

## Estudio de las propiedades mecánicas de pavimentos cerámicos en crudo

A. DE PABLOS, P. MIRANZO, M. I. OSENDI

Instituto de Cerámica y Vidrio (C.S.I.C.), Arganda del Rey, Madrid.

J.C. ROMERO, P. CRESPO, L. GARGALLO, M.A. BENGOCHEA

Gres de Nules-Keraben. Castellón

Uno de los problemas que tiene la industria de pavimentos cerámicos es la rotura de piezas en la línea de producción. Una mejora en la resistencia mecánica de las piezas crudas permitiría una reducción de gastos y de materia prima, con el consiguiente aumento de producción a un menor coste, lo cual beneficiaría tanto a la industria como al consumidor final. Por tanto, la evaluación de la resistencia mecánica de piezas crudas a partir de una población estadísticamente significativa es una tarea que contribuye a predecir la posible rotura frente a tensiones. Se han analizado dos tipos de pavimentos, gres rojo y gres blanco, y un soporte de revestimiento. Se ha estudiado el efecto de la presión de conformado de la pieza en la resistencia, observándose distinto comportamiento en función del tipo de pasta empleado. Los resultados se han interpretado utilizando el análisis estadístico de Weibull, determinando los módulos de Weibull de cada material en crudo.

*Palabras clave:* baldosas, resistencia mecánica, módulo de Weibull

### Mechanical strength of industrial green ceramic tiles.

Ceramic tiles often experiment failure along the production line. Increasing the mechanical resistance of the green tiles would bring a reduction in raw materials waste and therefore a lowering of cost. This would be, of course, beneficial for the producer as well as the final consumer. In this sense the statistical evaluation of the strength of the green tiles can be an interesting starting point. In the present work, two types of stonewares and one wall tile have been tested. Samples were machined from green tiles, from different areas, and for different forming pressures. Possible effects between these factors and the strengths have been discussed. Estimation of the Weibull modulus for each material has been done.

*Key words:* ceramic tiles, strength, Weibull modulus.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector cerámico en España es uno de los más importantes y dinámicos del país, con una gran vocación exportadora y muy competitivo, significando un 15% de la producción mundial [1]. Esto se ha debido al importante esfuerzo inversor realizado por las empresas españolas, sobre todo en equipamiento, incorporando las tecnologías últimas y más avanzadas, así como la apuesta realizada en favor de productos y procesos diferenciados, como serían la fabricación de grandes formatos o la monococción [1]. A pesar de la favorable situación de la industria española, está aumentando la competencia de países como China, Brasil, Turquía, Taiwan, Indonesia y Tailandia. Dicha competencia está basada en la abundancia de materias primas y el abaratamiento de la mano de obra, lo que permite a las empresas localizadas en estos países una gran producción a bajo coste [2].

En un estudio de la empresa QPT-Consulting, realizado a nivel mundial en el sector cerámico [3], se indica que las bajas y roturas ocasionadas en la línea de producción son responsables de aproximadamente un 40% del total de costes, por lo que cualquier mejora en este campo supondría una reducción de dichos costes. La mejora de la resistencia mecánica permitiría fabricar productos de menor espesor, con el correspondiente ahorro de materia prima por metro cuadrado y la consiguiente reducción de peso del producto final, que disminuiría los costes asociados al transporte.

Para poder mejorar la resistencia mecánica de piezas crudas, es necesario determinar el valor de esta resistencia y los principales

factores que influyen en ella. En este trabajo, se presentan los resultados de resistencia mecánica de muestras crudas obtenidos para los distintos tipos de pasta: gres rojo, gres blanco y porosa; analizándose el efecto de la presión de conformado de la pieza y la homogeneidad de la misma. Para el estudio de la resistencia mecánica se ha utilizado el análisis estadístico de Weibull (Anexo I).

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Se han utilizado barras prismáticas de 10x3x0.8 cm mecanizadas de diferentes zonas de la baldosa, como se muestra en la figura 1.

