

Medida de la densidad aparente de baldosas cerámicas de forma rápida, inocua y no destructiva

G. MALLOL, D. LLORENS, J. BOIX, M. AGUILLELLA, L. FOUCARD, J.M. ARNAU

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

Este trabajo ha sido presentado como comunicación oral en el XI World Congress on Ceramic Tile Qualicer. (Castellón, España, 2010)

En el desarrollo de este trabajo se ha estudiado la viabilidad técnica de utilizar una nueva metodología para determinar la distribución de la densidad aparente de piezas cerámicas de cualquier dimensión. La nueva técnica se basa en la medida de la distribución de la presión en el interior del alvéolo de la prensa, utilizando un papel sensible a la presión aplicada, y el empleo del diagrama de compactación de la composición. Se ha puesto a punto el procedimiento y la metodología de medida, estudiándose la influencia de algunos factores externos sobre la misma, su precisión y reproducibilidad. Una vez comprobada la capacidad del método, se ha empleado para obtener las distribuciones de la densidad aparente de piezas cerámicas procesadas industrialmente. El nuevo método de medida es rápido, sencillo de utilizar, no destructivo ni tóxico. La aplicación informática desarrollada permite obtener un mapa de la distribución de la densidad aparente, detectar con facilidad zonas defectuosas y permite un completo análisis de los datos.

Palabras clave: Densidad aparente, Ensayos No Destructivos, Prensado, Cerámica, Mercurio

Rapid, harmless, and non-destructive measurement of ceramic tile bulk density

This study addresses the technical feasibility of using a new method of determining the bulk density distribution in ceramic tiles of all possible sizes. This new technique is based on the measurement of pressure distribution inside the press die cavity, using paper that is sensitive to the applied pressure, in addition to the composition compaction diagram. The measurement procedure and methodology have been fine-tuned, studying how this measurement, together with its precision and reproducibility, is influenced by certain external factors. After the capability of the method had been confirmed, it was used to obtain the bulk density distributions of industrially processed ceramic tiles. This new measuring method is rapid, simple to use, and neither destructive nor toxic. The developed computer application enables a bulk density map to be obtained, defective areas to be readily detected, and allows complete data analysis.

Keywords: Bulk Density; Non Destructive Test; Pressing; Ceramic; Mercury.

1. INTRODUCCIÓN

La porosidad de los soportes cerámicos recién prensados condiciona el comportamiento de las piezas crudas durante su procesado (secado, esmaltado y cocción) y determina, en gran medida, las propiedades del producto final (dimensiones, curvatura, etc.). Este hecho hace necesario el control de la porosidad de los mismos durante su conformado. Dada la dificultad de medir la porosidad de una pieza cerámica, la densidad aparente es la magnitud física realmente medida para controlar la etapa de prensado.

El método más utilizado para medir la densidad aparente de las baldosas crudas ha sido el de inmersión en mercurio (1). Las principales ventajas de este método son su facilidad de uso y la elevada precisión (error absoluto de $\pm 4 \text{ Kg/m}^3$). Sin embargo presenta los inconvenientes de ser destructivo, discontinuo y manual. Además, la elevada toxicidad del mercurio supone un importante riesgo para la salud de los operarios que realizan los controles industriales de compactación. Aunque no existe actualmente una normativa específica en España respecto al trabajo con exposición al mercurio, la Comisión Europea aprobó, con fecha 31 de enero de 2005, la denominada

“Estrategia Comunitaria del mercurio”. La estrategia prevé una serie de acciones encaminadas a reducir las emisiones y la utilización del mercurio tanto a nivel comunitario como a nivel mundial, principalmente con la supresión progresiva de las exportaciones de mercurio hasta el año 2011. Por lo tanto, parece ser que se opta, a nivel comunitario por prohibir el uso del mercurio, antes que legislar de manera activa sobre el uso de dicho metal en la industria. Ello obliga a las industrias a buscar, en un futuro no muy lejano, alternativas al uso del mercurio para medir la densidad aparente de las piezas.

De hecho durante los últimos años se han desarrollado nuevos procedimientos que pueden agruparse de acuerdo con el principio en el que se basan del siguiente modo:

1. *Medida del volumen de la muestra:* a partir del empuje experimentado al sumergir las muestras en agua (2), mediante la reconstrucción del volumen de la muestra utilizando telémetros láser y recubriéndolas con membranas flexibles empleando aire o agua (3).

- Medida de una propiedad directamente relacionada con la densidad aparente de la muestra: absorción de radiación de Rayos X (4) y velocidad de transmisión de ultrasonidos (5).
- Empleo de los diagramas de compactación: instalación de sensores extensiométricos en el interior del punzón para la medida de la presión (6) y medida de la humedad mediante radiación infrarroja (3).

