

Processamento x Propriedades de Grês Porcelânico

**Rodrigo T. Zauber^{1,2}, Fabiana P. de Deus²,
Madara P. Carvalho², Roberta S. S. Bruno² e
Anselmo O. Bosch²**

¹ PPGCEM - DEMa/UFSCar

² Laboratório de Revestimentos Cerâmicos - LaRC, DEMa/UFSCar

e-mail: pzuba@iris.ufscar.br

Resumo: Este trabalho avalia a influência da pressão de compactação, do ciclo de queima e da temperatura máxima de queima na gresificação de duas massas para a produção de grês porcelânico, através da análise da absorção de água, da retração linear de queima e do módulo de resistência à flexão das peças queimadas. Tendo como objetivo melhorar a compreensão do efeito dos diversos ajustes realizados nas linhas de produção, foi utilizada a técnica de planejamento fatorial para quantificar a influência das variáveis. A metodologia mostrou-se eficiente para relacionar as variáveis com as propriedades após a queima estudada.

Palavras-chaves: grês porcelânico, planejamento de experimento, processamento

1. Introdução

A fabricação de revestimentos cerâmicos envolve diversas variáveis ao longo de cada etapa do processo produtivo, relacionadas com os ajustes de cada equipamento (moinhos, prensas, linhas de esmaltação/decoração, secadores, fornos). Somente quando os ajustes de cada etapa estão adequados obtém-se um produto final de maneira eficiente, econômica e controlada, com poucas perdas. Entretanto, em situações em que existe a necessidade de alguma alteração nas variáveis, a experiência pessoal é o recurso mais utilizado para realizar a alteração, baseando-se em métodos não-estatísticos tais como:

- ajuste de uma única variável, onde mede-se a propriedade ou característica desejada conforme o ajuste é alterado;
- ajuste de uma variável de cada vez, onde cada variável a ser estudada é alterada entre diversos níveis até a obtenção de um valor “ótimo”, após o que mantém-se fixa esta variável e outra variável é alterada até o seu “ótimo”. Este procedimento repete-se, variável por variável, até que todas tenham sido estudadas; e
- variação aleatória de múltiplas variáveis (ou tentati-

va e erro), sendo esta a técnica que menos fornece informações sobre as alterações realizadas.

O controle da produção de qualquer indústria de revestimentos cerâmicos utilizando-se apenas as técnicas citadas acima pode se mostrar extremamente dependente do conhecimento de um único indivíduo e suscetível a imprevistos, tornando a produção pouco robusta.

Visando à tornar o processo produtivo mais previsível e flexível, as técnicas de planejamento estatístico têm como objetivo permitir que os ajustes sejam feitos com uma metodologia capaz de explicar eficientemente o que cada ajuste modificou na propriedade que se busca melhorar, seja ela relacionada com o produto durante o processamento ou com o produto acabado.

A técnica conhecida como planejamento fatorial é uma ferramenta muito útil quando deseja-se avaliar a influência de dois ou mais fatores em uma ou mais propriedades, possibilitando que sejam avaliadas interações entre os fatores. Ou seja, podem ser descobertas combinações dos fatores diferentes das utilizadas rotineiramente que sejam capazes simultaneamente de originar as mesmas propriedades (ou melhorá-las) e de reduzir tempos ou custos envolvidos na produção. Na pior das hipóteses, quando não é alcançado o

objetivo desejado, têm-se uma melhor compreensão da influência de cada fator avaliado na propriedade estudada. As exigências para a aplicação desta técnica são:

- a variação das características medidas ou avaliadas devem ser aproximadamente lineares ao longo do intervalo estudado;
- os fatores devem ser fixos nos valores determinados;
- os experimentos devem ser realizados em ordem aleatória;
- assume-se que os resultados seguem uma distribuição normal.

A técnica de planejamento estatístico de experimento, para ser eficientemente utilizada, depende de alguns fatores (Montgomery, 1984):

- utilizar o conhecimento não-estatístico do problema; o conhecimento e a experiência anterior na área de estudo permitem a escolha dos fatores de estudo, determinar os níveis dos fatores, decidir quantas réplicas analisar, entre outros;
- manter o planejamento e a análise tão simples quanto possível; métodos de planejamento e análise relativamente simples podem funcionar melhor que planejamentos complexos ou sofisticados, e planejamentos feitos sem atenção não conseguirão, nem com a mais complexa e elegante estatística, salvar a situação;
- reconhecer a diferença entre significância prática e estatística;
- os experimentos são freqüentemente iterativos. É interessante lembrar que, na maior parte das situações, é pouco sábio planejar um experimento muito compreensivo no início do estudo. Um planejamento bem sucedido exige conhecimento de informações que não são totalmente conhecidas no início, mas são esclarecidas durante o experimento, favorecendo que este seja iterativo e seqüencial.

2. Metodologia

A técnica de planejamento fatorial foi testada em duas massas para a produção de grês porcelânico. Os fatores de interesse (variáveis) analisados neste trabalho foram:

- pressão de compactação (P), 500 kgf/cm² e 667 kgf/cm²;
- ciclo de queima (C), 55 min e 65 min;
- temperatura máxima de queima (T), 1200 °C e 1225 °C.

O planejamento fatorial utilizado foi o 2³, onde foram definidas três variáveis (P, C e T) a dois níveis. A representação do experimento (Fig. 1) auxilia na compreensão dos cálculos para estimar os efeitos de cada variável.

Na Tabela 1 têm-se as combinações das variáveis avaliadas neste trabalho. A ordem de realização dos experimentos, porém, deve ser aleatória.

O objetivo do trabalho, avaliar e quantificar a influência das variáveis na absorção de água, na retração linear de queima e no módulo de resistência à flexão das peças queimadas, depende que as outras variáveis de processamento sejam mantidas fixas. A composição química das massas após a queima e os resíduos nas malhas 230 (63 µm) e 325 (45 µm) são apresentados na Tabela 2.

A preparação das massas foi feita através de granulação com 6,0 ± 0,1 % de umidade (base seca) em malha de 500 µm, prensagem uniaxial de corpos de prova em mol-

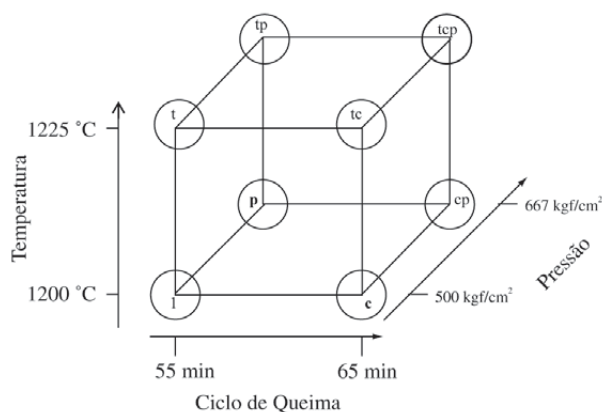


Figura 1. Representação gráfica dos experimentos realizados.

Tabela 1. Experimentos realizados com as massas para grês porcelânico.

| Experimento | Pressão de compactação (kgf/cm ²) | Ciclo de queima (min) | Temperatura máxima de queima (°C) |
|-------------|---|-----------------------|-----------------------------------|
| 1 | 500 | 55 | 1200 |
| t | 500 | 55 | 1225 |
| c | 500 | 65 | 1200 |
| tc | 500 | 65 | 1225 |
| p | 667 | 55 | 1200 |
| tp | 667 | 55 | 1225 |
| cp | 667 | 65 | 1200 |
| tcp | 667 | 65 | 1225 |

Tabela 2. Análise química por Fluorescência de raios X e resíduo das massas estudadas.

| Massa | Óxidos (% em massa) | | | | | | | | | Resíduo (% em massa) | |
|-------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----|-----|------------------|-------------------|--------|----------------------|------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | outros | #230 | #325 |
| 1 | 70,0 | 21,7 | 0,8 | 0,5 | 0,3 | 1,9 | 1,0 | 3,8 | 0,1 | 2,5 | 6,9 |
| 2 | 57,8 | 32,8 | 1,0 | 0,7 | 0,1 | 1,9 | 5,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,8 |