Las resistencia mecánica ( $\sigma_F$ ) de las probetas se midió mediante flexión en tres puntos, con una distancia entre apoyos de 8 cm, usando un plasticímetro MP2 (desarrollado por el ITC y Promotest) para medir la carga máxima soportada. La resistencia se calculó según la expresión (1):

$$\sigma_F = \frac{3}{2} \frac{P_{\max} L}{bd^2}$$

donde  $P_{\max}$  es la carga máxima de rotura, b y d la anchura y el espesor de las barras, respectivamente; y L la distancia entre apoyos.

Se utilizaron muestras conformadas a distintas presiones: 185, 210 y 235 bares para la pasta roja y la pasta porosa; y 220, 250 y 280 bares para la pasta blanca.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 2 y 3 se muestran los resultados del módulo de rotura para las muestras de pasta roja y blanca, respectivamente. Se han representado los datos para las distintas presiones de conformado y, además, se han ordenado las muestras según la zona de la baldosa de la que provienen.

En el gres de pasta roja se puede observar un incremento ligero pero consistente del módulo de rotura al aumentar la presión de conformado. Sin embargo, no existen diferencias significativas entre las distintas zonas de la baldosa, lo que nos indica que la baldosa es bastante homogénea en cuanto a los defectos intrínsecos.

En la pasta blanca no se aprecian diferencias en el del módulo de rotura con la presión (figura 3), a diferencia de lo que ocurría con la pasta roja. No obstante, sí se observa que las muestras correspondientes a la zona 1 presentan sistemáticamente valores ligeramente más altos de  $\sigma_F$  que las otras dos zonas, que tienen valores similares. Este resultado nos indica que esta baldosa presenta cierta inhomogeneidad, posiblemente atribuible a un efecto de llenado del molde o bien de prensado de la baldosa.

Es interesante destacar que la dispersión de valores es mayor en la pasta roja que en la pasta blanca.

La resistencia mecánica de la pasta porosa, para las diferentes presiones y zonas, se muestra en la figura 4. Sistemáticamente la zona 1 muestra valores mucho más elevados de  $\sigma_F$  que las otras dos zonas. Este efecto puede atribuirse nuevamente al molde e indica que estas baldosas son más inhomogéneas.

Para el estudio estadístico se ha utilizado todo el conjunto de valores representados en las figuras 2 y 3. Las representaciones de Weibull, junto con las correspondientes probabilidades de fallo, se recogen para las pastas roja y blanca en las figuras 5 y 6, respectivamente. El módulo de Weibull también se indica en las mismas figuras.

Si comparamos los datos de la pasta roja y blanca, se observa que para una tensión determinada la probabilidad de rotura es siempre superior en la pasta roja. Por ejemplo, para una tensión de 3.2 MPa ( $x=1.2$ ) se infiere de las figuras 5 y 6, que la probabilidad de fallo de la pasta roja sería 100%, mientras que la pasta blanca no rompería.

Los valores del módulo de Weibull obtenidos del ajuste por mínimos cuadrados fueron  $m=25$  para la pasta blanca y  $m=14$  para la pasta roja. El mayor módulo de Weibull de la pasta blanca indica que este material es más fiable, es decir, presenta menos dispersión en los valores de resistencia mecánica, o lo que es semejante, la población de defectos críticos tiene una distribución más estrecha. Además cuanto mayor es  $m$ , menos se ve afectada la resistencia mecánica promedio por el incremento del volumen de la probeta [4]. Es decir, la pasta blanca presentaría un  $\sigma_F$  menos dependiente del tamaño.

Como se ve en la figura 7, el análisis estadístico de Weibull para la pasta porosa no da un buen ajuste. El módulo de Weibull es muy bajo  $m=5$ , es decir, poca reproducibilidad de valores y una ancha distribución de defectos. Además, la representación de Weibull muestra claramente dos tramos con distinta pendiente, lo que indica que en este material existen dos familias de defectos. En este caso, la estadística de Weibull no sería aplicable.

