

## APLICAÇÃO DA ESTATÍSTICA DE WEIBULL NA AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO CERÂMICO PARA PISO

G.M. Estevão<sup>1</sup>; B.C.A. Pinheiro<sup>2</sup>; S.F. Souza<sup>3</sup>; S.C.S. Lima<sup>4</sup>

<sup>2,4</sup> Departamento de Engenharia de Produção – FIC/Grupo UNIS – Rua Romualdo Meneses, 701, 36770-000, Cataguases, MG.

<sup>1,2,3</sup> Departamento de Design – UEMG – Avenida Olegário Maciel, 1427, 36500-000, Ubá, MG.

Rua Vigorito Lamas da Silva, 131, Centro, 36788-000 Itamarati de Minas - MG

[bruno.pinheiro@uemguba.edu.br](mailto:bruno.pinheiro@uemguba.edu.br)

### RESUMO

*O presente trabalho consiste na avaliação do comportamento mecânico de revestimentos cerâmicos para pisos utilizando a estatística de Weibull. Ênfase foi dada a influência da temperatura de sinterização na resistência mecânica à flexão. Foram confeccionados corpos-de-prova por prensagem uniaxial. Os corpos cerâmicos foram sinterizados nas temperaturas de 1160, 1180, 1200, 1220 e 1240 °C utilizando um ciclo de queima rápido. Para cada temperatura de sinterização foram confeccionados 5 corpos-de-prova. Em seguida, determinou-se a resistência mecânica a flexão em três pontos e o módulo de weibull. Foram obtidos os seguintes resultados para o módulo de Weibull:  $m = 11,36$  em 1160 °C,  $m = 17,68$  em 1180 °C,  $m = 8,16$  em 1200 °C,  $m = 31,96$  em 1220 °C e  $m = 6,68$  em 1240 °C. Pode ser observado que o maior valor de módulo de Weibull foi obtido na temperatura de 1220 °C. Isto indica que nesta temperatura de sinterização os materiais estudados apresentam menor dispersão e variação do seu comportamento mecânico.*

**Palavras-chave:** Estatística de Weibull, Resistência Mecânica, Revestimentos Cerâmicos.

## INTRODUÇÃO

Os materiais cerâmicos apresentam grandes variações da resistência mecânica dentro de um mesmo lote. Tais variações estão relacionadas diretamente com a natureza frágil dos materiais cerâmicos. Além disso, tais variações influenciam de maneira significativa a qualidade dos materiais cerâmicos. É possível relacionar a resistência mecânica de um produto cerâmico como dependente de sua microestrutura e, principalmente, da distribuição e do tamanho dos defeitos presentes <sup>(1)</sup>.

Uma das principais características dos produtos cerâmicos é a alta fragilidade, se rompem sem se deformarem plasticamente. Ademais, os defeitos existentes na microestrutura (microdefeitos) podem comprometer toda a estrutura. Assim, os materiais cerâmicos podem ser comparados com correntes, pois estas se rompem no seu elo mais fraco, ou seja, a resistência mecânica desses materiais é determinada pelo ponto de menor resistência mecânica <sup>(2)</sup>.

Aproveitando-se disso, Weibull desenvolveu um método estatístico que vem sendo utilizado com grande sucesso para quantificar a dispersão dos valores de resistência mecânica apresentada pelos materiais cerâmicos. Esse método é conhecido como distribuição de Weibull. Através desta distribuição pode-se conhecer a resistência característica do material, a qual descreve a probabilidade de falha sob um determinado nível de tensão e o módulo de Weibull ( $m$ ), o qual fornece um indicativo da reprodutibilidade da resistência mecânica do produto, ou seja, a qualidade do material. Quanto maior é o módulo de Weibull, menor é a dispersão dos valores de resistência mecânica <sup>(3)</sup>.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência mecânica de piso cerâmico vitrificado utilizado na construção civil por meio da estatística de Weibull. Ênfase é dada à influência da temperatura de sinterização na resistência à flexão em três pontos dos revestimentos cerâmicos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram utilizadas as seguintes matérias primas: caulim, quartzo e feldspato sódico (albita). As matérias primas fornecidas na forma de um pó fino, foram inicialmente secas em estufa a 110 °C por 24 h e passadas em peneiras de 200 mesh (75  $\mu$ m ABNT). Em seguida, as matérias primas foram pesadas em

balança digital ( $\pm 0,01\text{g}$ ) nas quantidades pré-estabelecidas de 45 % em peso de caulim, 42,5 % em peso de feldspato sódico e 12,5% de quartzo. Em seguida, as matérias-primas foram submetidas a um processo de mistura, a seco, por 60 minutos em moinhos de bolas. Em seguida, as misturas obtidas foram umidificadas com 7 % em peso de umidade, usando um borrifador e as mãos para misturar e espalhar a umidade. Finalmente, a massa obtida foi armazenada em saco plástico, colocada dentro de um dessecador, permanecendo neste por um período de 24 h, visando obter uma melhor homogeneização da umidade adicionada.

Corpos-de-prova em forma de barras retangulares com  $11,5 \times 2,54 \text{ cm}^2$ , com espessura inferior a 7,5mm foram conformados por prensagem uniaxial com pressão de compactação de 50 MPa. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a  $110^\circ\text{C}$  por 24 h e sinterizadas nas temperaturas de 1160, 1180, 1200, 1220 e  $1240^\circ\text{C}$ , utilizando um ciclo de queima rápido de aproximadamente 1 h. Foram utilizados 5 corpos-de-prova para cada temperatura de sinterização.

