductores eran adquiridas por una tarjeta de adquisición de datos de alta velocidad que permitía muestrear a una frecuencia máxima de 1,25 MHz.

De este modo, mediante una aplicación informática especialmente desarrollada, se recogían los valores de presión – posición a lo largo de cada ciclo de prensado y se obtenía el valor máximo de la presión de prensado correspondiente a cada alveolo. Sobre esta misma aplicación se implementaron los algoritmos de control que permitirían regular la posición de los bloquitos móviles del molde para igualar la presión máxima de todos los alvéolos.

4. °RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Validación de la medida de la presión de prensado en los alvéolos de la prensa

Tras determinar las condiciones óptimas de muestreo mediante una serie de pruebas preliminares, se realizaron maniobras para validar el sistema de medida desarrollado. Estas maniobras consistieron en adquirir, durante varios ciclos de prensado, los valores de presión en los alvéolos del molde para compararlos con los valores de presión proporcionados por el transductor de presión instalado en el circuito hidráulico de la prensa.

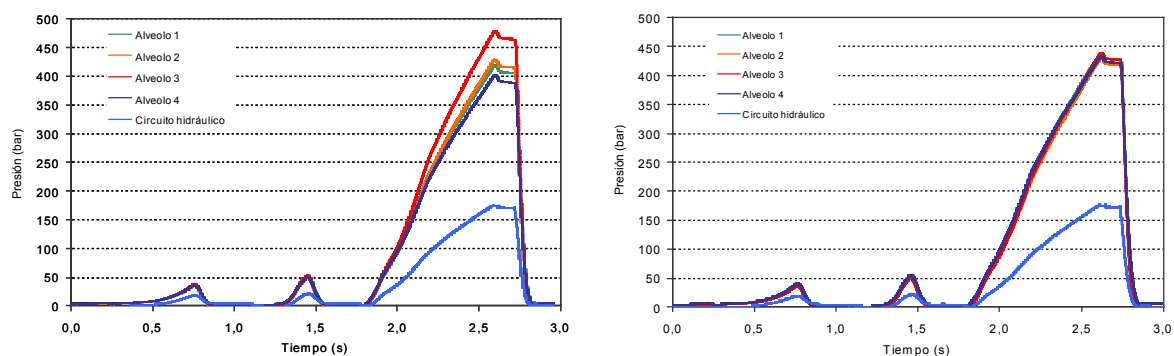


Figura 3. Evolución de las presiones registradas durante un ciclo de prensado sin corrección de la carga (izq.) y un ciclo de prensado con corrección (der.).

En la figura 3 se representa la variación de la presión en los alvéolos del molde y en el circuito hidráulico de la prensa durante dos ciclos de prensado completos. Durante el ciclo correspondiente al gráfico de la izquierda, el sistema de corrección de la posición de la primera caída de los bloquitos móviles permaneció desactivado, dando como resultado una distribución de presiones muy heterogénea, con una diferencia de presiones máximas entre alvéolos de 78 bar. Durante el ciclo mostrado a la derecha se activó la corrección por bloquitos móviles, lo cual

proporcionó una distribución de presiones mucho más homogénea con tan sólo 8 bar de diferencia máxima entre alvéolos. Es interesante destacar que, aunque la actuación del sistema de corrección de la primera caída modifica la distribución de presiones en los alvéolos, el valor medio de estas presiones apenas se modifica (134 bar en el primer ciclo frente a 135 bar en el segundo), ya que la presión máxima aplicada en el circuito hidráulico de la prensa es la misma en los dos casos (175 bar).

Como puede observarse en la figura 4 (izquierda), correspondiente a una ampliación de la parte final de la última prensada del primer ciclo de prensado, la relación entre la presión medida en los alvéolos y la presión registrada en el circuito hidráulico de la prensa es muy buena. En efecto, incluso el ligero sobre impulso, registrado en la presión del circuito en el momento de aplicación de la presión máxima, queda reflejado perfectamente en la presión medida en todos los alvéolos de la prensa.

