

ESTUDIO DE LA OPERACIÓN DE PRENSADO DE BALDOSAS DE GRAN FORMATO UTILIZANDO LA ABSORCIÓN DE RAYOS X

**⁽¹⁾ J.L. Amorós, ⁽¹⁾ G. Mallol, ⁽¹⁾ D. Llorens, ⁽¹⁾ J. Boix, ⁽¹⁾ J.M. Arnau,
⁽¹⁾ C.Feliu, ⁽²⁾ J.A. Cerisuelo, ⁽²⁾ J.J. Gargallo**

⁽¹⁾ Instituto de Tecnología Cerámica (ITC).

Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE).

Universitat Jaume I. Castellón. España.

⁽²⁾ Zirconio, S.A. Villarreal, Castellón. España

RESUMEN

Se ha diseñado, construido y patentado un equipo capaz de determinar de manera no destructiva la distribución de la densidad aparente en el seno de piezas cerámicas de grandes dimensiones. El método de medida propuesto, basado en la técnica de absorción de rayos X, presenta múltiples ventajas con respecto a los empleados hasta el momento: permite obtener mapas completos de la distribución de la densidad aparente de las piezas y no es destructivo ni tóxico. Para la realización de las medidas se utiliza un tubo emisor de rayos X de baja potencia. El instrumento de medida cuenta con una cabina de blindaje dotada de elementos de seguridad.

Mediante esta técnica se han examinado piezas cerámicas obtenidas en distintas condiciones industriales, modificando los parámetros de funcionamiento de la prensa. La utilización de telémetros láser de alta precisión permite obtener además un mapa de espesores de las piezas analizadas, a partir del cual puede conocerse la distribución de masa en el seno de las mismas. La combinación de estas tres variables: densidad aparente, espesor y masa, facilita enormemente la interpretación de defectos de fabricación que pueden originarse en el conformado y/o la etapa de cocción.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Métodos de medida de la densidad aparente.

La porosidad de los soportes para baldosas cerámicas incide de manera decisiva en 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, resistencia a la helada, resistencia mecánica, presencia de corazón negro, acabado superficial, etc.). Este hecho hace imprescindible realizar un control exhaustivo de la porosidad de los soportes recién prensados, con el fin de asegurar el buen desarrollo del resto del proceso y mantener las propiedades del producto final dentro de los márgenes de variación preestablecidos [1]. En la práctica industrial, dada la dificultad que supondría realizar medidas directas de la porosidad de las piezas cerámicas, la magnitud física realmente controlada es la densidad aparente de los soportes crudos.

Históricamente, la determinación de la densidad aparente de las baldosas crudas se ha realizado mediante el método de inmersión en mercurio. Esta técnica destructiva presenta como principales ventajas su facilidad de uso y su elevada precisión (error absoluto de $\pm 4 \text{ kg/m}^3$ [2]). Sin embargo, se trata de un método destructivo, discontinuo y manual, y además, la elevada toxicidad del mercurio supone un importante riesgo para la salud de los operarios que realizan los controles industriales de compactación. Estos inconvenientes han motivado durante los últimos años la búsqueda y desarrollo de nuevos procedimientos para la determinación de la densidad aparente de piezas cerámicas [3]. Las primeras mejoras realizadas consistieron en la determinación del volumen de las muestras a partir del empuje experimentado al sumergirlas en agua. Aunque la exactitud de la medida de la densidad aparente era aceptable, este nuevo procedimiento no tuvo excesiva aceptación a nivel industrial, ya que era más laborioso y seguía siendo destructivo, discontinuo y manual.

Posteriormente, aparecieron una serie de dispositivos que permitían medir la densidad aparente de muestras seccionadas de una baldosa a partir de la determinación de su volumen aparente por un método distinto al de la inmersión en un líquido. Entre estos métodos destacaban, por una parte, la reconstrucción del volumen de la muestra utilizando telémetros láser, y por otra parte, un método basado en la medida del volumen de agua desplazado por la muestra cuando era introducida, protegida por una membrana plástica, en el seno de una masa de agua. Pese a la buena precisión en la medida proporcionada por algunos de estos equipos, el método utilizado seguía siendo destructivo y discreto.

Más recientemente, el Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) ha publicado una serie de trabajos de investigación [4][5] en los que se presentaron dos prototipos destinados a la determinación de la densidad aparente de baldosas cerámicas mediante métodos basados en la medida de una propiedad directamente relacionada con la densidad aparente. Estos métodos no destructivos son el método de

los ultrasonidos sin contacto, y el método de la absorción de rayos X. A diferencia de todos los anteriores, estos métodos presentaban la ventaja de ser no destructivos, lo que posibilita la obtención de mapas de la distribución de densidad aparente de piezas completas. A raíz de los buenos resultados obtenidos en estos trabajos, se decidió abordar el desarrollo y construcción de un instrumento para la medida no destructiva, mediante absorción de rayos X, de la distribución de densidad aparente en el seno de piezas cerámicas industriales [6]. En el presente trabajo se exponen las características técnicas más importantes del instrumento, así como una serie de experiencias que demuestran la capacidad del sistema para estudiar las condiciones de conformado de las baldosas cerámicas.

