

# Estudo comparativo da queima rápida com a queima tradicional nas propriedades de materiais cerâmicos de base argilosa

## *(Comparative study of fast firing with traditional firing on the properties of ceramic clay raw materials)*

R. P. S. Dutra<sup>1</sup>, M. L. Varela<sup>1</sup>, R. M. Nascimento<sup>1,2</sup>, U. U. Gomes<sup>1,3</sup>, A. E. Martinelli<sup>1,2</sup>, C. A. Paskocimas<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPgCEM,

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Mecânica - DEM,

<sup>3</sup>Departamento de Física Teórica e Experimental - DFTE

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN 59072-970

### Resumo

O estudo do ciclo de queima de materiais cerâmicos tradicionais é de grande interesse industrial, visto que são processos que utilizam grande quantidade de energia. Com um ciclo de queima adequado é possível obter um produto de melhor qualidade e com menor consumo de energia térmica, aumentando a produtividade e diminuindo os custos de produção. No Brasil, atualmente, a maioria dos ciclos de queima dos produtos da cerâmica estrutural tem duração em torno de 24 h, sendo normal, em alguns casos, ciclos que chegam a durar mais de 30 h. A inclusão de ciclos de queima mais curtos é atualmente o mais importante processo de inovação em estudo para otimização do processo de queima da indústria de cerâmica estrutural. Este trabalho faz um estudo comparativo das propriedades tecnológicas de materiais cerâmicos de base argilosa queimados por um ciclo de queima tradicional (queima lenta) e um ciclo de queima rápida. Foram utilizadas neste trabalho matérias-primas argilosas procedentes de indústrias de cerâmica estrutural. As taxas de queima utilizadas foram de 1 °C/min (ciclo lento) e 20 °C/min (ciclo rápido) e as temperaturas máximas para as duas taxas de queima foram de 850 °C, 950 °C e 1050 °C. Os resultados obtidos possibilitam uma melhor compreensão dos efeitos do ciclo de queima nas propriedades tecnológicas dos produtos da cerâmica estrutural, permitindo incluir ciclos de queima rápida dependendo das características iniciais das matérias-primas e do processamento utilizado.

**Palavras-chave:** argilas, cerâmica estrutural, ciclo de queima, energia, propriedades tecnológicas.

### Abstract

*In industrial processes that use high temperatures, greater fire great can reduce the cost of production and increase productivity. The use of faster and more efficient fire cycles has been little investigated by the structural ceramic industry in Brazil. As clay materials are submitted to high temperatures, pores are sealed by mass transport mechanisms and a series of thermally activated processes involving the initial constituents. The reactions that take place during firing depend on the nature and composition of the clay materials used. The firing cycle must be tuned to assure the technological performance required for each product, but at the same time minimize the consumption of energy. Samples were pressed under 25 MPa, dried and fired in an electric furnace. The heating rates selected were 2 °C/min (slow cycle) and 20 °C/min (fast firing). The holding time at the sintering temperatures (950 °C and 1050 °C) were null. This paper presents for the first time the use of a fast fire rate for raw materials using a traditional slow cycle and fast cycle were tested from physical and mechanical properties of the burned pieces were measured, with emphasis on water absorption and linear shrinkage tests. Microstructural analysis was performed using X-ray diffraction. The results show that is possible to obtain products with equivalent water absorption values and in enhanced mechanic properties when is used the fast firing.*

**Keywords:** clays, ceramic, fire cycle, energy, technological properties.

## INTRODUÇÃO

A inclusão da queima rápida nos produtos da indústria de cerâmica estrutural ou vermelha é atualmente o mais importante processo de inovação em estudo para otimização do processo de queima desse setor.

No Brasil, a maioria dos ciclos de queima dos produtos da cerâmica estrutural dura em torno de 24 h, sendo normal em alguns casos ciclos que chegam a durar mais de 30 h, ocasionando baixa produtividade e grande consumo de

energia térmica. Em uma análise comparativa do processo produtivo da cerâmica estrutural do Brasil e da Alemanha [1], foi constatado que o processo de queima do Brasil utiliza ciclos de queima mal planejados, fornos ineficientes e combustíveis de alto impacto ambiental. Enquanto no Brasil o principal combustível é a lenha e a maioria dos fornos utilizados é do tipo intermitente, e poucos são do tipo semi-contínuo [2-5], o processo de queima da Alemanha predomina o gás natural com combustível e os fornos contínuos, tipo túnel e a rolos, tornam o processo de queima mais eficiente, com maior

produtividade e de menor agressão ambiental.