La validez de la medida de presiones en los alvéolos queda demostrada en el gráfico de la figura 4 (derecha) el cual muestra la variación de la presión media de todos los alvéolos frente a la presión del circuito hidráulico. Puede observarse que los datos experimentales se ajustan correctamente a una línea recta que pasa por el origen de coordenadas, de acuerdo con la ecuación 12, que se obtiene aplicando un balance de fuerzas a la prensa.

$$P_{alveolo} = \frac{S_{cilindro}}{S_{piezas}} P_{circuito}$$

Ecuación 12

siendo $S_{cilindro}$ la sección interna del cilindro hidráulico de la prensa y S_{piezas} la superficie total de prensado.

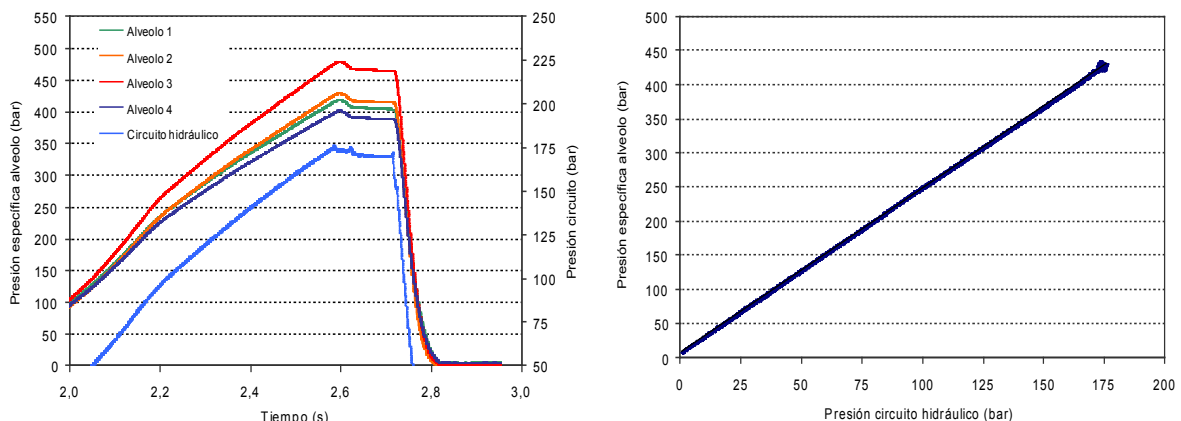


Figura 4. Evolución de las presiones registradas en la parte final de un ciclo de prensado (izq.) y relación entre presión hidráulica y presión específica (der.).

4.2. Efecto de la presión medida en los alvéolos de la prensa sobre la densidad aparente de los soportes

Para evaluar el efecto de la presión específica registrada en los alvéolos de la prensa sobre la densidad aparente de los soportes prensados se determinó, mediante el método de inmersión en mercurio, la densidad aparente en seco media de todos los soportes conformados durante los ciclos de prensado analizados en el apartado 4.1. Los valores de las densidades aparentes en seco de cada soporte, así como la presión máxima registrada en cada alveolo se recogen en la tabla 1. Puede observarse que los valores de densidad aparente están directamente relacionados con la presión máxima aplicada en cada alveolo. Para el ciclo de prensado efectuado sin corrección de la carga, la presión aplicada sobre el polvo contenido en el alvéolo 3 es 78 bar superior a la aplicada sobre el 4. Como consecuencia de esto, la densidad aparente del soporte procesado en el primer alveolo es 26 kg/m³ superior a la del procesado en este último. La misma observación es válida para los otros dos huecos del molde.

Al accionar la corrección por bloquitos móviles se observa como los valores de densidad aparente en los diferentes alvéolos son mucho más similares, siendo la diferencia máxima de tan sólo 4 kg/m³. Este hecho pone de manifiesto el efecto positivo que ejerce sobre la distribución de presiones la modificación de las alturas iniciales del lecho de polvo en cada alveolo.

	Ciclo sin corrección				Ciclo con corrección			
Alveolo	1	2	3	4	1	2	3	4
Bloqueto (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,28	0,51	0,00
P ₁ (bar)	418	429	479	401	438	430	439	433
D ₃ (kg/m ³)	1952	1962	1971	1945	1961	1962	1962	1957
ΔP _{1 max} (bar)	78				8			
ΔD _{3 max} (kg/m ³)	26				4			

Tabla 1. Presión máxima y densidad aparente registrados en cada alveolo.