1.2. Medida de la densidad aparente por absorción de rayos X.

La medida de la densidad aparente por absorción de rayos X está basada en la conocida como ley de absorción de Lambert-Beer, según la cual, cuando una radiación electromagnética atraviesa un medio material dado, la fracción de radiación incidente que es absorbida por el material depende exclusivamente de su naturaleza química, de su espesor y de su densidad aparente [7]. La ecuación 1 representa la ley de Lambert-Beer aplicada a una radiación monocromática y a un medio material perfectamente homogéneo en todo su espesor:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu h \rho}$$

Ecuación 1.

siendo I_0 la intensidad de la radiación incidente, I la intensidad de la radiación transmitida, h el espesor del material, ρ la densidad aparente y μ el coeficiente de absorción másico para la longitud de onda de la radiación.

Es decir, si la naturaleza del material no se modifica y se conoce su espesor, es posible determinar la densidad aparente del mismo, a partir de la cantidad de energía absorbida. Ahora bien, en la práctica, la ecuación 1 es sólo aproximada, ya que los tubos de rayos X utilizados habitualmente para realizar este tipo de ensayos emiten radiación policromática y los materiales analizados no suelen ser homogéneos. Este hecho complica significativamente las relaciones entre la intensidad de radiación transmitida y el coeficiente de absorción de rayos X, el cual depende de la longitud de onda de la radiación incidente [8]. Si se asume que la región de análisis es lo suficientemente pequeña como para considerarse homogénea, la medida de la densidad aparente no se vería limitada por las heterogeneidades del material. En cambio, la dependencia del coeficiente de absorción con la energía de la radiación incidente dificulta enormemente la resolución analítica de la ecuación 1 con vistas a calcular la densidad del material. Por esta razón, en la práctica, lo más sencillo es obtener el coeficiente de absorción del material que se desea analizar mediante un calibrado previo.

En la figura 1 se muestra el esquema de funcionamiento del instrumento desarrollado para llevar a cabo la medida de la densidad aparente. La pieza a examinar (1) se sitúa en posición vertical sobre un bastidor metálico (ver figura 2) sobre el cual se desplaza una placa metálica a bordo de la cual está instalado el sistema de telemetría (2), encargado de medir el espesor de la pieza, el tubo emisor de rayos X (3) y el sensor de radiación (4). Durante la ejecución de los ensayos el sistema de medida realiza barridos sucesivos de derecha a izquierda, a una velocidad máxima de 1000 mm/s, con un desplazamiento vertical mínimo entre las líneas horizontales de 1 mm. A medida que se desplaza sobre la pieza, el dispositivo toma medidas de su espesor y de la intensidad de radiación que la atraviesa, con una velocidad de muestreo de 10 datos por milímetro.

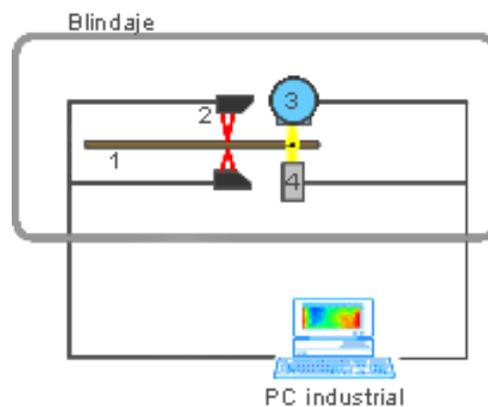


Figura 1. Esquema de funcionamiento del equipo de medida de densidad aparente por absorción de rayos X.

Todo el sistema de movimiento y medida se encuentra confinado dentro de un blindaje de plomo que impide las fugas de la radiación emitida por el tubo de rayos X. Las señales procedentes de los diferentes sensores de medida y del sistema de movimiento son introducidas en un PC en el cual reside un programa informático especialmente desarrollado para esta aplicación, que se encarga de gestionar el funcionamiento del instrumento, tanto desde el punto de vista de la gestión de movimientos, como del tratamiento de datos y de la representación gráfica.



Figura 2. Bastidor interno y vista general del instrumento de medida de la densidad aparente.

El tubo de rayos X instalado tiene una potencia de 50 W y el sensor de radiación empleado es un fotodiodo centelleador cerámico. El instrumento ha sido diseñado para poder ensayar piezas industriales crudas de formato nominal máximo 120 cm x 60 cm y espesores de hasta 20 mm. Trabajando a una velocidad de 500 mm/s y con un espaciado entre líneas verticales de 5 mm, el análisis de una pieza de formato 120 cm x 60 cm tiene lugar en un tiempo aproximado de 10 minutos.

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

La medida de la densidad aparente por absorción de rayos X requiere de un calibrado previo que establezca la relación entre la densidad aparente del material analizado y la atenuación experimentada por la radiación. El programa informático desarrollado dispone de una subrutina que permite confeccionar los calibrados a partir de una serie de probetas del mismo material que se desea analizar. Habitualmente, el procedimiento de calibrado se lleva a cabo con probetas cilíndricas, las cuales se colocan en un soporte metálico (ver figura 3) para ser analizadas obteniendo el valor medio de su espesor y de la intensidad de radiación transmitida a través de cada una. Con estos datos y las densidades aparentes de cada probeta determinadas mediante un método de referencia el programa ajusta los datos experimentales a la ecuación 1 proporcionando los valores de I_0 (V) y de μ (m^2/kg) característicos del material estudiado.

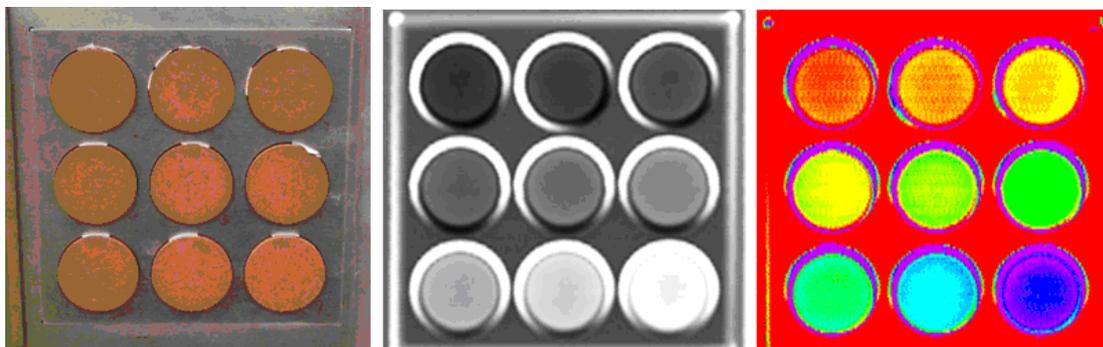


Figura 3. De izquierda a derecha, soporte para la sujeción de probetas de calibrado, radiografía de las probetas y mapa de densidad aparente.

La aplicación informática tiene capacidad para almacenar múltiples calibrados con el fin de ensayar materiales de diferente naturaleza. La realización de un ensayo consiste básicamente en colocar la pieza a analizar en el interior del instrumento para, una vez cerrado el blindaje, seleccionar el calibrado correspondiente e iniciar el ensayo con unas condiciones del tubo de rayos X y de velocidad de escaneo determinadas.

A medida que se realiza el ensayo, es posible visualizar los valores de espesor, intensidad de rayos X y densidad aparente calculada. Los ensayos pueden realizarse simultáneamente sobre varias piezas colocadas en paralelo, siempre y

cuando el tamaño total del conjunto no exceda el límite máximo de la zona de inspección del instrumento.

Para la realización de los experimentos de medida de la densidad aparente expuestos en este trabajo se han utilizado dos composiciones de polvo atomizado habitualmente empleadas para la fabricación de baldosas cerámicas de pavimento gresificado y gres porcelánico. El conformado de piezas a nivel de laboratorio se ha realizado en una prensa hidráulica equipada, en función de las necesidades de la experimentación, con un molde cilíndrico de 3 cm de diámetro o un molde cuadrado de 10 cm x 10 cm. Los trabajos desarrollados a nivel industrial se llevaron a cabo en una prensa hidráulica industrial destinada a la producción de piezas de gres porcelánico de diferentes formatos.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. Evaluación de la precisión del método de medida.

Para evaluar la precisión del método de medida de la densidad por absorción de rayos X se prepararon cinco probetas de gres rojo de formato 10 cm x 10 cm por prensado a cinco presiones máximas diferentes y se secaron hasta pesada constante en una estufa de laboratorio a 110°C. Tras obtener la densidad aparente de las probetas por inmersión en mercurio, se determinaron, haciendo uso de un calibrado previamente realizado, sus distribuciones de densidad aparente. Este ensayo se repitió un total de diez veces con el fin de evaluar la repetibilidad del método de medida.

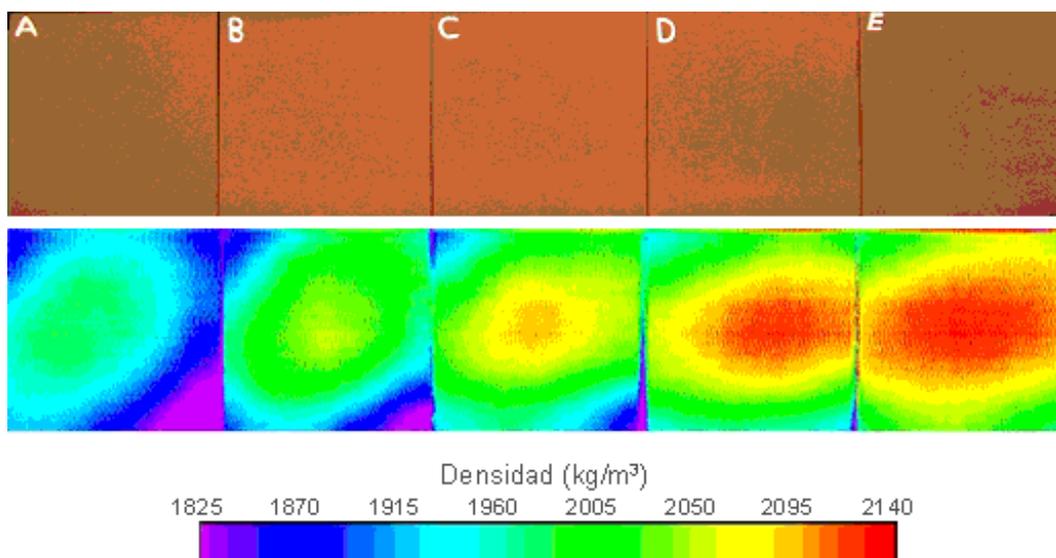


Figura 4. Probetas empleadas para evaluar la precisión del método de absorción de rayos X (arriba) y mapas de distribución de la densidad aparente (abajo).