Entre os estudos mais importantes para otimizar o ciclo de queima e diminuir o tempo de queima da indústria de cerâmica estrutural é verificar as relações existentes entre a atuação do forno e o conjunto de ações físicas e químicas que ocorrem na matéria-prima, considerando que o forno emite energia a qual é transmitida de diversas maneiras ao produto em queima. Por sua vez, o produto capta essa energia emitida, e a utiliza para colocar em ação reações das mais diversas naturezas, responsáveis pelas modificações químicas e físicas no produto.

De modo idealizado, o que se deseja com a queima rápida é gerar energia térmica no forno a alta velocidade, transmitir essa energia a superfície das peças a alta velocidade, fazer penetrar essa energia em seu interior, também a elevada velocidade, e conseguir que as ações físicas e químicas a que é submetida à matéria-prima proporcione um produto cerâmico de aceitável qualidade e dentro das especificações técnicas [6].

As primeiras experiências industriais de queima rápida com blocos e telhas cerâmicas foram realizadas em 1989 na Alemanha e em 1992 na Itália [7]. No Brasil, ainda não se têm relatos da utilização de queima rápida no setor industrial. Os ciclos de queima mais rápidos no setor industrial brasileiro da cerâmica estrutural, utilizam fornos do tipo túnel, com ciclos de queima que variam com o tamanho dos fornos. Entretanto, a tecnologia de queima rápida em fornos do tipo a rolos já é tema de projetos em institutos de pesquisas e universidade, podendo ser uma tecnologia que, em breve, possa contribuir de forma positiva para o setor da cerâmica estrutural com a diminuição do tempo de queima, aumento da produtividade e menor agressão ao meio ambiente, devido à diminuição da emissão de gases poluentes. Contudo, está associada entre as principais dificuldades para inserir um ciclo de queima rápido na indústria de cerâmica estrutural a grande heterogeneidade das matérias-primas (argilas) e o fato das mesmas conterem, normalmente, apreciáveis quantidades de matéria orgânica e ferro, elementos que contribuem de maneira negativa quando se deseja acelerar um ciclo de queima. Portanto, o principal objetivo deste trabalho é investigar o comportamento nas propriedades tecnológicas de produtos cerâmicos desenvolvidos a partir de materiais argilosos de diferentes composições, submetidos a um ciclo de queima rápida em comparação com um ciclo de queima tradicional.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo comparativo da queima tradicional com a queima rápida foi realizado com três materiais-primas argilosas denominadas de “A”, “B” e “C”, todas estas pertencentes a três diferentes indústrias de cerâmica estrutural do estado do Rio Grande do Norte.

As materiais-primas argilosas inicialmente foram submetidas aos ensaios de granulometria, índices de plasticidade, análise química e análise granulométrica. A distribuição granulométrica realizou-se mediante um

equipamento de granulométrico de medição por laser (Cilas, 930). O índice de plasticidade (IP) das matérias-primas foi determinado a partir dos índices que delimitam o intervalo de consistência de uma massa, denominados limite de liquidez (LL) e de limite de plasticidade (LP). Na determinação do LL utilizou-se o método padronizado por Arthur Casagrande, de acordo com a norma ABNT NBR 6459 [8]. A determinação do LP foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 7180 [9]. As matérias-primas foram analisadas quimicamente por espectrometria de fluorescência de raios X em um equipamento da Shimadzu EDX-720, enquanto na análise mineralógica utilizou-se a difração de raios X, empregando um equipamento da Shimadzu XRD-6000.

Após ensaios de caracterização, as matérias-primas foram preparadas para a determinação das propriedades físico-mecânicas. Inicialmente, foram secas ao ar, destorroadas e classificadas por peneiramento na granulometria inferior a de 0,42 mm. Em seguida, foram secas em estufa elétrica (110 °C) por 24 h, homogeneizadas com 10% de água e conformadas em uma matriz metálica com dimensões de 6 cm x 2 cm, utilizando prensagem uniaxial de efeito simples de 3 ton. A etapa de queima, tanto a rápida quanto a tradicional, foi feita em um forno elétrico tipo câmara. Para efeito de comparação do ciclo de queima foi utilizado o mesmo forno. Na queima tradicional (lenta) utilizou-se uma taxa de aquecimento de 1 °C/min até as temperaturas finais de 850 °C, 950 °C e 1050 °C, com tempo total de ciclo de 850 min, 950 min e 1050 min, respectivamente. A queima rápida foi realizada a uma taxa de aquecimento de 20 °C/min até as temperaturas finais de 850 °C, 950 °C e 1050 °C, com tempo total de ciclo de 43 min, 48 min e 53 min, respectivamente.

As características dos corpos-de-prova submetidos aos ciclos de queima foram determinadas pelas propriedades tecnológicas. A absorção de água foi determinada pelo método da imersão, de acordo com o princípio de Arquimedes [10]. A retração linear foi calculada pela diferença entre o comprimento dos corpos-de-prova à verde após secagem e o comprimento dos corpos-de-prova queimados. A resistência mecânica (flexão em três pontos) foi determinada utilizando-se a máquina universal de ensaios Shimadzu. A partir dos resultados das propriedades tecnológicas foram selecionadas algumas das amostras para análise por microscopia eletrônica de varredura, a fim de comparar as microestruturas dos materiais processados pelos dois ciclos de queima.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela I contém os resultados da caracterização das matérias-primas obtidos pela análise química, pela análise granulométrica e pelos índices físicos. Observa-se que as matérias-primas apresentaram uma ampla variação da composição química, diferentes características granulométricas e diferentes índices de plasticidade. A matéria-prima “A” é entre as amostras a que apresenta menor quantidade de óxidos fundentes, além da menor quantidade de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, elemento este responsável pela cor vermelha após queima. O teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> das três matérias-primas

Tabela I - Composição química, diâmetro de inferior a 2  $\mu\text{m}$ , diâmetro médio ( $d_M$ ) e índice de plasticidade (IP) das matérias-primas.

[Table I - Chemical composition, particle size < 2  $\mu\text{m}$  and plasticity characteristics of the samples.]

Matérias-primas	A	B	C
		%	
SiO <sub>2</sub>	61,6	42,8	44,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,9	28,8	27,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,2	12,9	11,3
CaO	0,7	2,2	3,2
Na <sub>2</sub> O	1,2	1,5	2,6
K <sub>2</sub> O	2,7	5,1	5,4
MnO	0,1	0,2	0,2
TiO <sub>2</sub>	0,6	1,1	0,9
MgO	0,8	4,0	3,2
Outros	1,2	1,5	2,0
d < 2 $\mu\text{m}$	20,0	13,8	8,5
$d_M$ ( $\mu\text{m}$ )	7,7	9,8	19,1
IP	10,2	19,5	9,3

apresenta valores bastante próximos, diferentemente do maior conteúdo de SiO<sub>2</sub> da matéria-prima “A”. Com relação à análise granulometria, a matéria-prima “A” é a que possui maior quantidade de argila, caracterizada pelo percentual da fração de partícula com diâmetro (d) inferior a 2  $\mu\text{m}$ , seguida das matérias-primas “B” e “C”. Consequentemente, os diâmetros médios também obedecem a mesma sequência anterior. Quanto ao índice de plasticidade (IP) a matéria-prima “B” foi a que obteve maior plasticidade.

A Fig. 1 apresenta o resultado da análise mineralógica das matérias-primas obtido por difração de raios X. Observa-se que as três amostras apresentam diferentes minerais argilosos, tendo a matéria-prima “A” os minerais argilosos caulinita e illita, além do mineral não argiloso quartzo. A matéria-prima “B” possui a illita e a montmorilonita como constituintes argilosos e o quartzo como não argiloso, enquanto a matéria-prima “C” possui apenas o mineral argiloso illita, com quartzo e o feldspato albite como não argilosos. Observa-se também que o elevado índice de plasticidade da matéria-prima “B” constatado na Tabela I, deve-se a presença da

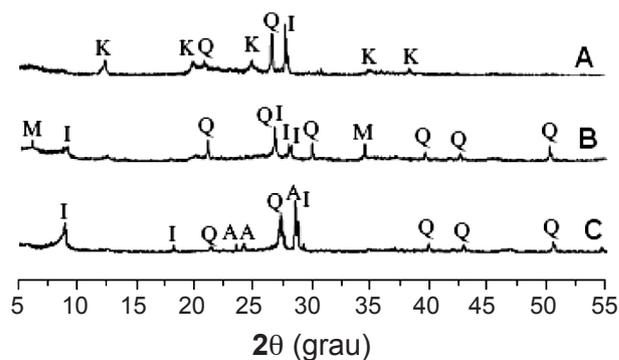


Figura 1: Padrão de difração de raios X das matérias-primas (K: caulinita, Q: quartzo, M: montmorilonita, I: illita, A: albite).

[Figure 1: X-ray diffraction patterns of the samples (K: Kaolinite, Q: quartz, M: Montmorillonite, I: Illite, A: albite).]

montmorilonita, a qual tem a capacidade de adsorver maior quantidade de água entre as suas camadas lamelares.

A Tabela II contém os resultados da absorção de água, da retração linear e da resistência mecânica das matérias-primas argilosas “A”, “B” e “C” submetidas ao ciclo de queima tradicional (lento). Observa-se que as matérias-primas apresentam propriedades tecnológicas diferentes. A matéria-prima “A” por conter menor quantidade de óxidos fundentes e maior quantidade de minerais argilosos (Tabela I) do tipo caulinita (Fig. 1) foi entre as matérias-primas estudadas a que apresentou maior absorção de água e menor resistência mecânica, principalmente nas temperaturas de 850 °C e de 950 °C. Diferentemente, a matéria-prima “B” foi a mais reativa, uma vez que contém minerais argilosos mistos, constituídos pela montmorilonita e illita, possuindo também elevada quantidade de óxidos fundentes. Pelo fato da matéria-prima “C” ter apresentado maior quantidade de minerais acessórios (não argilosos), representados pelo quartzo e pela albite e maior diâmetro médio das partículas, obteve a menor retração linear entre as argilas, inclusive com pequena expansão linear na temperatura de 850 °C. No entanto, na temperatura de 1050 °C a retração foi muito superior à retração em 850 °C, influenciando também em uma maior resistência mecânica, a qual passou de 5,7 MPa para 8,0 MPa.

A Tabela III contém os resultados da absorção de água, da retração linear e da resistência mecânica das matérias-primas argilosas “A”, “B” e “C” submetidas ao ciclo de

Tabela II - Propriedades tecnológicas das argilas: queima tradicional.

[Table II - Technological properties of the clays: slow cycle.]

Matérias-primas	Absorção de água - %			Retração linear - %			Resistência mecânica - MPa		
	850	950	1050	850	950	1050	850	950	1050
A	18,3 <sup>0,2</sup>	18,5 <sup>0,2</sup>	16,1 <sup>0,1</sup>	0,9 <sup>0,0</sup>	1,6 <sup>0,1</sup>	3,2 <sup>0,1</sup>	2,9 <sup>0,3</sup>	4,6 <sup>0,3</sup>	5,4 <sup>0,9</sup>
B	11,9 <sup>0,2</sup>	11,4 <sup>0,1</sup>	8,1 <sup>0,1</sup>	0,3 <sup>0,0</sup>	1,0 <sup>0,0</sup>	3,4 <sup>0,0</sup>	11,3 <sup>0,4</sup>	12,1 <sup>0,3</sup>	13,1 <sup>0,9</sup>
C	12,2 <sup>0,3</sup>	11,7 <sup>0,2</sup>	11,1 <sup>0,3</sup>	0,1 <sup>0,1</sup>	0,1 <sup>0,1</sup>	1,1 <sup>0,1</sup>	5,7 <sup>0,2</sup>	5,0 <sup>0,2</sup>	8,0 <sup>0,4</sup>

Tabela III - Propriedades tecnológicas das argilas: queima rápida.  
 [Table III - Technological properties of the clays: fast firing.]