Estudios realizados por el ITC, han puesto de manifiesto que, a igualdad de otras propiedades físico-químicas del polvo atomizado la densidad aparente de los soportes cerámicos recién prensados (D_{ap}) depende exclusivamente de la presión de prensado (P) y de la humedad del polvo atomizado (H). La relación entre estos parámetros constituyen los diagramas de compactación, ampliamente conocidos y utilizados para el control de la operación de prensado.

$$D_{ap} = (AH + B) \ln(P) + (CH + D) \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo A, B, C, D parámetros empíricos de ajuste dependientes de cada composición.

En la actualidad es posible utilizando este tipo de ecuaciones y sensores para medir la humedad del polvo de prensas (3) y la presión máxima de prensado en el circuito hidráulico de la prensa, mantener de forma automática la densidad aparente media de las piezas en el tiempo (3). Sin embargo, igualar la densidad aparente entre piezas de una misma prensada o en el seno de una misma pieza, causa de importantes defectos en el producto final, requiere la medida de la presión media y su distribución en cada uno de los alvéolos de la prensa.

Un primer intento de determinar la distribución de la presión en el interior del alveolo consistió en la instalación de sensores extensiométricos en el interior de los mismos (6). Esta metodología, de gran interés para estudiar la operación industrial de prensado, resulta poco práctica desde el punto de vista del control del proceso debido a su complejidad técnica y elevado coste.

Entre los sistemas actualmente disponibles para medir la distribución de presiones entre dos superficies en contacto (7) (8), se ha elegido el empleo de un papel sensible a la presión. Este papel, especialmente diseñado para esta aplicación, contiene una serie de microcápsulas de tinta en su interior que al ser sometidas a presión se rompen liberando la tinta que contienen, haciendo cambiar la intensidad del color del papel en función de la presión máxima aplicada. El papel sensible a la presión, aunque no permite medir en tiempo real la presión, es adecuado para esta aplicación ya que es fácil de utilizar y de bajo coste.

2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica de utilizar un papel sensible a la presión para estimar la densidad aparente de los soportes de las baldosas cerámicas tras su conformado.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para la realización del trabajo se ha utilizado una composición de gres porcelánico empleada habitualmente en la fabricación de este producto. Utilizando la metodología

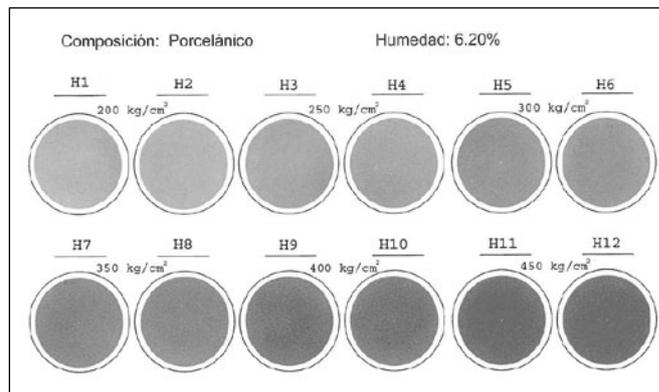


Figura 1. Muestras de papel obtenidas a diferentes presiones.

descrita en otros trabajos (3) se ha obtenido el siguiente diagrama de compactación para este pol

$$D_{ap} = (-2,68 * H + 161) * \ln(P) + 31,2 * H + 900 \quad \text{Ecuación 2}$$

Una vez conocido el diagrama de compactación del polvo, es necesario disponer de la relación entre la intensidad del color del papel y la presión aplicada. El fabricante del papel recomienda obtener esta relación para cada material sobre el que se aplica la presión. Para ello se utilizó un molde metálico de 40 mm de diámetro, en cuya base se situó una porción del papel indicador. Entre los distintos tipos de papel sensible a la presión se escogió uno válido para el rango habitual de presiones en el conformado de azulejos y pavimentos cerámicos a escala industrial (100-500 Kg/cm²).

El polvo atomizado fue acondicionado a una humedad de 0,062 Kg de agua/Kg de sólido seco, pesado e introducido en el molde utilizando un pequeño embudo de vidrio, para así llenarlo siempre del mismo modo. Una vez colocado el pistón dentro del émbolo se vibra el conjunto para conseguir la máxima uniformidad de la carga. El molde con el polvo y el papel se sitúa en la traviesa de una máquina de ensayos universales y se somete a la presión máxima preestablecida. Una vez alcanzada la presión se extraen la probeta y el papel.

Modificando la presión máxima de prensado se obtienen una serie de probetas a diferentes compactidades y fragmentos de papel con distintas intensidades de color (figura 1). Puede observarse como al aumentar la presión de prensado la intensidad de color del papel sensible aumenta.

Escaneando las porciones de papel y empleando el programa informático adecuado es posible calcular las intensidades de color medias de cada una de ellas (I). La intensidad de color se calcula a partir de la medida de las coordenadas cromáticas R, G, B del color de cada una de las porciones del papel y empleando la siguiente ecuación (9):

$$I = 255 - 0,30 * R + 0,59 * G + 0,11 * B \quad \text{Ecuación 3}$$

En la figura 2 se representa la intensidad de color en función de la presión máxima aplicada sobre el polvo atomizado. Se aprecia que la relación entre ambas variables es semi-logarítmica; ajustado los puntos experimentales por regresión lineal se obtiene la ecuación de relación entre ambas variables con un elevado coeficiente de correlación. Esta

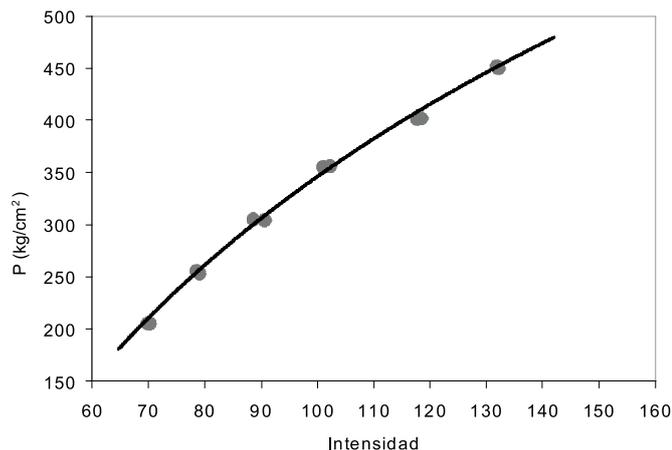


Figura 2. Calibrado del papel.

expresión, combinada con la ecuación 2, permite obtener la siguiente relación:

$$D_{ap} = (-2,68 * H + 161) * \ln(381 * \ln(I) - 1409) + 31,2 * H + 900$$

Ecuación 4

Esta ecuación permite el cálculo de la densidad aparente en cualquier punto de la pieza a partir de la medida de la intensidad de color (I) y de la humedad del polvo atomizado (H).

La aplicación informática diseñada permite obtener imágenes en falso color de la distribución de la presión registrada por el papel así como de la densidad aparente estimada y posibilita un completo tratamiento de estos datos (histogramas de distribución de frecuencias, medida de las variables en áreas elegidas por el usuario, valores máximos y mínimos de presión y densidad, valor de las variables en líneas trazadas por el usuario, imágenes en tres dimensiones, diagramas de isopresión e isodensidad, etc..)

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Validación del método

Con el objetivo de validar el método de medida se prensaron piezas cilíndricas de 40 mm de diámetro a diferentes presiones utilizando la metodología descrita en el apartado anterior y empleando un polvo atomizado de gres porcelánico, acondicionado a tres humedades diferentes (0,04, 0,05 y 0,065 Kg de agua/Kg de sólido seco).

Se midieron las densidades aparente de las piezas obtenidas por el método de inmersión en mercurio y se estimaron a partir de la medida de la intensidad de los papeles empleados durante su compactación, empleando la ecuación 4. En la figura 3 se representan ambos valores, corroborando la validez del método propuesto para estimar la densidad aparente. En efecto todos los valores se sitúan en la diagonal siendo las diferencias entre ambos, en todos los casos, inferiores a $\pm 5 \text{ Kg/m}^3$ (amplitud de las barras de error representadas en la figura 3).

A partir de ensayos de repetitividad en la medida de la intensidad del color del papel y empleando la ecuación 4 se ha obtenido un error absoluto en la medida de la presión de $\pm 4 \text{ Kg/cm}^2$ y de $\pm 3 \text{ Kg/m}^3$ en la estimación de la densidad aparente. Por tanto, el método por sí mismo es suficientemente preciso. Sin embargo, si consideramos que utiliza un diagrama