En la parte superior de la figura 4 se muestran las cinco probetas analizadas y, en la parte inferior, los mapas de distribución de la densidad aparente obtenidos

tras la realización del primer ensayo. En la tabla 1 se recogen los valores de la densidad aparente medidos por el método de inmersión en mercurio y los valores de la densidad estimada por absorción de rayos X en cada uno de los ensayos realizados. Como puede observarse, el acuerdo entre ambos métodos es muy bueno, siendo el error máximo (diferencia entre la medida por absorción de rayos X y la medida por inmersión en mercurio) de 6 kg/m³ y el error absoluto medio de 2 kg/m³.

Ref.	Densidad aparente por inmersión (kg/m ³)	Densidad aparente por absorción de rayos X (kg/m ³)										Pro-medio
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A	1923	1920	1923	1923	1924	1923	1925	1924	1922	1920	1924	1923
B	1981	1978	1979	1979	1981	1981	1982	1982	1982	1982	1983	1981
C	2023	2020	2021	2021	2025	2024	2026	2026	2026	2026	2026	2024
D	2056	2056	2058	2055	2059	2059	2061	2061	2061	2061	2062	2059
E	2089	2083	2085	2083	2086	2086	2087	2086	2087	2087	2088	2086

Tabla 1. Densidades aparentes medias obtenidas en los ensayos de repetibilidad realizados con probetas de gres rojo de dimensiones 10 cm x 10 cm.

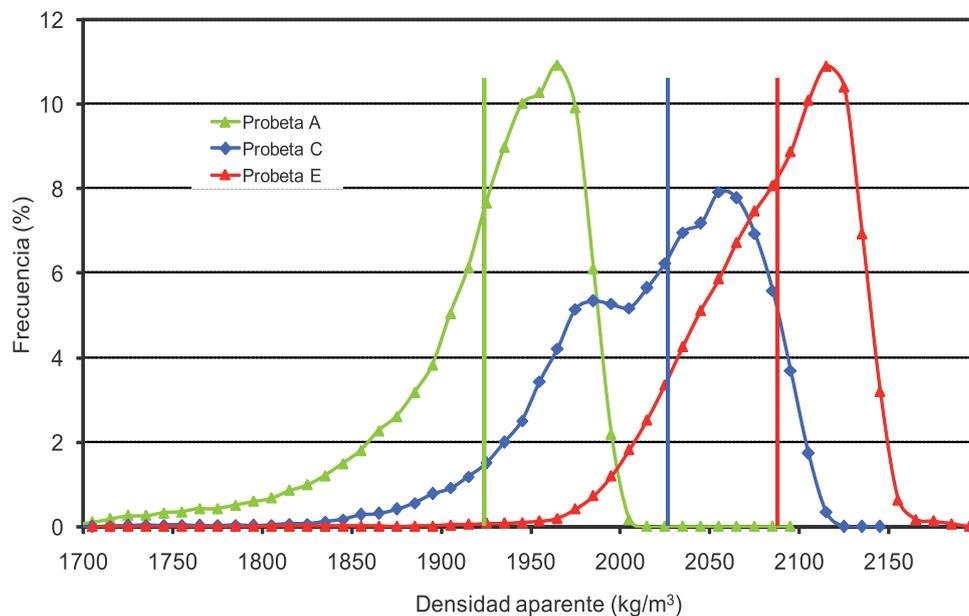


Figura 5. Histogramas de las distribuciones de densidades aparentes en el seno de las piezas A, C y E obtenidas por absorción de rayos X.

Es interesante destacar que el método de medida de densidad por absorción de rayos X no solamente tiene la precisión requerida, sino que además, proporciona más información que el resto de métodos utilizados hasta el momento. En efecto, si se observa el mapa de distribución de densidad aparente de las probetas ensayadas, mostrado en la figura 4, puede comprobarse que dentro de cada pieza existe una distribución de densidades aparentes muy heterogénea, que no es revelada por la medida en mercurio.

A modo de ejemplo, en la figura 5, se ha representado el histograma de la distribución de densidades aparentes medidas por absorción de rayos X, correspondiente a las piezas A, C y E, junto con el valor de la densidad aparente media obtenido por inmersión en mercurio (líneas verticales de trazo continuo). Como puede verse, en el caso de la pieza C, el método de absorción de rayos X proporciona información sobre una variación de densidad aparente de aproximadamente 260 kg/m³, en cambio, el método de inmersión en mercurio, tan sólo indica que el valor medio de la densidad aparente de la pieza es de 2.023 kg/m³.

3.2. Utilización de la técnica de absorción de rayos X para el estudio de la operación de prensado de baldosas cerámicas.

