

# Aplicação da Estatística de Weibull na Avaliação da Tensão de Ruptura a Flexão de Revestimento Cerâmico

Bruno Carlos Alves Pinheiro<sup>1</sup>, Gustavo Matias Estevão<sup>2</sup>,

Ricardo da Rocha Vitor<sup>3</sup>

## 1 Introdução

Devido às grandes variações da resistência mecânica encontradas num mesmo lote de materiais cerâmicos, tratamentos estatísticos foram explorados como auxílio para se garantir certa confiabilidade. Tais variações estão relacionadas com a natureza frágil dos materiais cerâmicos. Portanto, o que determina a resistência mecânica de um material cerâmico é a existência de falhas críticas na região de máxima sollicitação mecânica. O modelo que tem sido mais utilizado é o da distribuição de Weibull, que faz analogia entre um material frágil submetido a tensões trativas e uma corrente que se rompe quando a resistência do seu elo mais fraco é superada (VIEIRA, MONTEIRO e PINATTI, 1999, p. 46202). Assim, os materiais cerâmicos podem ser comparados com correntes tendo sua resistência mecânica determinada pelo menor ponto de resistência mecânica (MONTEIRO, 2001, p. 16).

O método estatístico desenvolvido por Weibull vem sendo amplamente utilizado para quantificar a resistência mecânica dos materiais cerâmicos. Weibull propôs uma função empírica de distribuição de probabilidade de falhas e obteve a expressão para a probabilidade de fratura acumulada, a qual chamou de Distribuição de Weibull (Equação 1):

$$F = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]. \quad (1)$$

onde:

F = probabilidade de fratura;

$\sigma$  = tensão de ruptura;

$\sigma_0$  = constante de normalização – correspondente à tensão cuja probabilidade de falha é 63,2 %;

m = módulo de Weibull;

---

<sup>1</sup>DDP - UEMG/UBA. e-mail: bruno.pinheiro@uemguba.edu.br

<sup>2</sup>DDP - UEMG/UBA.

<sup>3</sup>DDP - UEMG/UBA.

Conforme apresentado na equação 1, através do método de Weibull pode-se conhecer dois parâmetros importantes, a saber: a) a resistência característica ( $\sigma_0$ ) e, b) módulo de Weibull ( $m$ ). A resistência característica descreve a probabilidade de falha sob um determinado nível de tensão e o módulo de Weibull fornece um indicativo da reprodutibilidade da resistência mecânica do material, ou seja, a qualidade do material. Quanto maior é o módulo de Weibull, menor é a dispersão dos valores de resistência mecânica. A obtenção de  $m$  e  $\sigma_0$  se faz por meio da linearização da equação 1, obtendo-se assim a equação 2 apresentada abaixo:

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-F_j} \right) \right] = m \cdot \ln \sigma_j - m \cdot \ln \sigma_0 \quad (2)$$

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência mecânica, medida em termos da resistência a flexão em três pontos, de materiais cerâmicos classificados como revestimentos cerâmicos através da estatística de Weibull. Ênfase é dada à influência da temperatura de sinterização no comportamento mecânico dos revestimentos cerâmicos.

## 2 Material e métodos

No presente trabalho foi utilizada uma massa para revestimentos cerâmicos para pisos aplicados na construção civil. A formulação consiste de 45 %p de caulim, 45 %p de feldspato sódico e 12,5 %p de quartzo.

Corpos-de-prova em forma de barras retangulares com 11,5 x 2,54 cm<sup>2</sup>, com espessura inferior a 7,5 mm foram conformados por prensagem uniaxial com pressão de compactação de 50 MPa. Em seguida, os corpos cerâmicos foram secos em estufa a de laboratório a 110 °C por 24 h e sinterizados nas temperaturas de 1200, 1220, e 1240 °C, utilizando um ciclo de queima rápido de aproximadamente 1 h. Após sinterização, foi determinada a tensão de ruptura à flexão dos corpos cerâmicos (ensaio de carregamento em três pontos). A tensão de ruptura a flexão em 3 pontos foi determinada de acordo com a norma C674-77 (ASTM, 1989), utilizando-se uma máquina de ensaios, marca Instron, modelo 4301, capacidade de 5kN. A velocidade do ensaio foi de 0,1 mm/min, com distância entre os cutelos de apoio de 90 mm.

Em seguida, os dados experimentais de tensão de ruptura à flexão foram tratados estatisticamente por meio da Estatística de Weibull. Os parâmetros importantes da distribuição de Weibull (resistência característica (Rc) e módulo de Weibull (m)) foram estimados através de um modelo que faz o uso de um método de regressão linear seguindo os passos descritos abaixo:

- Ordenação de forma crescente dos valores de tensão de ruptura à flexão obtidos para cada amostra;
- Cálculo do ranking mediano para cada observação, usando a equação 3 indicada abaixo:

$$F_i = (i - 0,5) / N \quad (3)$$

- Onde i corresponde ao valor da ordem de cada observação e N representa o número total de observações.
- Cálculo do logaritmo natural da tensão de ruptura à flexão ( $\sigma$ ) ( $\ln(\sigma)$ ) de cada observação (amostra);
- Cálculo do logaritmo natural do logaritmo natural do inverso de 1 menos o ranking mediano de cada observação ( $\ln[\ln(1/1-F)]$ );
- Construção dos gráficos com  $\ln(\sigma)$  no eixo das abscissas (x) e ( $\ln[\ln(1/1-F)]$ ) no eixo das ordenadas (y);
- E por fim, determinação do módulo de Weibull através da tangente da curva de ( $\ln[\ln(1/1-F)]$ ) em função de  $\ln(\sigma)$ .