Tabela 3. Absorção de água, retração linear de queima e módulo de resistência à flexão das massas 1 e 2; P = pressão de compactação, C = ciclo de queima e T = temperatura máxima de queima.

| Experimento | P (kgf/cm ²) | C (min) | T (°C) | Massa 1 | | | Massa 2 | | |
|-------------|-----------------------------|------------|-----------|-----------|------------|--------------|-----------|------------|--------------|
| | | | | AA (%) | RLq (%) | MRF (MPa) | AA (%) | RLq (%) | MRF (MPa) |
| l | 500 | 55 | 1200 | 0,82 | 6,6 | 39,9 | 1,36 | 7,0 | 51,2 |
| t | 500 | 55 | 1225 | 0,43 | 6,6 | 45,4 | 0,48 | 7,7 | 55,3 |
| c | 500 | 65 | 1200 | 0,41 | 6,5 | 38,3 | 1,46 | 6,6 | 53,7 |
| tc | 500 | 65 | 1225 | 0,11 | 6,4 | 46,6 | 0,62 | 7,6 | 52,5 |
| p | 667 | 55 | 1200 | 0,71 | 6,2 | 43,2 | 1,00 | 6,7 | 63,0 |
| tp | 667 | 55 | 1225 | 0,45 | 5,9 | 48,3 | 0,39 | 7,1 | 57,2 |
| cp | 667 | 65 | 1200 | 0,28 | 5,6 | 40,9 | 0,75 | 6,4 | 57,5 |
| tcp | 667 | 65 | 1225 | 0,11 | 5,9 | 49,7 | 0,48 | 7,2 | 54,4 |

de de 6 × 2 cm, secagem a 110 °C e queima em forno de laboratório Maitec “ciclo rápido”, com patamar de cinco minutos na temperatura máxima.

Os efeitos de cada variável (P, C e T) e das interações (TP, TC, CP e TCP) são calculados através das Equação A, B, C, D, E, F e G (Montgomery, 1984).

$$P = [p + cp + tp + tcp - c - t - tc - (1)] / 4 \quad (A)$$

$$T = [t + tc + tp + tcp - c - p - cp - (1)] / 4 \quad (B)$$

$$C = [c + tc + cp + tcp - p - t - tp - (1)] / 4 \quad (C)$$

$$TP = [tp + tcp + c + (1) - p - t - cp - tc] / 4 \quad (D)$$

$$TC = [tc + tcp + p + (1) - c - t - cp - tp] / 4 \quad (E)$$

$$CP = [cp + tcp + t + (1) - p - c - tp - tc] / 4 \quad (F)$$

$$TCP = [p + t + c + tcp - tp - tc - cp - (1)] / 4 \quad (G)$$

Este procedimento permite individualizar a estimativa do efeito da alteração de cada fator na propriedade ou característica de interesse, sejam os fatores ajustes de algum equipamento (como neste caso, onde foram feitos ajustes na carga de prensagem, no tempo do ciclo de queima e na temperatura máxima) ou até mesmo equipamentos diferentes (como moinhos ou prensas).

3. Resultados

A caracterização quanto à absorção de água, retração linear de queima e módulo de resistência à flexão dos corpos de prova obtidos a partir das massas 1 e 2 é apresentada na Tabela 3, sendo cada valor a média de quatro corpos de prova ensaiados por condição. A densidade aparente após secagem das peças prensadas da massa 1 a 500 kgf/cm² e 667 kgf/cm² foram 2,01 ± 0,01 g/cm³ e 2,05 ± 0,02 g/cm³ e da massa 2 a 500 kgf/cm² e 667 kgf/cm² foram

2,00 ± 0,02 g/cm³ e 2,06 ± 0,01 g/cm³, respectivamente.

Os efeitos de cada fator e interação, calculados através das equações A a G, são apresentados na Tabela 4; por convenção, o experimento (1) foi adotado como “ponto zero”.

Os valores apresentados para os efeitos e interações, deve-se lembrar, são valores médios referentes ao experimento, indicando a média do efeito da alteração. Para facilitar a avaliação do efeito nas propriedades estudadas de cada alteração dos parâmetros de controle, dois exemplos serão utilizados:

- i) uma certa massa cerâmica, utilizada na produção de grês porcelânico, era processada conforme a condição (1) gerando um produto adequado à sua classificação. Após a necessidade de substituição de uma matéria-prima na formulação, a massa passou a apresentar as características da massa 1 na condição (1), com absorção de água acima da desejada e baixa resistência mecânica. Realizando-se um experimento como este com a nova formulação (massa 1), torna-se fácil a identificação de quais ajustes são mais eficientes para resolver o problema. Neste caso, o aumento do tempo do ciclo de queima (efeito C, -0,37%), seguido do aumento da temperatura de queima (efeito T, -0,28%) são os ajustes que mais contribuem para reduzir a absorção de água. Entretanto, o efeito C reduz a resistência mecânica, enquanto o efeito T aumenta a resistência mecânica. Assim, o ajuste apenas da temperatura permite que o produto passe a ser novamente adequado. Vale a pena notar que outras soluções, como as obtidas nos experimentos tc e tcp, também originam produtos com absor-

Tabela 4. Efeitos dos fatores e das interações na absorção de água (AA), retração linear de queima (RLq) e módulo de resistência à flexão (MRF) das massas 1 e 2.

| Fatores e interações | EFEITOS | | | | | |
|----------------------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
| | Massa 1 | | | Massa 2 | | |
| | AA (%) | RLq (%) | MRF (MPa) | AA (%) | RLq (%) | MRF (MPa) |
| P | -0,06 | -0,6 | 3,0 | -0,32 | -0,4 | 4,8 |
| T | -0,28 | 0,0 | 6,9 | -0,65 | 0,7 | -0,6 |
| C | -0,37 | -0,2 | -0,3 | 0,02 | -0,2 | 0,0 |
| TP | 0,06 | 0,0 | 0,0 | 0,21 | -0,1 | -2,9 |
| TC | 0,04 | 0,1 | 1,6 | 0,09 | 0,2 | -0,6 |
| CP | -0,01 | -0,1 | -0,1 | -0,10 | 0,1 | -2,0 |
| TCP | 0,00 | 0,2 | 0,2 | 0,07 | 0,0 | 2,0 |

ção de água e resistência mecânica adequadas.

- ii) a massa 2, processada na condição **t**, esporadicamente apresenta problemas relacionados a desvios dimensionais. Como alternativa para minimizar o problema, foi sugerido que a retração linear de queima desta massa fosse reduzida. Novamente, através de um experimento como este pôde ser identificada a temperatura de queima como o fator que mais contribui no aumento da retração linear de queima (efeito **T** de 0,7%), porém, a redução da temperatura de queima para 1200 °C eleva a absorção de água para outra classe de produto. Neste experimento, a pressão de compactação (efeito **P**), contribui simultaneamente na redução da retração e da absorção de água, sendo a somatória dos efeitos **T**, **P** e **TP** favorável tanto à redução da retração linear como da absorção de água (0,2 e -0,76, respectivamente) em relação aos efeitos apenas da temperatura de queima (0,7 para a retração linear e -0,65 para a absorção de água).

4. Conclusões

O comportamento após a queima das duas massas estudadas pôde ser melhor compreendido através da utilização da técnica de planejamento de experimento. Este tipo de estudo permite que os ajustes necessários para sanar um problema durante a produção de revestimentos cerâmicos, sejam do tipo grês porcelânico ou não, possam ser feitos de maneira mais eficiente e previsível, evitando que os ajustes sejam feitos por tentativa e erro.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil.

6. Bibliografia

1. Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. 2ª Ed., John Wiley and Sons, New York, 1984. 538 p.