3.2.1. Detección de diferencias de carga, espesor y densidad aparente en el seno de piezas cerámicas.

Con vistas a evaluar la utilidad del instrumento para estudiar la operación de prensado de baldosas cerámicas, se analizaron varias piezas industriales con relieve y formato nominal 33 cm x 33 cm obtenidas en diferentes condiciones de prensado. Para ello, se llevaron a cabo una serie de maniobras en una prensa industrial equipada con un molde penetrante convencional de cuatro salidas dotadas de punzones superiores isostáticos destinados a paliar las posibles deficiencias de la carga en los alvéolos.

Maniobra	Presión máxima (kgf/cm ²)	Distribución de la carga
1	335	Convencional
2	285	Convencional
3	335	Trasera
4	335	Delantera

Tabla 2. Maniobras de modificación de la presión máxima de prensado y de carga de polvo atomizado en una prensa industrial.

En la tabla 2 quedan resumidas las condiciones en las que se realizaron las maniobras, las cuales consistieron, básicamente, en la modificación de la presión máxima del ciclo de prensado y/o de la distribución de la carga de polvo atomizado en los alvéolos de la prensa.

3.2.1.1. Determinación de la distribución de carga.

En la figura 6 se muestran las distribuciones de masa superficial (producto ρh) correspondientes a las cuatro piezas obtenidas en cada una de las maniobras realizadas, junto con los valores medios de la masa superficial (indicados debajo de los mapas de distribución) de cada pieza, correspondiéndose la parte inferior de las imágenes con la parte delantera del molde. Estas representaciones proporcionan información sobre la distribución de la carga en el seno de los alvéolos de la prensa en el momento de aplicar la presión máxima de prensado.

Como puede apreciarse, tanto la distribución de masa superficial, como los valores medios de masa superficial de cada pieza, en las dos primeras maniobras son muy similares, ya que la única diferencia entre ellas es la presión máxima de prensado alcanzada, habiéndose realizado la carga del polvo atomizado en las mismas condiciones. Cabe destacar que en ambas maniobras, la pieza correspondiente al plato 4 presenta una masa sensiblemente inferior a la del resto de piezas. Del mismo modo, se observa que todas las piezas, independientemente de la posición en la que han sido prensadas, presentan la carga ligeramente desplazada hacia la parte delantera del alvéolo.

El análisis de las distribuciones de masa correspondientes a las piezas de la maniobra 3 revela un aumento considerable de la masa introducida en los alvéolos y un desplazamiento de la carga hacia la parte trasera del molde, con respecto a los valores obtenidos en las maniobras 1 y 2. Este cambio en la distribución de la masa se consiguió anulando la corrección en la posición de los punzones inferiores que se producía en las maniobras 1 y 2 al retroceder el sistema de carga de polvo. Dicha corrección, permitía eliminar una cierta cantidad del polvo depositado previamente, durante el avance del sistema de carga, en la parte trasera de los alvéolos.

Finalmente, la distribución de masas resultante de la maniobra 4 muestra que la carga de polvo atomizado se encontraba completamente desplazada hacia la parte delantera del molde, como consecuencia de una corrección excesiva de la posición de los punzones inferiores durante el retroceso del sistema de carga. Puede apreciarse que la masa media de polvo introducida en cada alvéolo, al contrario de lo que sucedía en la maniobra 3, disminuye considerablemente con respecto a las maniobras 1 y 2.

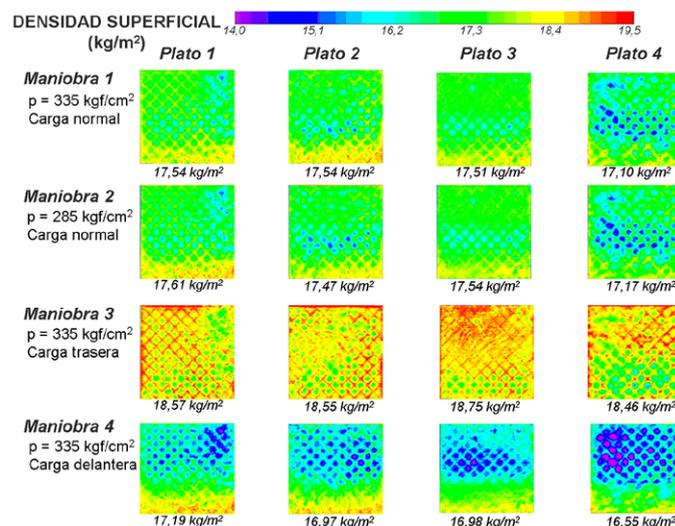


Figura 6. Distribución de densidades superficiales en el seno de las piezas obtenidas en diferentes condiciones de prensado.

Hay que remarcar que en todas las maniobras realizadas, es siempre la pieza prensada en la posición 4 la que presenta una menor masa superficial media. Del mismo modo, puede observarse que en el seno de las piezas prensadas en los alvéolos 1 y 4 existen zonas de baja masa superficial que se mantienen, en mayor o menor medida, a lo largo de todas las maniobras realizadas (parte trasera derecha

en las piezas del alvéolo 1 y parte trasera izquierda en las piezas del alvéolo 4). Este hecho está asociado a la presencia de relieves en la cara vista de la baldosa y pone de manifiesto la importancia de controlar su diseño para asegurar una buena distribución de la carga.

