

### Mecanismo de compactación de polvos cerámicos

Esta ficha es copia de textos y figuras del libro "PRENSAS, MOLDES Y PRENSADO". 2ª Ed. de Rafael Galindo Renau. Ed. Macer. Castellón. 2018.

#### Compactación de polvos.

La compactación es el empaquetamiento, por efecto de la presión, de partículas no deformables que inicialmente estaban unidas entre sí formando gránulos que se deforman completamente durante el prensado. Durante esta operación se forma una microestructura que depende de las características del polvo y del ciclo o programa de prensado establecido.

Así pues, durante la operación de prensado, los gránulos de atomizado se reordenan, deforman y rompen; y las partículas que los forman se reorganizan para formar un producto de mayor densidad. La operación debe dotar al producto compactado de una microestructura que confiera a la baldosa las propiedades deseadas tras la cocción y la suficiente resistencia mecánica en crudo para soportar los esfuerzos a los que será sometida durante las operaciones de fabricación, además de una permeabilidad suficiente que permita que se completen, durante el ciclo de cocción, todas las reacciones vinculadas a la transferencia de gases <sup>[1]</sup>.

Se sabe que las características de los polvos para prensado que afectan a la microestructura de la baldosa son la naturaleza; forma, tamaño y distribución granulométrica de las partículas; humedad; distribución y forma de los gránulos, que a su vez dependen de la composición y de la preparación de la pasta <sup>[1]</sup>.

#### Modelo de compactación de polvos por prensado.

El modelo para explicar el mecanismo de la compactación mediante prensado de polvos atomizados se basa en el modelo propuesto por Reed para aglomerados de materiales no plásticos <sup>[2]</sup>. Trabajos posteriores <sup>[3]</sup> han demostrado la validez de este modelo para el prensado unidireccional de polvos cerámicos atomizados. Según este modelo, a medida que se aumenta la presión de prensado, a humedad y distribución granulométrica constante, aumenta la densidad aparente y por tanto disminuye la porosidad, identificándose tres tramos en los que la relación entre la densidad aparente y el logaritmo de la presión es lineal. Si se estudia esta relación, para un polvo atomizado, desde el momento del llenado del alvéolo (densidad de llenado) hasta la presión de trabajo, la relación entre la presión y la densidad aparente puede ajustarse en cada tramo a ecuaciones del tipo:

$$\rho_a = k_{i1} + k_{i2} \cdot \ln P$$

donde  $k_{i1}$  y  $k_{i2}$  son las constantes de ajuste para cada  $i$  tramo. En cada tramo predomina un mecanismo de compactación y cada uno de los cambios de pendiente informa sobre un cambio en el mecanismo. La gráfica  $\rho_a = f(P)$  se denomina "diagrama de compactación" (figura 1) y resulta un instrumento eficaz para el estudio del comportamiento de los aglomerados durante la fase de compactación.

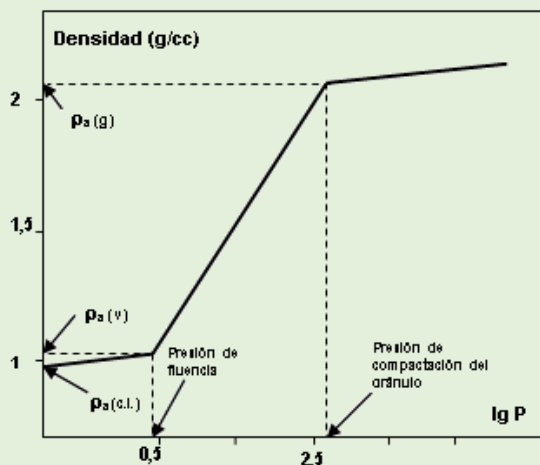


Figura 1. Representación idealizada del diagrama de compactación de un polvo atomizado.

Hay que tener en cuenta que en realidad esta gráfica no se presenta nunca como una línea quebrada, ya que la transición entre zonas corresponde a curvas debido al solapamiento de los mecanismos de compactación, por lo que en la figura 3.1 se ha representado este diagrama de forma idealizada.

#### Tramo I.

El primer tramo representa la compactación del polvo a muy bajas presiones. En él tiene lugar una reordenación de los gránulos por efecto de la presión, sin deformación ni rotura, lo que se traduce en un aumento de la densidad de empaquetamiento (figura 2). La densidad aparente del sistema va desde su valor inicial, que es la densidad de llenado de los alvéolos por caída libre, hasta un valor muy próximo al valor de la densidad del polvo empaquetado por vibración, o densidad aparente vibrada, que se alcanza a una presión que se sitúa en los polvos atomizados sobre los 3 o 4 kg/cm<sup>2</sup>. El cociente entre ambas magnitudes expresa el **índice de Hausner** del polvo. A partir de esta presión, no es posible seguir reordenando los gránulos sin deformación, por lo que estos se deforman si se aumenta la presión, cambiando entonces la relación entre densidad aparente y presión, que sigue siendo lineal, aunque con diferente pendiente.