### 4. CONCLUSIONES

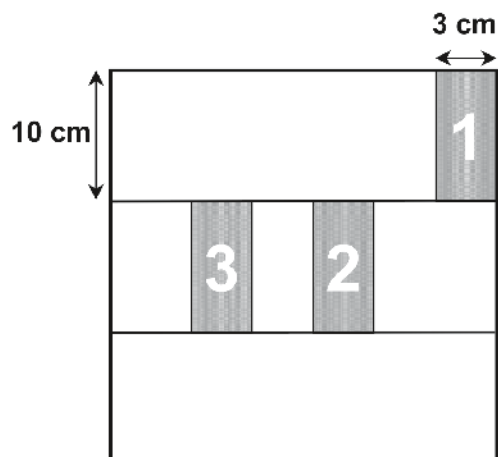


Figura 1.- Esquema de una baldosa indicando las dimensiones de las muestras mecanizadas a partir de ellas y las correspondientes zonas de las que se extrajeron.

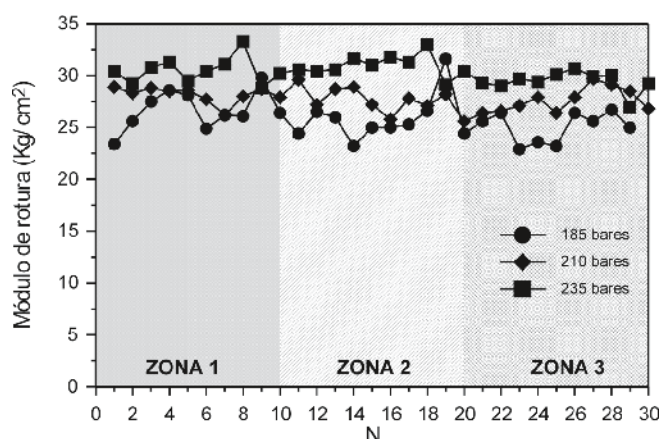


Figura 2.- Módulo de rotura de las piezas de 10x3x0.8 cm de pasta roja mecanizadas a partir de las baldosas conformadas a distintas presiones.

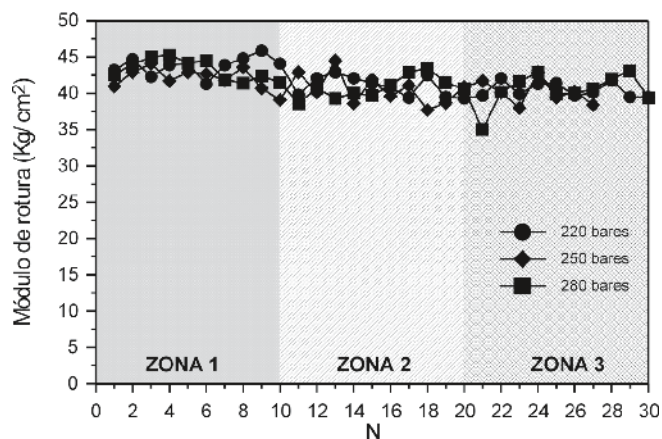


Figura 3.- Módulo de rotura de las piezas de 10x3x0.8 cm de pasta blanca mecanizadas a partir de las baldosas conformadas a distintas presiones.

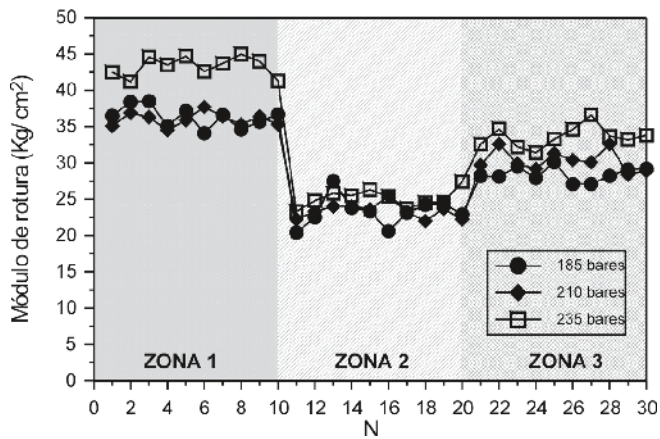


Figura 4.- Módulo de rotura de las piezas de 10x3x0.8 cm de pasta porosa mecanizadas a partir de las baldosas conformadas a distintas presiones.