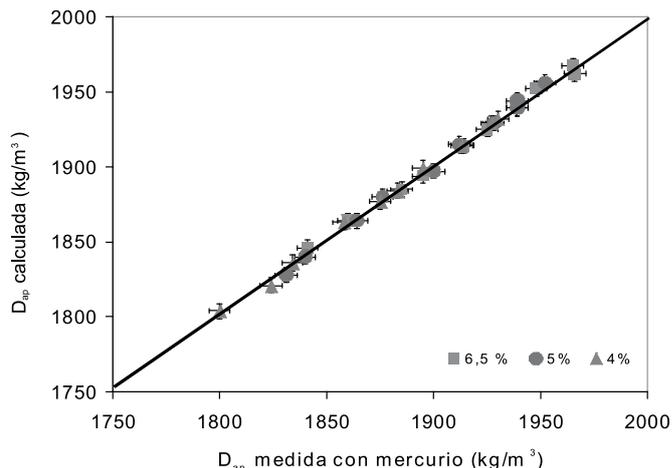


Figura 3. Densidad aparente calculada con el método propuesto y medida por inmersión en mercurio.

de compactación obtenido empleado la inmersión en mercurio para la medida de la densidad aparente de las piezas, el error absoluto total del mismo es de $\pm 7 \text{ Kg/m}^3$.

4.2 Influencia de distintas variables sobre la medida realizada

En esta apartado se estudia la influencia que sobre el calibrado del papel (figura 2) y por tanto sobre la estimación de la densidad aparente tienen las siguientes variables: evolución de la intensidad con el tiempo del papel una vez utilizado, humedad del polvo atomizado, composición del polvo, espesor de la pieza y naturaleza de la superficie sobre la que se aplica la presión.

4.2.1 INFLUENCIA DEL TIEMPO ENTRE LA APLICACIÓN DE LA PRESIÓN Y EL TRATAMIENTO DEL PAPEL

El proceso de fijación de la tinta sobre el papel no es inmediato. Durante un cierto tiempo, como si de un revelado se tratara, la intensidad de color se modifica hasta alcanzar un valor estable (figura 4). En efecto, hasta pasadas unas 17 h el papel no alcanza la intensidad máxima y estable final. Durante este periodo de tiempo la intensidad del color puede aumentar alrededor de un 5%. Por otra parte, durante al menos las tres primeras horas, la pendiente de la curva es muy elevada lo que indica que este parámetro debe ser cuidadosamente controlado, especialmente en estos periodos de tiempo.

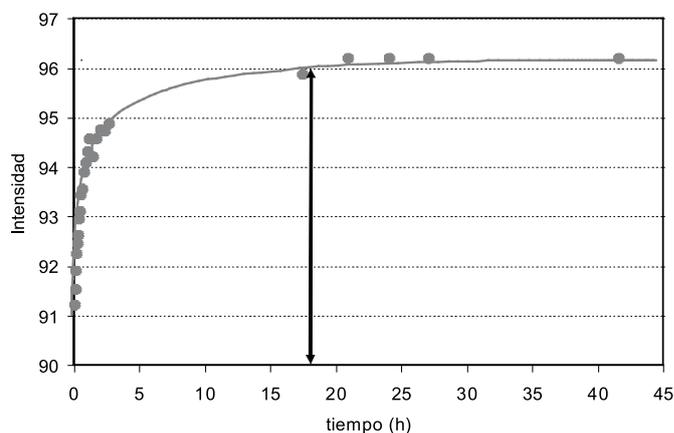


Figura 4. Evolución de la intensidad del papel con el tiempo.

Normalmente, en la práctica industrial se requiere inmediatez en la obtención de los resultados. Por ello, se considera interesante distinguir dos situaciones. Por una parte, si se desea obtener resultados cuantitativos precisos, debe fijarse el tiempo entre el ensayo y el tratamiento del papel y hacerlo coincidir con el utilizado en el calibrado del papel, por ejemplo quince minutos. Por otra parte, si se pretende obtener una distribución de presiones y/o densidades aparentes cualitativa, para saber si se está realizando una correcta carga del molde, el tratamiento de la imagen puede ser inmediato.

4.2.2 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD DEL POLVO ATOMIZADO

Para estudiar la influencia de la humedad sobre la relación $P=f(I)$ se prensaron probetas de polvo atomizado de gres porcelánico a diferentes presiones empleando un polvo cuya humedad se había acondicionado previamente en 0,04 Kg de agua/Kg de sólido seco. La metodología seguida es la descrita en el apartado 3. En la figura 5 se representan los resultados obtenidos. Se aprecia que los puntos correspondientes a un lecho de polvo atomizado de 0,04 Kg de agua/Kg de sólido seco (cuadros sólidos) se encuentran sobre la línea de calibrado del papel, obtenida para un polvo de la misma composición (gres porcelánico) pero con una humedad diferente (0,06 Kg de agua/Kg de sólido seco). Estos resultados indican que, en las condiciones de realización de los experimentos y los niveles de humedad estudiados, esta variable no influye sobre el calibrado del papel.