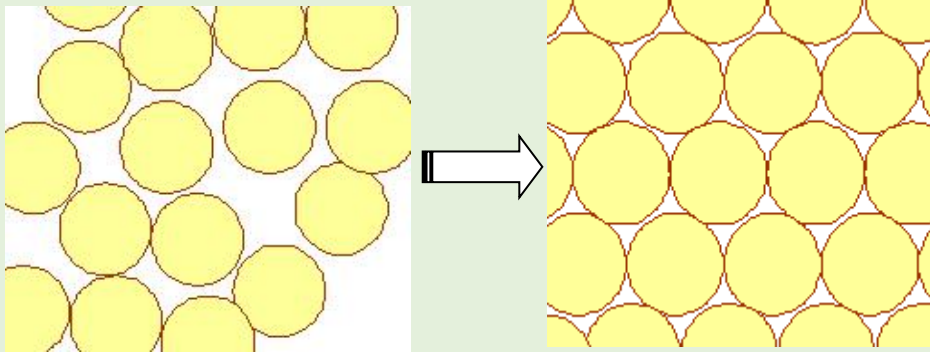


Figura 2. Representación idealizada de la reordenación de gránulos en la primera fase de la compactación de un polvo atomizado.

La presión a la que se alcanza la densidad aparente vibrada se denomina presión de fluencia, y en este punto la reordenación de los gránulos es prácticamente completa, y marca, por tanto, el cambio del mecanismo de compactación.

El punto de fluencia de los gránulos se considera una medida de su dureza o deformabilidad y depende de la estructura del gránulo; de su tamaño medio; de la distribución de tamaños de los gránulos y partículas y del contenido en humedad del polvo [4].

#### Ejemplo

*En la práctica, en las proximidades del punto de transición, ambos mecanismos de compactación coexisten por lo que este punto debe determinarse a partir de la linealización de los dos tramos y del cálculo del punto de intersección entre ambas rectas. En la figura 3 se muestra el cálculo del punto de fluencia en un atomizado de revestimiento poroso de pasta blanca habitualmente empleado en el sector de fabricación de baldosas cerámicas.*

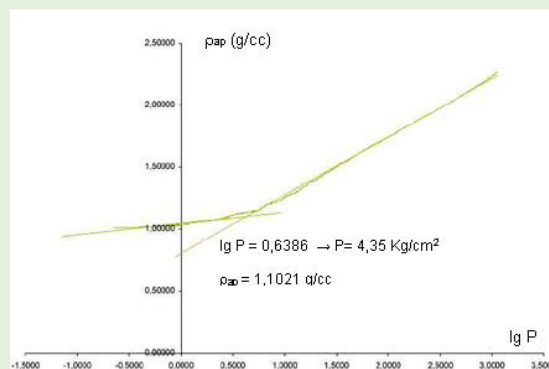


Figura 3 Cálculo del punto de fluencia (dureza del gránulo) de una pasta de revestimiento blanco con un 5,0 % de humedad.  
Fuente: Instituto de Cerámica y Vidrio – Macer.

**Tramo II.**

El mecanismo de compactación predominante en el segundo tramo es el de deformación plástica y/o rotura de los gránulos. A partir del punto de fluencia se inicia la deformación de los gránulos a medida que aumenta la presión de prensado, disminuyendo la porosidad intergranular (figuras 4 y 5), que representa la porosidad de mayor tamaño. Esta porosidad se anula prácticamente al término de este tramo, donde se tiene una configuración más densamente empaquetada. En este punto, la presión se denomina "presión de compactación del gránulo" ( $P_g$ ) y la densidad aparente del sistema es prácticamente igual a la densidad aparente de los gránulos ( $\rho_G$ ).

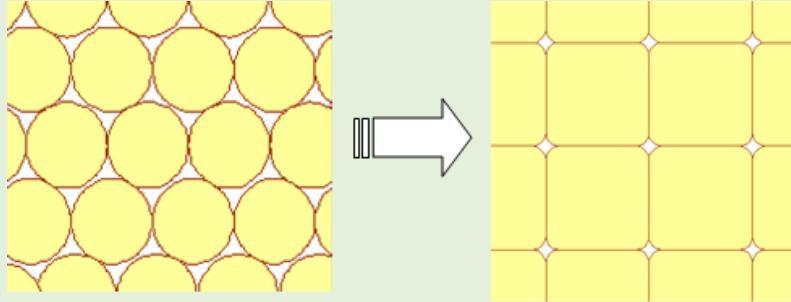


Figura 4. Representación idealizada de la deformación de gránulos.