3.2.1.2. Determinación de la distribución de espesores.

En la figura 7 se han representado las distribuciones de espesores obtenidas en las diferentes maniobras realizadas. Si se comparan estos mapas de espesor con las distribuciones de masa mostradas en la figura 6 puede comprobarse que ambas variables están íntimamente relacionadas. Las zonas de las piezas con mayor cantidad de material son las que al finalizar el ciclo de prensado presentan un mayor espesor. Al analizar las distribuciones de espesor resultantes de las maniobras 1 y 2, puede observarse que éstas tan sólo se diferencian en los valores medios del espesor alcanzado. Las piezas de la maniobra 1 poseen espesores ligeramente inferiores a las de la maniobra 2 (la diferencia media es de 0,08 mm) debido a la menor presión máxima de prensado ejercida sobre las mismas. En efecto, para una misma cantidad de polvo atomizado existente en los alvéolos (ver figura 6) y una velocidad de desplazamiento de la traviesa de la prensa constante, es el ciclo de prensado de la maniobra 2 el que alcanza antes los valores de presión de consigna y, por lo tanto, proporciona piezas de espesor ligeramente superior. En cuanto a las piezas obtenidas en la maniobra 3, éstas presentan un espesor medio sensiblemente superior al de las obtenidas en las maniobras 1 y 2, como consecuencia de la mayor cantidad de material existente en los alvéolos al finalizar el ciclo de carga. Por el contrario, los menores espesores de las piezas de la maniobra 4 están asociados a la menor cantidad de polvo cargado en los alvéolos.

Al igual que sucede con la distribución de carga, es interesante destacar que, independientemente de la presión máxima del ciclo de prensado, las distribuciones de espesores de las maniobras 1 y 2 son prácticamente idénticas. Este hecho pone de manifiesto la gran robustez de los sistemas de carga de polvo atomizado utilizados hoy en día en las prensas industriales.

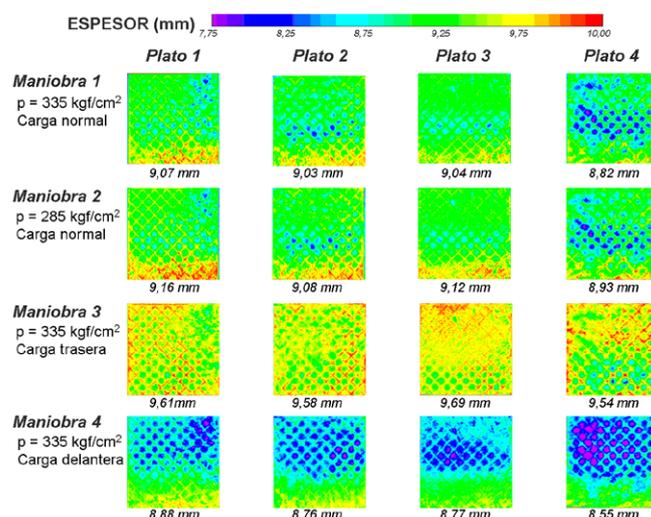


Figura 7. Distribución de espesores en el seno de las piezas obtenidas en diferentes condiciones de prensado.

Es decir, aunque pueden existir deficiencias en la distribución de la carga en los alvéolos de la prensa, debido a una incorrecta regulación del sistema de carga, dichas diferencias de carga no son aleatorias, manteniéndose constantes a lo largo del tiempo. Este comportamiento tan robusto asegura que las modificaciones realizadas en el proceso de carga de polvo atomizado queden inmediatamente reflejadas en los soportes recién prensados y que se mantengan a lo largo de la producción, siempre y cuando no se modifique la naturaleza del polvo de prensas.

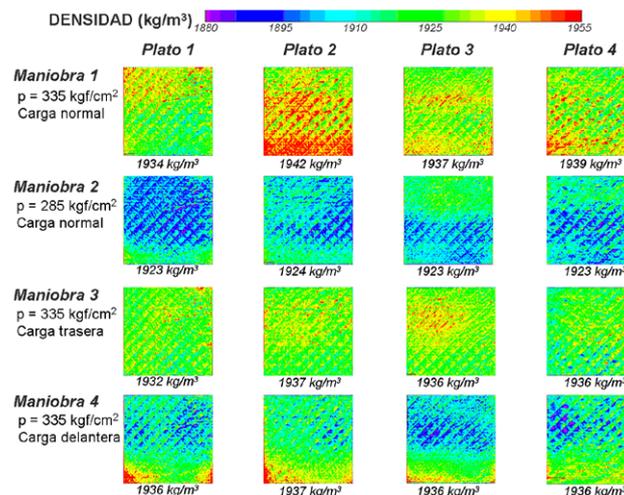


Figura 8. Distribución de densidades aparentes en seco en el seno de las piezas obtenidas en diferentes condiciones de prensado.

Ahora bien, debido a su carácter destructivo y manual, los métodos empleados en el control de la operación de prensado a nivel industrial no permiten inspeccionar con suficiente detalle los soportes recién prensados y, por esta razón, los defectos de fabricación asociados a una incorrecta distribución de polvo en los alvéolos de la prensa siguen siendo comunes hoy en día. En este sentido, el método de absorción de rayos X, en la medida en que permite obtener mapas completos de la distribución de tres variables esenciales para el control de la operación de prensado (masa, espesor y densidad aparente), se convierte en una herramienta de gran utilidad para abordar los problemas de fabricación asociados a un incorrecto desarrollo de la etapa de prensado.