4.2.3 INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN DEL POLVO

Para analizar el efecto de la composición del polvo sobre el calibrado del papel se prensaron piezas siguiendo la metodología del apartado 3 y utilizando un polvo atomizado de gres rojo, a 200, 250, 300, 350, 400 y 450 Kg/cm² y una humedad de 0,06 Kg de agua/Kg de polvo seco. En la figura 5 se presentan los resultados obtenidos (triángulos sólidos). Se aprecia que los puntos correspondientes a la composición de gres rojo, se sitúan cerca de la línea representativa del gres porcelánico por lo que la composición no parece tener mucha influencia sobre el calibrado del papel.

4.2.4 INFLUENCIA DEL ESPESOR FINAL DE LAS PIEZAS

Para estudiar la influencia del espesor de las piezas se prensaron probetas de diferente espesor en el intervalo industrial de trabajo (5,5 a 10,5 mm) aplicando dos presiones máximas de prensado distintas, 300 y 400 Kg/cm² y utilizando un polvo de gres porcelánico. Los resultados se muestran en la figura 5 (símbolos huecos). Se aprecia que los puntos representativos de los diferentes espesores se encuentran muy cerca de la línea base, con lo cual se concluye que en los niveles de espesor ensayados, esta variable no influye significativamente sobre el calibrado del papel.

4.2.5 INFLUENCIA DE LA NATURALEZA DE LA SUPERFICIE SOBRE LA QUE SE APLICA LA PRESIÓN

La superficie de los punzones que entra en contacto directamente con el polvo atomizado es una goma de gran resistencia a la abrasión y diferente dureza, que se vulcaniza

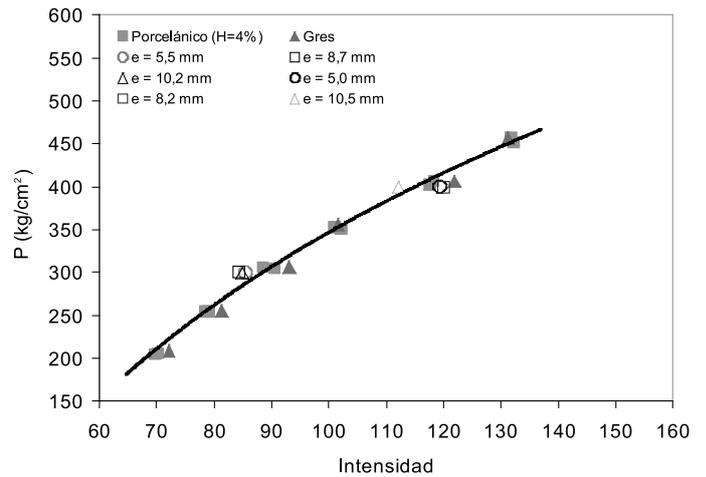


Figura 5. Influencia de la humedad, la composición y el espesor final de la pieza sobre la relación $P=f(I)$.

directamente sobre la parte metálica del punzón. Para estudiar la influencia de la naturaleza de la superficie que transmite la presión sobre el polvo atomizado se han prensado probetas utilizando cuatro tipos de punzones. Dos de ellos tiene la superficie en contacto con el polvo metálica, uno es cilíndrico de 40 mm de diámetro (referenciado como metálico cilíndrico) y el otro cuadrado de 15 cm de lado (referenciado como metálico cuadrado). Los otros dos punzones son similares al metálico cuadrado recubriendo la parte en contacto con el polvo con dos gomas de diferente dureza (referencias Shore A 90-92 y Shore A 96-98).

En la figura 6 se recogen los resultados obtenidos en los experimentos realizados (símbolos macizos). En la misma se aprecia que, aunque el comportamiento de todas las superficies ensayadas es similar, éste difiere del observado hasta ahora. En efecto, la curva de calibrado inicial del papel (trazo continuo) parece haberse desplazado ligeramente hacia arriba (trazo discontinuo).

Dado que el papel empleado en este experimento es de un lote diferente al utilizando en el resto de los ensayos, se decidió comparar el comportamiento de los diferentes lotes. Para ello se aplicó sobre papeles de los tres lotes distintos disponibles una misma presión de 300 Kg/cm². Posteriormente los papeles fueron tratados y calculada la intensidad de los mismos. En la figura 6 se presentan los resultados obtenidos en símbolos huecos. Se aprecia que mientras el papel procedente de los lotes 1 y 2 tiene un comportamiento similar (círculo y cuadro respectivamente) y cercano al calibrado inicial, los puntos representativos del lote 3 (rombos) presentan una menor intensidad de color para la misma presión, alineándose con los puntos correspondientes al experimento anterior (empleando superficies de diferente naturaleza), en el que también se ha utilizado este mismo papel. A la vista de estos resultados se decidió obtener la nueva curva de calibrado del papel obteniendo la curva a trazos que se presenta en la figura anterior. De los resultados obtenidos puede decirse que, para que los cálculos tengan la suficiente precisión, debe controlarse la curva de calibrado del papel al menos cuando se cambia de lote.