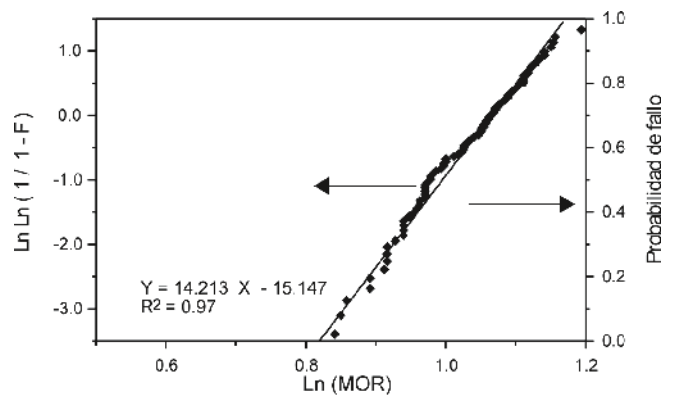


Figura 5.- Representación de Weibull y correspondiente probabilidad de fallo en función de la tensión aplicada para la pasta roja. También incluye la ecuación del ajuste lineal de la representación.

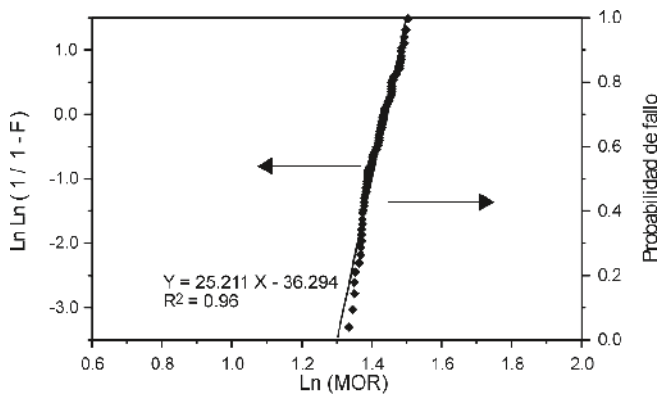


Figura 6.- Representación de Weibull y correspondiente probabilidad de fallo en función de la tensión aplicada para la pasta blanca. También incluye la ecuación del ajuste lineal de la representación.

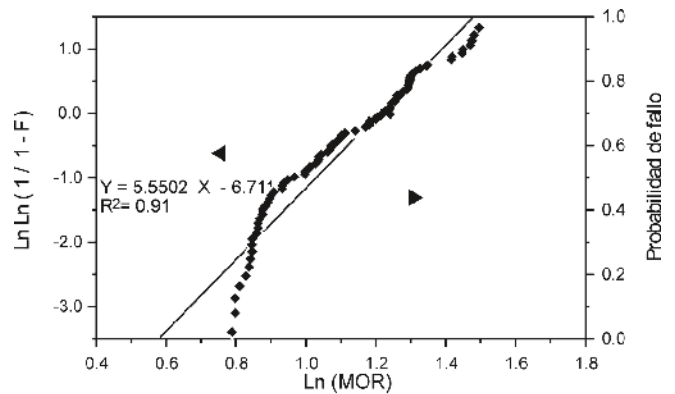


Figura 7.- Representación de Weibull y correspondiente probabilidad de fallo en función de la tensión aplicada para la pasta porosa. También incluye la ecuación del ajuste lineal de la representación.

Los módulos de Weibull obtenidos de la distribución de módulos de rotura son bastante altos, 25 para la pasta blanca y 14 para la pasta roja. El mayor módulo de la pasta blanca indica que este material es más reproducible, es decir, presenta una dispersión en los valores de resistencia mecánica más estrecha. Además, la resistencia media de esta pasta es muy superior.

El soporte poroso muestra un el módulo de Weibull muy bajo ( $m=5$ ), es decir, poca reproducibilidad de valores debido a una amplia distribución de defectos. En este caso, podría decirse que existen dos familias de defectos, observándose claramente dos tramos de distinta pendiente en la representación de Weibull.

Con este sencillo análisis se ha demostrado, además, que variaciones en la presión de conformado no afectan especialmente a los valores de resistencia de la pasta blanca, mientras que lo opuesto ocurre con la pasta roja. La posible existencia de inhomogeneidades en el prensado se ha puesto de manifiesto en el estudio.