Figura 5 Deformación de gránulos de gres porcelánico sometidos a una presión de (a) 25 Kg/cm<sup>2</sup> y (b) 100 Kg/cm<sup>2</sup>.

La deformación de los gránulos se inicia cuando la presión en los puntos de contacto entre estos es suficiente para provocar el deslizamiento de las partículas que los forman. En esta primera parte de la fase II, la permeabilidad al aire del sistema depende fundamentalmente del volumen y de forma de los poros intergranulares, que, como se ha dicho, son los más grandes. Esta porosidad depende del tamaño y del empaquetamiento de los gránulos.

A medida que se avanza en la fase II, coexiste la deformación plástica de los gránulos y, en su caso, su rotura, que dependerá de su dureza y deformabilidad. La porosidad intragranular va descendiendo y va disminuyendo el volumen de los poros intragranulares. La permeabilidad al aire del sistema está entonces condicionada por el tamaño de estos poros y por lo tanto por la distribución granulométrica de las partículas.

A medida que aumenta la compactación del sistema, disminuye el tamaño medio de los poros y la amplitud de la distribución de tamaños de los poros. Según Amorós, J.L. et al. <sup>[3]</sup> esta relación es lineal para densidades aparentes en seco superiores a 1,9 g/cc.

En esta fase de la compactación, la dureza de los gránulos influye en la compacidad del sistema a una presión determinada, de manera que, a mayor punto de fluencia, menor es la densidad aparente de los gránulos a esta presión.

**Tramo III.**

El segundo cambio de pendiente se produce cuando el polvo atomizado alcanza una densidad aparente próxima a la densidad del gránulo, lo cual significa que prácticamente se ha eliminado por completo la porosidad intergranular. A presiones superiores a la presión de compactación del

gránulo, se produce la disminución de la porosidad intragranular por flujo de partículas. En la figura 6 se aprecia como un poro intergranular (figura 6.a) se cierra mediante flujo de partículas por efecto de la fuerza de prensado, al tiempo que disminuye la porosidad intragranular. Es posible, sin embargo, que el prensado no sea capaz de cerrar todos estos huecos intergranulares. Así, por ejemplo, es posible ver en baldosas de gres porcelánico pulido, huecos intergranulares al descubierto. El cambio de pendiente indica, de nuevo, el cambio de mecanismo.

Ambos mecanismos (II y III) pueden solaparse, de forma que se dé simultáneamente la deformación plástica de los gránulos y la reordenación de las partículas. La zona habitual de trabajo se encuentra en la parte final de la zona II y en la intersección de las zonas II y III.

El segundo cambio de pendiente podría no darse en algunos diagramas de compactación, especialmente a humedades bajas, si la densidad aparente del polvo compactado resulta muy próxima a la densidad del gránulo; o incluso si las pendientes de ambos tramos se igualan, ya que a medida que disminuye la humedad, la diferencia entre ambas pendientes tiende a disminuir <sup>[5]</sup>.

Del análisis del mecanismo de compactación de polvos se desprende que el mecanismo II está controlado principalmente por la presión de prensado y por la dureza y deformabilidad de los gránulos, que a su vez está influenciada por la distribución de tamaños y la forma de las partículas; el contenido de humedad y, en su caso, la naturaleza y proporción de aditivos.

Por otra parte, la densidad de empaquetamiento durante el llenado de los alvéolos del molde, y por lo tanto la cantidad de aire retenido que debe ser expulsado durante el prensado, depende de la estructura de los gránulos; de la rugosidad de sus superficies y de su distribución de tamaños.

#### Bibliografía

- (1) AMORÓS, J.L. et al. *"Características de polvos cerámicos para prensado"* Bol. Soc. Esp. Cer. Vidr. 26. 1. 31-37. (1987).
- (2) REED, J.S. *"Principles of ceramics processing"*. (2 Edición). John Wiley&Sons, Inc. (1938). Rev. 1988.
- (3) AMORÓS, J.L. et al. *"Prensado unidireccional de polvos cerámicos aglomerados por atomización: II. Microestructura de la pieza en crudo"*. Ciencia y tecnología de los materiales cerámicos y vítreos. 139-144. Ed. Faenza Editrice. (2006)
- (4) AMORÓS, J.L. et al. *"Métodos de determinación de las características tecnológicas de aglomerados. II. Método de determinación de la dureza de gránulos"*. Técnica Cerámica 147. 414 – 420. (1986).
- (5) 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."* Universitat de València. Departamento de Química Técnica. Tesis Doctoral. (1987).