Tras estas primeras maniobras se configuró el programa de adquisición de datos para registrar en continuo la evolución de las presiones máximas y evaluar su efecto sobre la densidad aparente en diferentes condiciones.

En el gráfico de la figura 5 se muestra la evolución de las presiones máximas correspondientes a los cuatro huecos del molde a lo largo de 15 minutos de producción. Durante este periodo se recogieron las piezas prensadas en tres condiciones de funcionamiento diferentes, referenciadas en el gráfico como A, B y C, con el fin de determinar su densidad aparente y su tamaño tras la cocción.

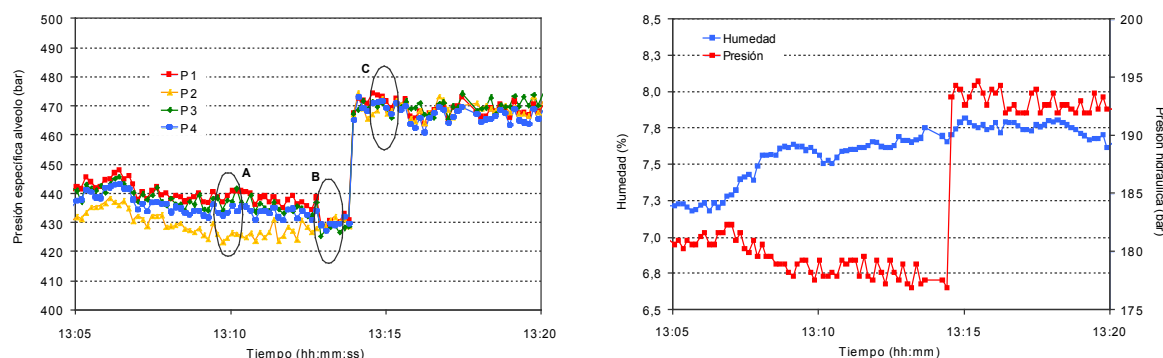


Figura 5. Evolución en el tiempo de las presiones máximas registradas (izq.) y de la humedad del polvo atomizado (der.) durante 15 minutos.

La condición A hace referencia a una situación en la que la prensa estaba trabajando con el sistema de corrección de la carga activo, pero configurado de tal forma que la presión aplicada sobre el alveolo 2 era ligeramente inferior a la de los otros tres alvéolos. En la condición B se modificó manualmente la consigna de posición de la primera caída del bloqueto 2 con el fin de homogenizar la distribución de presiones y en la condición C, manteniendo las consignas de posición de la situación B, se aumentó la presión de prensado para producir un cambio en la densidad aparente de los soportes.

Como puede apreciarse, al iniciarse el periodo de experimentación, la presión media registrada en los alvéolos de la prensa disminuyó progresivamente, como consecuencia de la regulación de la presión hidráulica llevada a cabo por el sistema de control automático de la densidad aparente en seco instalado en la prensa. Dicha acción de control fue motivada por el aumento de la humedad del polvo atomizado observado entre la 13:05 h y la 13:10 h (ver figura 5 (der.)).

Condición	A				B				C			
Alveolo	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Posición bloqueto (mm)	0,07	0,00	0,05	0,04	0,13	0,00	0,08	0,07	0,13	0,00	0,08	0,07
P ₁ (bar)	439	425	437	436	429	432	429	430	470	470	471	471
D ₂ (kg/m ³)	2090	2090	2088	2088	2099	2099	2099	2099	2116	2117	2117	2116
D ₃ (kg/m ³)	1940	1940	1938	1938	1941	1941	1941	1941	1957	1958	1958	1957
L ₄ (mm)	335,1	334,3	334,9	335,0	335,3	335,1	335,1	335,3	335,5	335,5	335,6	335,6
Calibre	4	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5
ΔP _{1 max} (bar)	14				3				1			
ΔD _{3 max} (kg/m ³)	2				0				1			
ΔL _{4 max} (mm)	0,8				0,2				0,1			

Tabla 2. Presión máxima, densidad aparente en húmedo y tamaño cocido de las piezas procesadas en diferentes condiciones de operación.

En la tabla 2 se recogen la presión máxima, la densidad aparente en húmedo y el tamaño de las piezas tras la cocción, para las tres condiciones de operación evaluadas. Junto con estas variables también se muestra la posición de la primera

caída de cada bloqueto móvil, tomando como posición de referencia la del momento de aplicación de la presión, la densidad aparente en seco, calculada teniendo en cuenta la humedad del polvo en el momento de recoger las piezas, y el calibre de las mismas.

En la condición A, debido a la menor presión aplicada sobre el polvo contenido en el alveolo 2, el tamaño de esta pieza tras la coacción era inferior al del resto de las piezas, para las cuales la presión máxima registrada fue prácticamente la misma. Como resultado de este comportamiento, las piezas procesadas en el alveolo 2 eran de un calibre inferior (calibre 3) al de las otras tres (calibre 4). Es interesante destacar que, si bien las diferencias de presión entre alvéolos eran evidentes, las diferencias de tamaño observadas no hubiesen podido ser detectadas a partir de las propias medidas de densidad aparente en húmedo realizadas en planta. En efecto, para una variación de la presión máxima aplicada de hasta 14 bares, que conducía a una diferencia de tamaños de 0,8 mm, prácticamente la tolerancia de un calibre, que para este formato se suele fijar en 1 mm, las diferencias de densidad aparente en húmedo medidas no superaban los 2 kg/m^3 . Este hecho, pone de manifiesto que la medida de las presiones máximas registradas en los alvéolos del molde puede llegar a ser incluso más precisas que la propia medida de densidad aparente por inmersión en mercurio. De hecho, si bien el método de inmersión en mercurio posee una precisión máxima de $\pm 4 \text{ kg/m}^3$ [7], los sensores de presión instalados permiten determinar la presión registrada sobre el polvo con una precisión de $\pm 2 \text{ bar}$, lo cual, según el diagrama de compactación, para un polvo y humedad determinados equivaldría aproximadamente a $\pm 1 \text{ kg/m}^3$.

En la situación B, se disminuyó el recorrido de la primera caída de los bloquetos 1, 3 y 4, lo cual permitió disminuir el espesor inicial del lecho de polvo en estos huecos con respecto al espesor inicial del polvo en el alveolo 2. Fruto de esta maniobra se homogeneizó la distribución de presiones en todos los alvéolos, situándose la desviación máxima de presión entre huecos en tal sólo 3 bar. Como resultado de esta acción, el tamaño de las piezas procesadas en el alveolo 2 aumentó significativamente y todas las piezas prensadas pudieron clasificarse en el calibre 4.

Cabe destacar que, pese a disminuir ligeramente la presión de prensado en el circuito hidráulico para compensar el aumento de humedad (de 7,5% a 7,8%), considerando el valor promedio de todos los soportes, la densidad aparente en húmedo (D_2) en la situación B (2099 kg/m^3) se incrementó ligeramente con respecto a A (2089 kg/m^3) debido, precisamente, a dicho aumento de la humedad. En cambio, la densidad aparente en seco (D_3) permaneció prácticamente constante (1939 kg/m^3 frente a 1941 kg/m^3) gracias a la acción del sistema de control automático de regulación de la presión. Este hecho pone en evidencia que la densidad aparente en húmedo no es la variable más adecuada para llevar a cabo el control del prensado.

Finalmente, en la situación C, al aumentar la presión de prensado, la homogeneidad en la distribución de presiones alcanzada en la situación B se siguió manteniendo. Ahora bien, debido al aumento de la densidad aparente de los soporres procesados, el tamaño de las piezas tras la cocción fue ligeramente superior, situándose todas ellas en el calibre 5.

4.3. Aplicabilidad industrial

A la vista de los buenos resultados obtenidos en las experiencias anteriormente descritas, se decidió dejar en funcionamiento el sistema de medida de presiones durante un lote completo de producción de 3500 m². Durante este periodo de tiempo, se regularon de forma manual las posiciones de los bloquitos móviles en base a las medidas de presión efectuadas en los alvéolos.