Foram utilizados os seguintes softwares: i) Excel, para o cálculo dos dados descritos acima na forma de tabela e, ii) Origin 8.0, para a construção dos gráficos e análises de regressão linear.

### 3 Resultados e Discussões

A Tabela 1 mostra os resultados do módulo de Weibull (m), do coeficiente de correlação (R) e da resistência característica (Rc), para os corpos-de-prova sinterizados em 1200, 1220 e em 1240 °C. Pode-se notar que de modo geral o aumento da temperatura de sinterização ocasionou o aumento do módulo de Weibull. Isto mostra o efeito positivo do aumento da temperatura de sinterização na resistência mecânica a flexão dos corpos cerâmicos, principalmente, em 1240 °C. Provavelmente, o aumento da temperatura contribuiu para uma melhor homogeneização da microestrutura dos corpos cerâmicos, diminuindo a

quantidade de defeitos tais como poros e trincas, os quais funcionam como concentradores ou amplificadores de tensões, afetando de forma significativa a resistência mecânica dos materiais cerâmicos. O valor do módulo de Weibull ( $m$ ) constitui-se num valioso critério para a determinação da qualidade dos corpos cerâmicos. De acordo com Menegazzo et. al., (2002), quanto maior é o valor do módulo de Weibull ( $m$ ) menor é a dispersão dos dados de tensão de ruptura a flexão. Pode ser observado também que os coeficientes de correlação apresentam valores de  $R \rightarrow 1$ . Isto é importante, pois indica que os dados experimentais de tensão de ruptura a flexão para os corpos cerâmicos estudados neste trabalho são ajustados de acordo com a teoria de Weibull, bem como podem ser representados por uma equação de 1º grau. Ou seja, os valores dos coeficientes de regressão lineares obtidos ( $R$ ), indicam a validade do uso da análise de Weibull na avaliação do comportamento mecânico do produto cerâmico aqui estudado (THURLER, SOUZA e HOLANDA, 1999, p. 11401).

Tabela 1 – Parâmetros Estatísticos da Massa Cerâmica

| <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Módulo de Weibull (m)</b> | <b>Coefficiente de Correlação R</b> | <b>Resistência Característica (<math>\sigma_0</math>) (MPa)</b> |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|
| 1200                    | 10,81                        | 0,74                                | 32,19   |
| 1220                    | 9,32                         | 0,74                                | 35,19   |
| 1240                    | 18,43                        | 0,85                                | 43,92   |

A Tabela 1 também mostra a distribuição de probabilidade acumulada até a ruptura para os corpos cerâmicos sinterizados em 1200 °C, 1220 °C e em 1240 °C, respectivamente, através da resistência característica ( $\sigma_0$ ), a qual é um parâmetro de referência assumindo uma probabilidade de falha de 0,632. Além disso, ele define o quão baixa ou quão alta é a tensão de ruptura dos corpos-de-prova. Assim, como para o módulo de Weibull ( $m$ ), que fornece um indicativo da reprodutibilidade da resistência mecânica do produto, é desejável que o valor de ( $\sigma_0$ ) seja o maior valor possível. Pode ser observado que o aumento da temperatura ocasiona um aumento na resistência característica dos corpos cerâmicos. Além disso, os corpos cerâmicos sinterizados na temperatura de 1240 °C apresentaram o maior valor de resistência característica. Isto comprova que os corpos cerâmicos sinterizados em 1240 °C apresentam maior qualidade com relação à resistência mecânica. Esta temperatura de sinterização proporcionou a obtenção de uma microestrutura mais homogênea, o que garante uma menor dispersão do comportamento mecânico do produto estudado.

#### 4 Conclusões

A estatística de Weibull se mostrou uma importante aliada na análise dos corpos-de-prova utilizados neste projeto, contribuindo com a apresentação de um indicativo da reprodutibilidade da resistência mecânica dos corpos-de-prova analisados. Os coeficientes de correlação obtidos ( $R \rightarrow 1$ ) indicam que a tensão de ruptura à flexão para o revestimento cerâmico para pisos utilizados na construção civil sinterizados nas temperaturas de sinterização de 1200 °C, 1220 °C e 1240 °C se ajustam a teoria de Weibull.

O módulo de Weibull para as amostras de revestimento cerâmico para piso estudado aqui apresentou maior valor de módulo de Weibull na temperatura de 1240 °C. Isso indica uma menor dispersão dos dados de tensão de ruptura à flexão para as amostras sinterizadas nesta temperatura.

A resistência característica para as amostras sinterizadas em 1240 °C foi maior do que a resistência característica das amostras sinterizadas em 1200 °C e em 1220 °C. Deixando claro que a probabilidade de falha para os corpos-de-prova sinterizados em 1240 °C é maior do que para os corpos-de-prova sinterizados em 1200 °C e em 1220 °C.

#### 5 Bibliografia

MENEGAZZO A.P.N, et. al. **Avaliação da resistência mecânica e modulo de Weibull de produtos tipo grês porcelanato e Granito.** Cerâmica Industrial, 2002, v. 7, nº 1, p. 24-32.

MONTEIRO, A.L.A. **Um sistema para o cálculo da resistência mecânica de materiais frágeis pelo uso do método estatístico de Weibull** – Guaratinguetá, 2001, 63 páginas: Monografia, Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

THURLER, L.M.; SOUZA, G.P.; HOLANDA, J.N.F. **Avaliação do módulo de Weibull para argilas de Campos-RJ.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 43., 1999, Florianópolis. Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica Florianópolis: ABM, 1999. p. 11401-11409.

VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N.; PINATTI, D.G. **Aplicação da estatística de Weibull na avaliação da resistência mecânica de revestimento cerâmico.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 43., 1999, Florianópolis. Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica.