

# Efeito do Teor de Umidade e da Pressão de Prensagem sobre as Características de Revestimentos Cerâmicos

**Gustavo R. de Paula, Eduardo Quinteiro,  
e Anselmo O. Boschi**

*Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais,  
Rodovia Washington Luiz, km 235, C.P. 676, 13.565-905 São Carlos - SP;  
E-Mail: daob@power.ufscar.br*

**Resumo:** Este trabalho estuda os efeitos do teor de umidade e pressão de compactação sobre as características de revestimentos cerâmicos antes, durante e após a queima. Os resultados obtidos evidenciam a importância da densidade da peça seca e mostram que o controle deste parâmetro é fundamental para que características como o módulo de ruptura a flexão da peça seca e queimada, assim como a retração linear e absorção de água das peças queimadas possam ser mantidas dentro dos intervalos de variação desejados.

**Palavras-Chave:** *processamento cerâmico, umidade da massa, pressão de compactação, revestimentos cerâmicos*

## Introdução e Objetivo

Mesmo nas melhores indústrias de revestimentos cerâmicos a umidade da massa varia ao longo do tempo e a pressão de compactação varia de uma prensa para outra, de uma cavidade para outra, de uma região para outra dentro de uma mesma cavidade e também ao longo do tempo. Essa variação é inevitável. Entretanto, é preciso estabelecer os limites dentro dos quais a umidade e pressão podem variar sem comprometer as características do produto final. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi estudar os efeitos da variação da pressão de compactação e da umidade da massa sobre as características de revestimentos cerâmicos antes e após a queima.

## Metodologia

O pó granulado utilizado foi produzido industrialmente por via úmida e possui uma formulação que pode ser considerada típica das utilizadas na fabricação de revestimentos por monoqueima. O pó atomizado original possuía uma umidade de aproximadamente 6,5%. Para que se pudesse variar controladamente a sua umidade, inicialmente eles foram secos em estufa à 110 °C por 24 h, e a seguir foram umedecidos até atingirem os teores de umidade

desejados e mantidos em sacos plásticos fechados por 24 h antes de serem utilizados. Estudos preliminares demonstraram que esse procedimento não afetava significativamente o comportamento do pó granulado durante a compactação.

Os corpos de prova foram conformados em prensa hidráulica na forma de barrinhas com massa, comprimento e largura de aproximadamente 10 g, 7 cm e 1 cm, respectivamente.

Os compactos recém-prensados foram pesados e medidos com instrumentos de precisão da ordem de  $\pm 0,0001$  g e  $\pm 0,005$  cm. Posteriormente, estes foram secos em estufa a 110 °C por 24 h, a fim de que se pudesse determinar a umidade de prensagem, a densidade aparente e a retração de secagem das diferentes amostras. Os módulos de ruptura foram medidos pelo ensaio de flexão em três pontos.

Todas as amostras foram queimadas a 1100 °C em forno do tipo mufla de laboratório com taxa de aquecimento de 10 °C/min e 4 min de patamar. Para a caracterização dos corpos de prova após a queima mediu-se a retração linear de queima ( $RL_q$ ), a absorção de água (AA) e o módulo de ruptura à flexão em três pontos ( $MRF_q$ ).

Todos os resultados apresentados são a média de 5 medidas.

## Resultados e Discussão

### Comportamento antes da queima

A Fig. 1 apresenta a variação da densidade aparente após a secagem ( $D_s$ ) como uma função do teor de umidade ( $U$ ) do pó atomizado submetidos às várias pressões de compactação ( $P$ ). Como pode-se observar, para cada pressão de compactação empregada a  $D_s$  aumenta linearmente com o aumento da pressão. Para as pressões mais elevadas e os maiores teores de umidade, o comportamento deixa de ser linear.

Sob o ponto de vista prático os resultados apresentados na Fig. 1 mostram que uma mesma densidade da peça seca ( $D_s$ ) pode ser alcançada a partir de várias combinações de umidade ( $U$ ) e pressão de compactação ( $P$ ). As inclinações das retas obtidas por regressão linear mostram a sensibilidade da massa às variações da umidade, e a distância entre elas, uma vez que a variação da pressão entre curvas subsequentes é constante, a sensibilidade à variação da pressão.

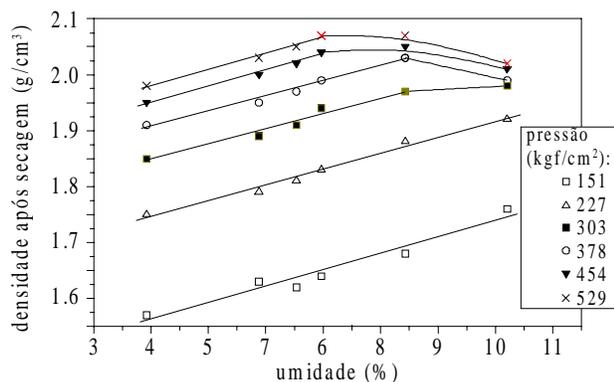
O pó de partida é fundamentalmente composto por partículas e grânulos. As partículas são as menores entidades sólidas (como por exemplo partículas de argila e de quartzo) e os grânulos são formados pela aglomeração das partículas produzidas como resultado das forças de capilaridade resultantes da presença da água.

Para que se possa explicar os resultados apresentados na Fig. 1, é preciso lembrar que o volume inicial do compacto é dado pela soma do volume das partículas sólidas e dos espaços vazios entre elas. Esses espaços vazios, como mostram as Figs. 2 e 3, podem ser de dois tipos:

- espaços vazios entre as partículas sólidas dentro dos grânulos (intra-granulares) e
- espaços vazios entre os grânulos (inter-granulares).

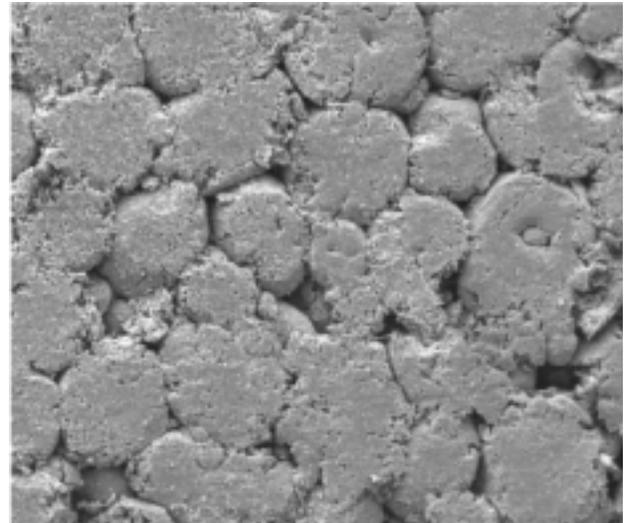
$$\uparrow D_s = \frac{\text{massa}}{(\text{Vol. poros intra-granulares}) + \downarrow (\text{Vol. poros inter-granulares})} \quad (1)$$

Como a densidade aparente do compacto é dada pela razão entre a massa e o volume do mesmo, e a massa

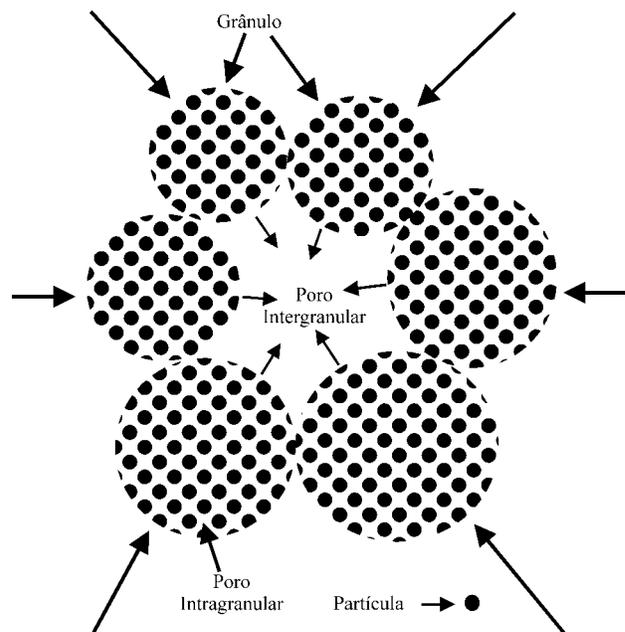


**Figura 1.** Variação da densidade após a secagem com a umidade da massa e a pressão de compactação.

permanece constante durante a compactação, a única forma de se aumentar a densidade é através da redução do volume. Os poros intra-granulares já são praticamente do mesmo tamanho das partículas do pó e dificilmente podem sofrer uma redução significativa do seu volume, portanto pouco podem contribuir para o aumento da densidade do compacto. Assim sendo, como mostram a Eq. 1 e as Figs. 2 e 3, o aumento da densidade durante a compactação é uma decorrência da deformação plástica dos grânulos que ao se



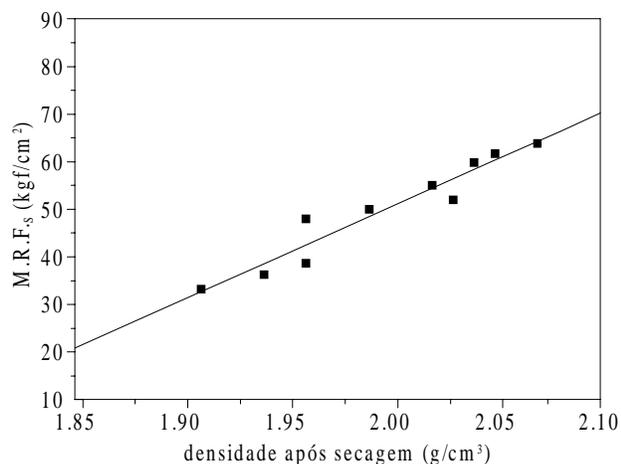
**Figura 2.** Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura mostrando compacto verde.



**Figura 3.** Representação esquemática de seis grânulos, de suas partículas primárias e dos poros intergranulares e intra-granulares. As setas mais externas representam a pressão de compactação e as mais internas a deformação dos grânulos para dentro do poro intergranular.

deformarem passam a ocupar os espaços vazios que havia entre eles (porosidade intergranular)<sup>1,2,3</sup>. Nos casos em que os grânulos são ocios, bastante comum nos pós granulados produzidos por atomização, há também o preenchimento desses ocios. Portanto a densificação depende da facilidade com que os grânulos se deformam plasticamente, ou seja, da sua plasticidade. Sob esse ponto de vista, considerando que a umidade atua como um lubrificante ou plastificante da argila, e portanto diminui o esforço necessário para que as partículas de argila, dentro dos grânulos, comecem a escorregar umas sobre as outras, pode-se explicar os resultados obtidos. Nesse contexto a inclinação das retas obtidas pode ser vista como uma medida da taxa do aumento da facilidade com que os grânulos são deformados como uma consequência do teor de água adicionado. Ao aumentar-se a pressão aumenta-se o grau de deformação, mas o efeito plastificante da água continua sendo o mesmo e por isso as retas para as diferentes pressões são paralelas. Entretanto, ao se aumentar a densidade o volume de espaços vazios entre as partículas por unidade de volume da amostra diminui, e com ele, a mobilidade das partículas. Assim sendo, resta um volume cada vez menor para que a água adicionada, além de revestir a superfície das partículas e torná-las plásticas, possa se movimentar entre elas. Como uma consequência disso pode-se notar que ao aumentarmos a pressão, a distância entre as retas diminui. Além disso, as densidades correspondentes às pressões mais elevadas e maiores teores de umidade, parte superior direita da Fig. 1, apresentam um ligeiro desvio da linearidade. Este desvio é discutido em detalhe em outro trabalho<sup>1</sup>.

Como mostra a Fig. 4, o módulo de ruptura a flexão (MRF<sub>s</sub>) das amostras secas aumenta linearmente com a densidade após a secagem. A resistência mecânica das peças secas determina a sua resistência ao manuseio. Sob esse aspecto, quanto maior for o MRF<sub>s</sub>, melhor é o compacto. Entretanto, ao se aumentar excessivamente a densi-



**Figura 4.** Variação do módulo de ruptura a flexão dos compactos secos em função da densidade após a secagem.

dade dos compactos, pode-se reduzir a sua permeabilidade e conseqüentemente dificultar a oxidação da matéria orgânica presente na massa. A matéria orgânica aprisionada no interior da peça, sem que o oxigênio possa chegar até ela e que os gases provenientes da sua oxidação possam sair da peça, pode dar origem ao defeito conhecido como coação negro.

Os resultados obtidos podem ser explicados considerando que as amostras após secagem apresentam comportamento frágil e portanto obedecem à lei de Griffith<sup>4</sup>. Assim sendo, o principal fator na determinação do MRF<sub>s</sub> é o tamanho do maior defeito presente no compacto. Neste caso, os chamados defeitos estruturais presentes nos compactos são os espaços vazios entre as partículas. Tendo em vista que os poros intragranulares são consideravelmente menores que os intergranulares, são estes últimos os principais responsáveis pela fratura dos compactos secos. Mas, como mencionado anteriormente (Fig. 3), os poros intergranulares são preenchidos pela deformação plástica dos grânulos. Portanto, era de se esperar que, dentro dos limites estudados, quanto maior a pressão de compactação e o teor de umidade, menores seriam os tamanhos dos poros intergranulares e conseqüentemente maior o MRF<sub>s</sub>.

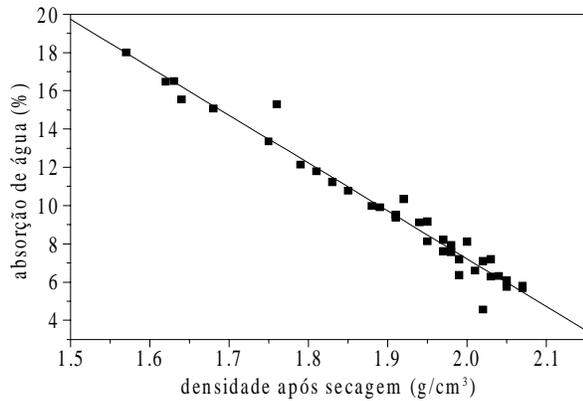
O fato de que os resultados experimentais apresentados nas Figs. 1 e 4 podem ser representados por linhas retas permite que se possa estimar de modo simples os efeitos da variação da umidade e pressão de compactação sobre a densidade após a secagem e a resistência mecânica das peças secas.

Cabe agora procurar correlacionar esses resultados com o comportamento da peça durante a queima e as suas características após a queima. Tendo em vista que os resultados apresentados acima sugerem que o parâmetro de controle do processamento antes da queima deva ser a densidade a seco e não o teor de umidade e a pressão de compactação, a análise do comportamento durante a queima e as características do produto queimado será feita em relação a este parâmetro.

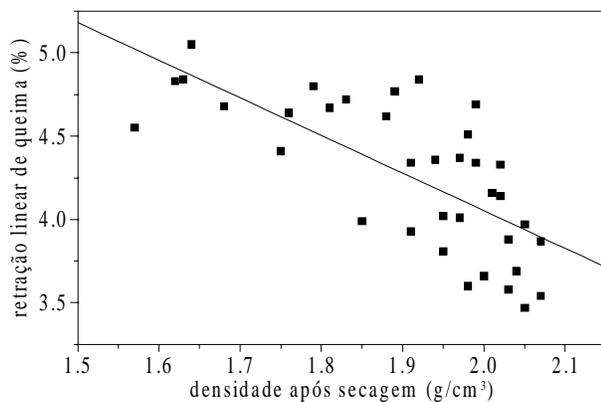
#### *Comportamento durante a queima e características após a queima*

As Figs. 5 a 7 mostram a variação da absorção de água (AA), retração linear (RL<sub>q</sub>) e módulo de ruptura a flexão (MRF<sub>q</sub>) de amostras queimadas em função da densidade após a secagem, independentemente das condições de umidade e pressão utilizadas para confeccioná-las. Como era de se esperar, tanto a absorção de água (AA) como a retração linear de queima (RL<sub>q</sub>) diminuem com o aumento da densidade da peça seca (D<sub>s</sub>) e o módulo de ruptura a flexão (MRF<sub>q</sub>) aumenta.

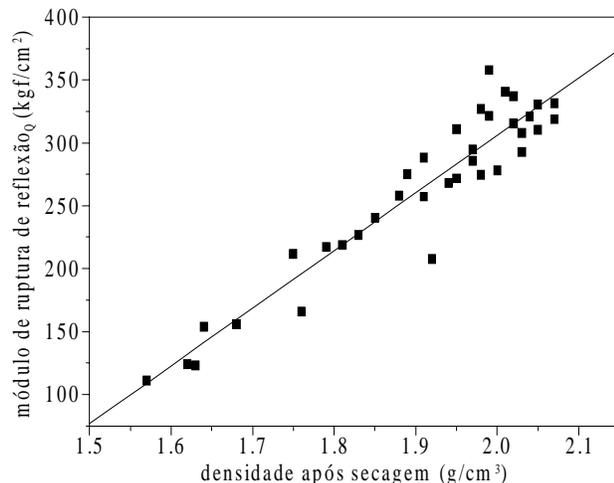
O mais interessante, entretanto, é o fato de que a dependência dessas três variáveis, AA, RL<sub>q</sub> e MRF<sub>q</sub>, fundamentais para a fabricação de revestimentos cerâmicos, com a densidade das peças secas também é linear e que, para o



**Figura 5.** Variação da absorção de água (AA) em função da densidade dos compactos secos, independentemente dos teores de umidade e pressão de compactação utilizadas na sua confecção.

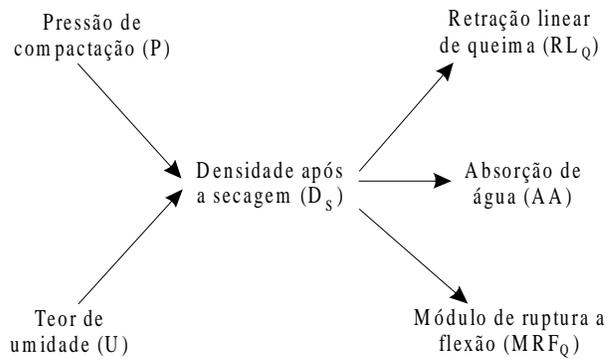


**Figura 6.** Variação da retração linear de queima em função da densidade dos compactos secos, independentemente dos teores de umidade e pressão de compactação utilizadas na sua confecção.



**Figura 7.** Variação do módulo de ruptura à flexão após a queima em função da densidade das peças secas, independentemente da umidade e pressão de compactação utilizadas na sua confecção.

sistema estudado, parecem não depender do teor de umidade da massa nem da pressão de compactação mas sim da



**Figura 8.** Representação esquemática da inter-relação entre as variáveis de processo, a densidade da peça seca e as características da peça queimada.

densidade a seco, resultante da combinação dessas duas variáveis de processamento.

Os resultados obtidos indicam que para se manter a AA,  $RL_q$  e a  $MRF_q$  dentro das faixas de variação desejadas, é fundamental que se mantenha a densidade do compacto após a secagem dentro do intervalo correspondente (Fig. 8). Esses intervalos podem ser facilmente obtidos a partir das Figs. 1, 5, 6 e 7.

## Conclusões

Para uma determinada massa, o teor de umidade e a pressão de compactação determinam a densidade da peça seca.

Peças com uma mesma densidade podem ser obtidas através de várias combinações de umidade e pressão.

As características módulo de ruptura a flexão das peças secas e queimadas, absorção de água e retração linear de queima variam linearmente com a densidade da peça seca.

O controle da densidade da peça seca é um dos principais parâmetros de controle de processo para a fabricação de revestimentos cerâmicos.

## Bibliografia

1. Quinteiro, E. "Efeito das características de pós granulados sobre o processamento e qualidade de revestimentos cerâmicos"; Tese de Mestrado do PPG-EM, 1996.
2. Amorós, J.L.; Blasco, A.; Navarro, J.E.; Beltran, V.; EScardino, A.B. "Variables en la Compactacion de Soportes Cerámicos de Pavimento y Revestimiento", *Tecnica Cerámica* vol. 105, 792-798.
3. Amorós, J.L.; Moreno, A.; Orts, M.J.; EScardino, A. "La operación de prensado en la fabricación de pavimentos por monococción", *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* vol. 29, número 3, 151-158.
4. Van Vlack, L.H. Propriedade dos Materiais Cerâmicos, Ed. Da USP, 1973, p. 114