4.3 Ensayos realizados a escala industrial

Los ensayos a escala industrial se realizaron en una prensa hidráulica de las habitualmente utilizadas para la obtención de los soportes de las baldosas cerámicas, equipada con

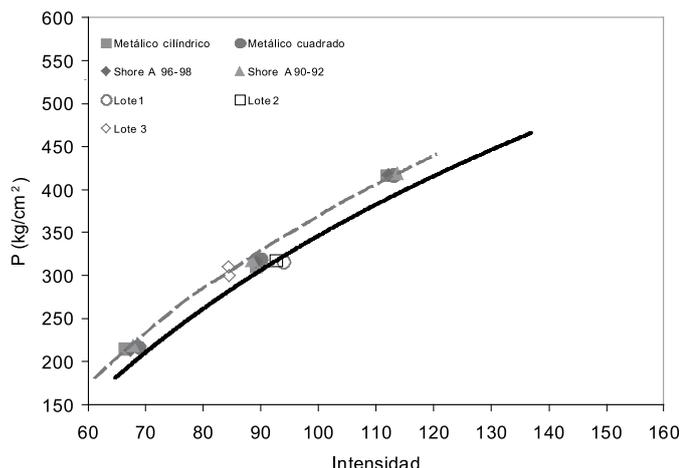


Figura 6. Influencia de la superficie de contacto y del lote del papel sobre el calibrado.

punzones superiores isostáticos. En la misma se estaban fabricando cuatro piezas por golpe de gres porcelánico, de formato nominal en cocido 33 cm x 33 cm, cuyo diagrama de compactación corresponde a la ecuación 2.

En este caso la medida de la distribución de la presión en el interior de los alvéolos de la prensa se ha realizado colocando el papel sensible sobre el punzón inferior (cara lisa) de la prensa. Para ello es necesario parar momentáneamente la prensa, situar los papeles, y ejecutar el ciclo programado de prensado. Finalmente se para la prensa y se retiran las piezas recién prensadas y los papeles para su tratamiento posterior.

4.3.1 ENSAYOS DE MEDIDA DE LA PRESIÓN Y DE LA DENSIDAD APARENTE MEDIAS

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente se prensaron 8 piezas a 355 y 290 Kg/cm² de presión, obteniéndose dos series (serie 1 y serie 2 respectivamente) de cuatro piezas cada una. En la figura 7 se presentan los mapas en falso color de la distribución de las presiones de ambas series, los valores estimados de la presión máxima (P_{max}) y densidad aparente medias ($D_{ap\ papel}$) de cada pieza, así como los de la densidad media de las piezas medidos por inmersión en mercurio ($D_{ap\ mercurio}$).

Obsérvese en primer lugar que la densidad estimada a partir del papel sensible, y la medida por el mercurio están muy cercanas, lo cual corrobora la validez del método utilizado a escala industrial.

Los mapas en falso color permiten detectar, de un golpe de vista, la pieza que ha sido compactada a una mayor presión; en este caso corresponde obviamente a una pieza de la serie 1, la procesada en el alvéolo 2. Esta pieza se ha compactado a una presión máxima de 341 Kg/cm², siendo la que presenta una mayor densidad aparente (1943 Kg/m³). Tal y como era de prever, las piezas de la serie 2 han alcanzado todas ellas menores presiones y por tanto presentan menores densidades aparentes.

El sistema utilizado en la medida de la presión permite cuantificar, por primera vez, la presión media máxima alcanzada en los diferentes alvéolos de la prensa en una misma prensada. Mientras que la presión se modifica de manera considerable de unas piezas a otras en la serie 1, es

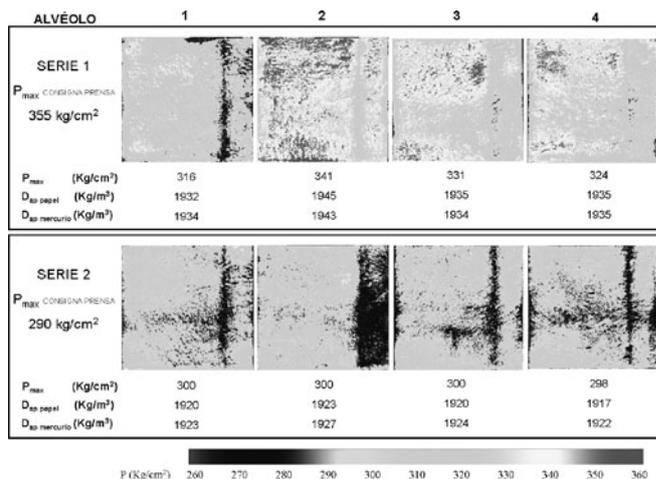


Figura 7. Gráficos en falso color de la distribución de las presiones, valores de las presiones y de las densidades aparentes medias.

mucho más uniforme en las de la serie 2, compactadas todas ellas a menor presión. En efecto, la diferencia de presión en las piezas de la serie 1 llega a alcanzar los 25 Kg/cm² (entre las piezas 1 y 2), mientras que en la serie 2 apenas alcanza los 2 Kg/cm². Como resultado de ello, las piezas de la serie 2 presentan una densidad aparente media más uniforme, apenas 5 Kg/m³ de diferencia entre ellas, mientras que este valor asciende hasta 9 Kg/m³ en las piezas de la serie 1, diferencia que puede llegar a ocasionar un calibre en composiciones de gres porcelánico.

En las piezas de la serie 1 la presión aplicada sobre las piezas situadas en los laterales de la prensa (alvéolos 1 y 4) es sensiblemente menor que la de las piezas situadas en el centro. Este hecho, conocido de manera empírica debido a la diferente densidad aparente de las piezas prensada habitualmente en estas posiciones, no puede cuantificarse con los métodos actuales.

4.3.2 MEDIDA DE DISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN Y DE LA DENSIDAD APARENTE EN EL SENO DE UNA PIEZA

Con el objetivo de evaluar la validez del método propuesto para estimar la distribución de la densidad aparente en el interior de las piezas, se han realizado maniobras en la prensa industrial para conseguir mayores densidades aparentes en la zona delantera de las baldosas. Una vez realizadas las maniobras, se determina la densidad aparente por inmersión en mercurio de 16 porciones de las piezas. Asimismo, a partir del papel sensible, se obtiene la presión en cada una de estas zonas y se estima la densidad aparente en las mismas a partir del valor de dichas presiones. Los resultados obtenidos para una de las piezas se muestran en la figura 8; en la misma se presentan además los valores medios de estas variables para toda la pieza y en cada una de las filas y columnas.

En primer lugar indicar que los valores de la densidad aparente obtenidos por ambos métodos (inmersión en mercurio (segundos de los valores) y estimados a partir de la presión (terceros valores)) son parecidos, aunque las diferencias máximas son mayores a las encontradas entre los valores medios de toda la pieza (figura 7 y figura 8). Este hecho puede ser debido a la dificultad en hacer corresponder exactamente las porciones de las piezas con la superficie empleada para medir la presión en cada área, debido fundamentalmente

Valores medios		P_{max} (Kg/cm ²)	328		
		$D_{ap\ papel}$ (Kg/m ³)	1935		
		$D_{ap\ mercurio}$ (Kg/m ³)	1933		
	A	B	C	D	
1	323 1933 1930	314 1929 1924	312 1928 1923	315 1930 1933	316 1930 1928
2	315 1930 1924	315 1930 1923	313 1929 1921	308 1926 1926	313 1929 1923
3	326 1935 1931	320 1932 1928	315 1930 1925	317 1931 1934	320 1932 1929
4	426 1973 1970	347 1944 1931	330 1936 1940	349 1944 1930	363 1949 1952
	348 1943 1938	324 1934 1931	318 1931 1927	322 1933 1936	

Figura 8. Valores de Presión, D_{ap} estimada con el papel sensible y D_{ap} medida por inmersión en mercurio ($P/D_{ap\ papel}/D_{ap\ mercurio}$).

a la irregularidad en el corte de las piezas. Este efecto tiene más incidencia en la medida de los valores zonales de las densidades (trozos de pieza) que en los valores medios de la misma.

Tal y como era de prever la mayor densidad aparente corresponde a la zona delantera de la pieza (fila 4). En efecto, en esta fila la presión media (363 Kg/cm²) es mucho mayor que la de la pieza (328 Kg/cm²); asimismo, la densidad aparente correspondiente a esta fila (1952 Kg/m³) es también más elevada que la media (1933 Kg/cm³). Concretamente la zona de mayor presión medida corresponde a la porción A4, con 426 Kg/cm² (zona roja de la pieza); asimismo, es este trozo el que presenta una mayor densidad aparente, tanto la medida por inmersión en mercurio (1970 Kg/m³) como la estimada a partir de la determinación de la presión (1973 Kg/m³).

Por lo que respecta al resto de las filas, la distribución de la presión y de la densidad aparente es muy uniforme. En efecto, la diferencia máxima en la densidad aparente media entre filas 1, 2 y 3, es de apenas 6 Kg/m³, situándose los valores más bajos de densidad en la fila 2. Estos valores tan homogéneos de la densidad aparente en esta zona de la pieza pueden hacer que las áreas menos densas identificadas por los distintos métodos, aunque están muy próximas, no coincidan exactamente. En efecto, mientras que la densidad aparente mínima medida por inmersión en mercurio corresponde a la zona C2 (1921 Kg/m³), la estimada a partir de la presión se encuentra en la zona D2 (1926 Kg/m³), perteneciente a la misma fila la anterior y adyacente a la misma.

Finalmente destacar que la variación máxima de densidad aparente detectada por ambos métodos es muy parecida, 48 Kg/m³ en el caso del método de inmersión en mercurio (zonas A4-C2) y 46 Kg/m³ para el método del papel sensible (zonas A4-D2). Los resultados obtenidos con el resto de las piezas ensayas son similares, lo cual corrobora la validez del método propuesto. Nótese además que la información aportada por el papel sensible es mucho más rica que la del método de inmersión en mercurio al permitir un análisis continuo, no puntual ni discreto como el mercurio, de la distribución de la presión y por tanto de la densidad aparente en el interior de la pieza.

5. CONCLUSIONES

Del trabajo realizado pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La medida de la distribución de la presión máxima de prensado en el interior del alveolo, utilizando un papel sensible, es una medida precisa (± 4 Kg/m²) lo cual permite estimar la densidad aparente de la piezas con una diferencia de ± 5 Kg/m³ con respecto al método de inmersión en mercurio.
- Si se desea realizar una estimación precisa de la densidad aparente es muy importante controlar el tiempo entre la aplicación de la presión y el posterior tratamiento del papel, así como establecer un control de la recta del calibrado del papel al menos una vez por cada lote nuevo a emplear. Si se utiliza este método con fines puramente cualitativos estos aspectos son menos importantes.
- La humedad del polvo, su composición, el espesor final de la pieza así como la naturaleza de la superficie que aplica la presión sobre el polvo, no tienen una influencia relevante sobre los resultados de la media.
- La aplicación del método de medida en una prensa industrial permite obtener de forma rápida, inocua, no destructiva y precisa, la distribución de la presión máxima aplicada sobre las piezas en el interior del alveolo y de su densidad aparente.

BIBLIOGRAFÍA

1. J.L. Amorós; V. Beltrán; A. Blasco; C. Felú; M. Sancho-Tello. Técnicas experimentales del control de la compactación de pavimentos y revestimientos cerámicos. *Téc. Cerám.*, 116, 1234-1246, 1983.
2. J.E. Enrique; J. García; J.L. Amorós; V. Beltrán. Alternativas al método de inmersión en mercurio para la determinación de la densidad aparente de baldosas cerámicas. *Téc. Cerám.*, 250, 18-27, 1997.
3. G. Mallol. 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.
4. J.L. Amorós; C. Felú; D. Llorens; V. Cantavella; A. Mezquita. Medida no destructiva de la densidad aparente de piezas en crudo mediante absorción de rayos X. 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. PBC69-PBC82.
5. V. Cantavella; D. Llorens; A. Mezquita; C. Moltó; M.C. Bhardwaj; P. Vilanova; J. Ferrando; S. Maldonado-Zagal. Uso de la técnica de ultrasonidos para medir la densidad aparente de baldosas en crudo y optimizar el proceso de prensado. 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. PBC165-PBC178.
6. A. Blasco; D. Llorens; G. Mallol; J.C. Jarque. Experimental study of the determination of dry compaction of ware shaped by unidirectional pressing, in continuous operation and in true time. *Tile Brick Int.*, 8(6), 424-438, 1992.
7. L. Barbagallo; G. Shen; A. Jones; M. Swain; P. Petocz; M. Darendeliler. A novel pressure film approach for determining the force imparted by clear renovable thermoplastic appliances. *Ann. Biomed. Eng.*, 36(2), 335-341.
8. W. Kurniawan; R. Tjandra; E. Obermeier. Bulk-type piezoresistive force sensor for high pressure applications. *Procedia Chem.*, 1, 544-547, 2009.
9. W. Schroeder; K. Martin; B. Lorenzen. *The Visualization Toolkit user's guide: install, use and extend the Visualization Toolkit*. [s.l.]: Kitware, 2006.

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 apoyo a la I+D en centros tecnológicos de la red IMPIVA.

Recibido: 16/07/2010

Aceptado: 15/11/2010