3.2.1.3. Determinación de la distribución de densidad aparente.

Finalmente, en la figura 8 se recogen las distribuciones de densidad aparente de las piezas estudiadas. Como puede verse, la densidad aparente media de las piezas obtenidas depende exclusivamente de la presión máxima de prensado, en cambio, la distribución de densidades está directamente relacionada con la distribución del polvo en el interior del alvéolo. Por un lado, la densidad aparente de las piezas obtenidas en la maniobra 1 es muy similar a la obtenida en las maniobras 3 y 4, puesto que la presión máxima aplicada fue en los tres casos de 335 kg/cm². Sin embargo, las piezas correspondientes a la maniobra 2 presentan una densidad aparente media inferior, al haber estado prensadas a 285 kg/cm². Y por otro lado,

puede apreciarse que, al desplazar la carga dentro del alvéolo (maniobras 3 y 4), la distribución de densidad aparente se ve modificada en el mismo sentido.

Los resultados derivados de estas maniobras, ponen de manifiesto que el análisis detallado de las distribuciones de densidad aparente por absorción de rayos X permitiría evaluar si una determinada pieza es susceptible de presentar defectos de fabricación asociados a una incorrecta distribución del polvo en el alvéolo de la prensa.

3.2.2. Identificación de defectos de prensado en baldosas cerámicas de gran formato.

En la figura 9 se muestran las distribuciones de espesor y densidad aparente de dos piezas lisas de gres porcelánico de formato nominal 45 cm x 67 cm obtenidas en una prensa industrial equipada con un molde de doble matriz con punzones inferiores isostáticos. La pieza prensada en el alvéolo 1 presentaba una distribución homogénea de la densidad aparente, en cambio, la pieza procesada en el alvéolo 2, como consecuencia de un funcionamiento inadecuado del punzón isostático, mostraba una distribución heterogénea de la densidad aparente, la cual originaba defectos de descuadre en el producto final.

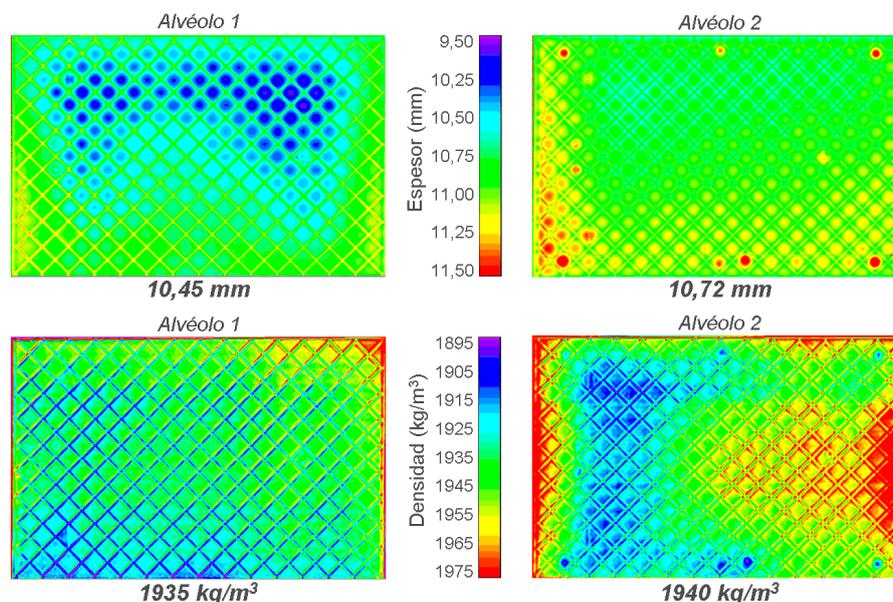


Figura 9. Distribuciones de espesor (arriba) y de densidad aparente en seco (abajo) de dos piezas de gres porcelánico crudas.

La interpretación del defecto de descuadre puede completarse con la información aportada por la distribución de espesores de ambas piezas. Como puede comprobarse, la pieza 1 presentaba unas diferencias de espesor muy marcadas, asociadas a la compensación de presiones ejercida por el punzón isostático sobre el lecho de polvo. El efecto del punzón isostático originaba una distribución de densidades con unas diferencias medias máximas dentro de la pieza inferiores a 20 kg/m³.