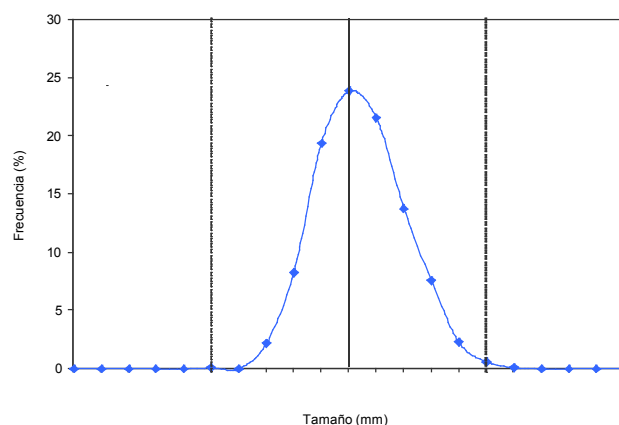


Figura 6. Distribución de tamaños de un lote de producción.

Dichas acciones de control se realizaron con una frecuencia de entorno a 30 minutos y únicamente en base a desviaciones de la presión entre alvéolos de más de 5 bares. En paralelo a estas acciones, el sistema de control automático presión-humedad estuvo activado en todo momento. Tras su conformado y cocción se clasificó el lote completo en una máquina industrial de selección para obtener la distribución de tamaños de pieza representada en el gráfico de la figura 6.

Como puede apreciarse, todas las piezas producidas se agrupan dentro de un mismo calibre (tolerancia 1 mm), siendo la diferencia máxima de tamaños obtenida de 0,7 mm. Estos resultados ponen de manifiesto la gran utilidad de las medidas de presión para realizar el control de la operación de prensado y abren las puertas a la posibilidad de realizar un futuro control automático de la distribución de presiones en el molde, en base a la corrección automática de la posición de los bloquitos en cada ciclo de prensado.

5. CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un sistema de medida en tiempo real capaz de registrar la evolución de la presión de prensado en los alvéolos de una prensa industrial.
- Se ha verificado que existe una relación directa entre la presión registrada en los alvéolos del molde y el resto de las variables características de la operación de prensado.
- Se ha comprobado que las medidas de presión en los alvéolos permiten llevar a cabo el control de la operación de prensado de forma muy precisa, lo cual contribuye a la eliminación de defectos asociados a las diferencias de densidad aparente media entre alvéolos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Instituto de la Pequeña y Mediana Industria Valenciana (IMPIVA) la financiación aportada para su realización, a través del programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico. (IMIDTA/2011/751).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMORÓS, J.L. Pastas cerámicas para pavimentos de monococción: Influencia de las variables de prensado sobre las propiedades de la pieza en crudo y sobre su comportamiento durante el prensado y la cocción. Valencia: Universidad. 1987, p.61 [Tesis doctoral].
- [2] AMORÓS, J.L. ; BAGÁN, V.; ORTS, M.J.; ESCARDINO, A. La operación de prensado en la fabricación de pavimento por monococción: I Influencia de la naturaleza del polvo de prensas sobre las propiedades de la pieza en crudo. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio. 27(5), 273-282, 1988.
- [3] AMORÓS, J.L.; BLASCO, A.; ENRIQUE, J.E., et al. Variables en la compactación de soportes cerámicos de pavimento y revestimiento. Técnica Cerámica, 105, 792-812, 1982.
- [4] MALLOL, G. Control y automatización en la industria cerámica: evolución y perspectivas. En: Qualicer 2006: IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006. pp. Con47-Con72.
- [5] POYATOS, A. et al. Nuevo sistema y metodología para la eliminación de los calibres en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio. 49(2), 147-151, 2010.

- [6] AMORÓS, J.L. ; MALLOL, G. ; MEZQUITA, A., et al. Mejora de la estabilidad dimensional de piezas de gres porcelánico a través de la medida en continuo de la humedad de los soportes prensados. Cerámica Información, 311, 117-126, 2004.
- [7] AMORÓS, J.L. ; ESCARDINO, A. ; BELTRÁN, V. ; ENRIQUE, J.E. Técnicas experimentales del control de la compactación de pavimentos y revestimientos cerámicos. Cerám. cristal, 94, 27-32, 1985.