Após sinterização, foi determinada a tensão de ruptura à flexão dos corpos-de-prova (ensaio de carregamento em três pontos). Esta foi determinada de acordo com a norma C674-77 (ASTM, 1989), utilizando-se uma máquina de ensaios, marca Instron, modelo 4301, capacidade de 5 kN. 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 para cada amostra de foram tratados estatisticamente por meio da Estatística de Weibull. Os parâmetros importantes da distribuição de Weibull (resistência característica e módulo de Weibull) 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 á flexão obtidos para cada amostra;
- Cálculo do ranking mediano para cada observação, usando a equação mostrada abaixo:

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

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 ( $\ln[\ln(1/1-F)]$ );
- Obteve-se então, a partir de análises da regressão linear, os resultados do módulo de Weibull ( $m$ ), Coeficiente de Correlação ( $R$ ) e conseqüentemente a Resistência Característica ( $RC$ ).

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

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos após análise de regressão linear. O valor do módulo de Weibull ( $m$ ) constitui-se num valioso critério para a determinação da qualidade dos corpos cerâmicos. Quanto maior é o valor do módulo de Weibull ( $m$ ) menor é a dispersão dos dados de tensão de ruptura a flexão. Pode-se notar que o aumento da temperatura de queima ocasionou o aumento do módulo de Weibull atingindo o maior valor ( $m = 31,96$ ) na temperatura de 1220 °C. Isto mostra o efeito positivo do aumento da temperatura de sinterização na resistência mecânica a flexão dos corpos cerâmicos.

TABELA 1 - Parâmetros Estatísticos da Massa Cerâmica

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Módulo de Weibull (m)</b>	<b>Coeficiente de Correlação R</b>	<b>Resistência Característica (RC)(MPa)</b>
1160	11,36	0,84	34,45
1180	17,68	0,92	39
1200	8,16	0,97	34,13
1220	31,96	0,97	41,71
1240	6,68	0,92	39,71

Provavelmente, a temperatura de 1220 °C contribuiu para a melhor homogeneização da microestrutura dos corpos cerâmicos, diminuindo a quantidade de defeitos tais como trincas e, principalmente, poros, pois tais defeitos funcionam como concentradores ou amplificadores de tensões e afetam de forma significativa a

resistência mecânica dos materiais cerâmicos. 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-de-prova 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 <sup>(4)</sup>.

Ainda na Tabela 1, pode ser observado a distribuição de probabilidade acumulada até a ruptura para os corpos-de-prova sinterizados em 1160, 1180, 1200, 1220 e em 1240 °C, respectivamente. Utilizou-se o valor de referência ( $R_c$ ), para o qual a probabilidade de falha é 0,632. Esse valor de referência ( $R_c$ ) é chamado de resistência ou tensão característica, o qual é um parâmetro de localização, ou seja, ele define quão baixa ou quão alta é tensão de ruptura dos corpos-de-prova. Como para o módulo de Weibull ( $m$ ), é desejável que o valor de ( $R_c$ ) seja o maior valor possível <sup>(4)</sup>. Pode-se observar os corpos cerâmicos sinterizados na temperatura de 1220 °C apresentaram o maior valor de resistência característica ( $R_c = 41,71$  MPa). Isto comprova que os corpos cerâmicos sinterizados em 1220 °C apresentam maior qualidade com relação a 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 investigado.

## 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 1160, 1180, 1200, 1220 e 1240 °C se ajustam a teoria de Weibull.

O módulo de Weibull para as amostras de revestimento cerâmico para piso apresentou maior valor na temperatura de 1220 °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 1220 °C foi maior do que a resistência característica apresentada nas amostras sinterizadas nas outras temperaturas propostas. Isso indica que a probabilidade de falha para os corpos-de-prova sinterizados em 1220 °C é menor do que nas outras temperaturas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UEMG/UNIDADE DE UBÁ, MG, e as Faculdades Integradas de Cataguases – FIC/GRUPO UNIS pelo apoio financeiro e suporte técnico.

## REFERÊNCIAS

1. 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 Florianópolis: ABM, 1999. p. 46021-46210.
2. MONTEIRO, A.L.A. Um Sistema para o Cálculo da Resistência Mecânica de Materiais Frágeis pelo uso do Método Estatístico de Weibull. Guaratinguetá, 2001. Monografia (Especialização em Informática Empresarial) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.
3. MENEGAZZO, A.P.N.; PASCHOAL, J.O.A.; ANDRADE, A.M.; CARVALHO, J.C.; GOUVÊA, D. Avaliação da Resistência Mecânica e Módulo de Weibull de Produtos tipo Grês Porcelanato e Granito - São Paulo: CERÂMICA INDUSTRIAL, 2002. - 7: Vol. I.
4. 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.

## APPLICATION OF WEIBULL'S STATISTICAL IN THE EVALUATION OF FLOOR TILE

### ABSTRACT

*The objective of this work is to evaluate the mechanical strength of floor tile as a function of the sintering temperature through Weibull Statistical. Ceramic pieces were prepared by uniaxial pressing and sintered at 1160, 1180, 1200, 1220 and 1240°C using a fast firing cycle. The flexural strength of the ceramic pieces fired was determined. Weibull statistic was applied to the data of modulus of rupture in order to determine the Weibull modulus and characteristic strength of the samples. The flexural strength test data resulted in Weibull distributions. The analysis of the Weibull revealed that the Weibull modulus was high at 1220 °C.*

**Keywords:** *Weibull Statistic, resistência mecânica, Quality.*