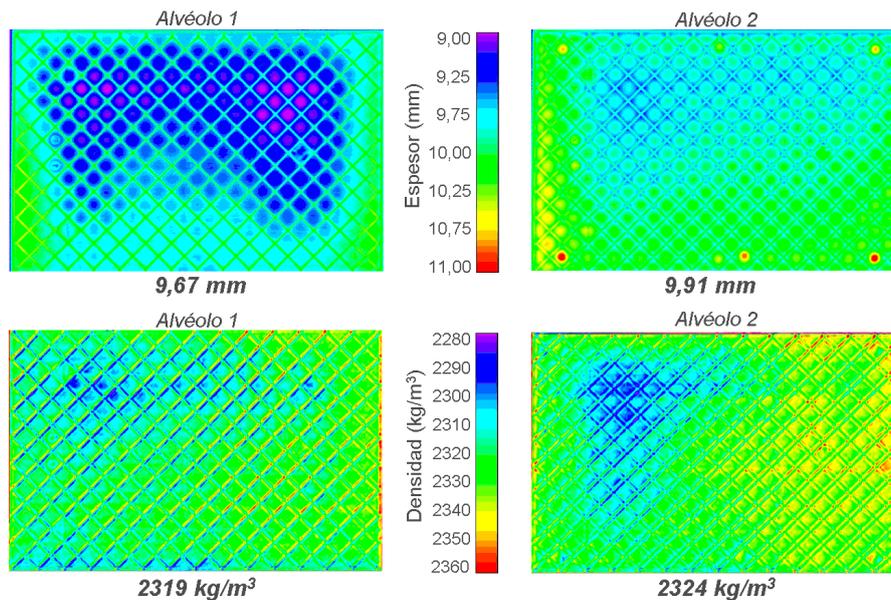


Figura 10. Distribuciones de espesor (arriba) y de densidad aparente (abajo) de dos piezas de gres porcelánico cocidas.

Sin embargo, durante el prensado de la pieza 2, no se produjo dicha compensación (la forma redondeada de la distribución de espesores las zonas situadas entre las costillas denota una falta de aceite en el punzón isostático que permitió la deformación del revestimiento de goma que lo recubre), dando como resultado una pieza con una densidad aparente media muy similar a la de la obtenida en el alvéolo 1, pero con un espesor medio superior y una distribución de densidad aparente con diferencias medias máximas entorno a 50 kg/m^3 .

El carácter no destructivo del método permitió analizar las mismas piezas tras someterlas a un ciclo de cocción industrial con una temperatura máxima de 1200°C y evaluar, de este modo, la influencia del proceso de sinterización sobre las propiedades del producto final. En la figura 10 se representan las distribuciones de espesor y de densidad aparente en cocido de las dos piezas estudiadas. La distribución de densidades en cocido muestra que las heterogeneidades generadas durante el prensado en la pieza 2 seguían presentes tras la cocción, aunque en una menor magnitud, como consecuencia de la baja influencia de la densidad en seco sobre la densidad en cocido que presentan las composiciones de gres porcelánico a elevadas temperaturas de cocción [9].

El ejemplo que se acaba de presentar muestra la utilidad del método de absorción de rayos X para identificar, entre otros, el origen de los defectos de fabricación asociados a una falta de estabilidad dimensional del producto final. En efecto, la posibilidad de caracterizar las mismas piezas, antes y después de la cocción, permite discernir si un determinado defecto es debido a un incorrecto desarrollo de la operación de prensado o, por el contrario, aparece como consecuencia de una mala regulación del horno.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se derivan del trabajo realizado son las que se exponen a continuación:

Se ha diseñado y construido un instrumento, basado en la técnica de absorción de rayos X, que permite medir, con precisión y de manera no destructiva, la distribución de densidades aparentes en piezas cerámicas de gran formato.

El equipo proporciona información complementaria sobre la distribución de espesores y de masa, la cual es de gran interés para optimizar el proceso de conformado de baldosas cerámicas.

Se ha comprobado que el equipo permite detectar defectos asociados a una distribución heterogénea de la densidad aparente debidos a un incorrecto desarrollo de la operación de prensado.

El carácter no destructivo del instrumento permite examinar piezas cocidas, previamente caracterizadas en crudo, con el fin de evaluar el efecto de las etapas de prensado y de cocción sobre las propiedades del producto final.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer al IMPIVA la financiación aportada para su realización, a través del programa de apoyo a la I+D en centros tecnológicos de la red Impiva.

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. et al. Técnicas experimentales del control de la compactación de pavimentos y revestimientos cerámicos. *Técnica Cerámica*, 116, 1234-1246, 1983.
- [3] ENRIQUE, J. E. et al. Alternativas al método de inmersión en mercurio para la determinación de la densidad aparente de baldosas cerámicas. *Técnica Cerámica*, 250. 18-27, 1997.
- [4] AMORÓS, J. L. et al. 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.
- [5] CANTAVELLA, V. et al. Uso de la técnica de ultrasonidos para medir la densidad aparente de baldosas en crudo y optimizar el proceso de prensado. *Cerámica Información*, 345. 77-84, 2007.

- [6] Método y aparato no destructivo para la medida de la densidad en baldosas cerámicas. Amorós, J. L.; Cantavella, V.; Llorens, D.; Feliu, C. Patente PCT/ES2005/000397
- [7] BERTIN, E. P. *Principles and practice of X-Ray spectrometric analysis*. New York: Plenum Press 1984, pp. 51-55
- [8] PHILLIPS, D. H. et al. Measuring physical density with X-ray computed tomography. *NDT & E Internacional*, Vol. 30, No. 6, pp. 339-350, 1997.
- [9] BAGÁN, V. Efecto de las condiciones de operación en las diferentes etapas del proceso sobre las propiedades y características de pavimento de muy baja porosidad. Valencia: Universidad. 1991, p.191 [Tesis doctoral]