## -ANEXO I

### Estadística de Weibull

Los materiales frágiles pueden experimentar una gran variabilidad en su resistencia mecánica, por lo que esta no puede utilizarse como una variable de diseño. Experimentalmente se observa que la resistencia media de un material cerámico depende del volumen de material ensayado y del tipo de configuración de carga. Por ello, se deben usar métodos estadísticos para explicar la resistencia de materiales frágiles [4].

La resistencia de un material frágil no es una propiedad intrínseca del mismo, sino que lleva asociada una cierta variabilidad relacionada con la población de defectos intrínsecos del material considerado. Igualmente, el tiempo de vida media de un material también muestra un comportamiento estadístico. En este sentido, se considera que la resistencia mecánica de un material cerámico tiene un valor probabilístico.

La distribución más empleada para describir la resistencia mecánica de un material frágil es la desarrollada por Weibull

[4], también denominada "Teoría del eslabón más débil", que propuso una fórmula empírica para relacionar la probabilidad de fallo con la tensión. En el análisis de Weibull se supone que el material es isotrópico, homogéneo y que la rotura del material la produce el defecto más crítico. Así, la probabilidad de fallo de un componente sometido a una tensión  $\sigma$  viene definida como:

$$P = 1 - \exp\left[-V\left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

donde,  $V$  es el volumen del componente,  $\sigma_0$  es un factor de escala,  $\sigma_u$  es la tensión umbral por debajo de la cual la probabilidad de fractura es nula y  $m$  es el llamado módulo de Weibull.  $\sigma_0$  se denomina tensión característica y corresponde a una probabilidad del 0.63. Generalmente, en materiales cerámicos la  $\sigma_u$  se considera cero.

Esta expresión supone que la tensión es constante en todo el volumen  $V$ . En caso contrario, la parte entre corchetes se transformaría en una integral sobre todo el volumen. La expresión anterior es válida sólo para tensiones a tracción.

Tanto "m" como " $\sigma_0$ " son los parámetros más importantes de esta distribución. Como estos valores se estiman a partir de un número finito de muestras, sus valores dependen de la población ensayada. Para asignar a la población ensayada la probabilidad de fallo, se ordenan los valores de forma ascendente y se asigna una probabilidad que depende del estima-

dor elegido [4]. Habitualmente se utiliza el estimador,

$$P_i = \frac{i}{1+n}$$

siendo  $i$  el orden que ocupa la tensión de rotura  $\sigma_i$ . El estimador  $(i-0.5)/n$  es preferido por otros autores [4].

Normalmente, la tensión umbral se considera cero y el módulo de Weibull se calcula a partir del ajuste por mínimos cuadrados obtenido al representar  $\ln\{\ln[1/(1-P)]\}$  frente a  $\ln\sigma$ . La intersección de esta recta con el eje Y viene dada por  $-m \ln \sigma_0$ . Este tipo de representaciones se conocen como diagrama de Weibull.

En este estudio los datos de resistencia mecánica se han analizado usando el estimador  $i/1+n$ .

#### BIBLIOGRAFÍA

1. M. Regueiro, E. Sánchez, V. Sanz, E. Criado. "Cerámica industrial en España". Bol. Soc. Esp. Ceram. y Vidrio 39 [1] 5-30 (2000)
2. I. Gil, J.J. Guarch, C. Andrés. "La industria cerámica de la comunidad valenciana en el ámbito nacional y europeo". Bol. Soc. Esp. Ceram. y Vidrio 38 [2] 133-141 (1999)
3. P. Corma, J.F. Dávila. "Evaluación de los costes de no-calidad del sector español de pavimentos y revestimientos cerámicos". Publicación QUALICER 96, 381-398
4. Ayal de S. Jayatilaka. "Fracture of Engineering Brittle Materials" pp 116-123. Applied Science Publishers. Londres 1979.



# Coloquio Internacional Refractarios

**REFRACTARIOS PARA LA INDUSTRIA CERÁMICA**

**11-12 Octubre 2000  
Eurogres, Aachen, Alemania**

PARA MÁS INFORMACIÓN:

Deutsches Institut für Feuerfest und Ceramic GmbH  
An der Elisabethkirche 27, D-53113 Bonn  
Tel. +49/228/91508-23  
Fax. +49/228/91508-55  
E-mail: DIFK-BONN@t-online.de