Matérias-primas	Absorção de água - %			Retração linear - %			Resistência mecânica - MPa		
	850	950	1050	850	950	1050	850	950	1050
A	17,5 <sup>0,3</sup>	18,0 <sup>0,3</sup>	16,5 <sup>0,3</sup>	1,0 <sup>0,0</sup>	1,4 <sup>0,1</sup>	2,2 <sup>0,1</sup>	5,1 <sup>0,7</sup>	6,8 <sup>0,4</sup>	7,0 <sup>0,9</sup>
B	10,3 <sup>0,3</sup>	9,9 <sup>0,0</sup>	nd	0,3 <sup>0,1</sup>	0,8 <sup>0,0</sup>	nd	11,7 <sup>0,8</sup>	13,3 <sup>2,0</sup>	nd
C	11,7 <sup>0,2</sup>	11,5 <sup>0,1</sup>	11,3 <sup>0,2</sup>	-0,2 <sup>0,1</sup>	-0,1 <sup>0,1</sup>	0,0 <sup>0,0</sup>	4,9 <sup>0,3</sup>	5,3 <sup>0,3</sup>	10,1 <sup>0,2</sup>

queima rápido. Não foi possível determinar as propriedades tecnológicas da argila “B” na temperatura de 1050 °C, uma vez que os corpos-de-prova apresentaram algumas deformações (empenamento e trincas) quando submetida ao ciclo de queima rápido. Este resultado justifica-se pela elevada quantidade de óxidos fundentes desta argila, associado à alta retração linear na temperatura de 1050 °C constatada na Tabela II. Um fato importante a se considerar na queima com o ciclo rápido é que as propriedades determinadas seguiram o mesmo comportamento da queima com o ciclo tradicional, ou seja, diminuição da absorção de água e aumento da retração linear e resistência mecânica. Em relação às matérias-primas, a menor absorção de água e maior resistência mecânica continuou sendo a da matéria-prima “B” e a menor retração linear a da matéria-prima “C”.

A Fig. 2 apresenta uma comparação da absorção de água das matérias-primas com relação ao ciclo de queima tradicional e ao ciclo de queima rápido, obtidos dos resultados da Tabela II e da Tabela III. Observa-se que a variação do ciclo de queima teve maior influência na matéria-prima “B”. Enquanto na matéria-prima “B” a diminuição da absorção de água com a queima rápida foi de 13,5% (850 °C) e 13,2% (950 °C), nas matérias-primas “A” e “C” foi de apenas 4,4% (850 °C), 2,7% (950 °C) e 4,1% (850 °C), 1,7% (950 °C), respectivamente. Na temperatura de 1050 °C, com o ciclo de queima rápido, a absorção de água foi superior a 2,5% na matéria-prima “A” e 1,8% na matéria-prima “C”. O fato da matéria-prima “B” ser a mais reativa e conseqüentemente influenciar diretamente na absorção de água, justifica-

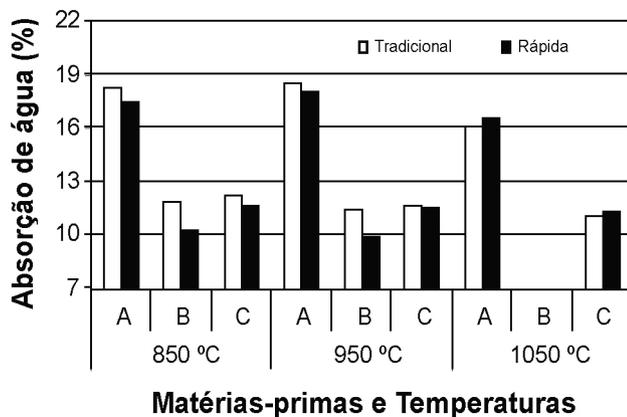


Figura 2: Absorção de água dos corpos-de-prova.  
 [Figure 2: Water absorption of the sample bodies.]

se pela maior quantidade de argilominerais do tipo illita e montmorilonita presente nessa matéria-prima.

A Fig. 3 compara a retração linear das matérias-primas com relação aos dois ciclos de queima utilizados. Observa-se que não ocorreram variações significativas da retração linear na temperatura de 850 °C nas matérias-primas “A”, “B” e “C” comparando o ciclo tradicional e o ciclo rápido. Entretanto, a diferença entre os valores da retração foi aumentando com a elevação da temperatura. Na temperatura de 1050 °C, por exemplo, a retração linear de 3,2% do ciclo lento diminuiu para 2,2% no ciclo rápido (matéria-prima “A”) e de 1,1% para 0% (matéria-prima “C”). Este comportamento da retração não é justificado pela menor sinterização do material, uma vez que a absorção de água se mantém em valores muito próximos, mas sim pelo tempo total de queima do material, o qual é superior o tempo de 850 min no ciclo tradicional, enquanto no ciclo rápido não passou de 53 min.

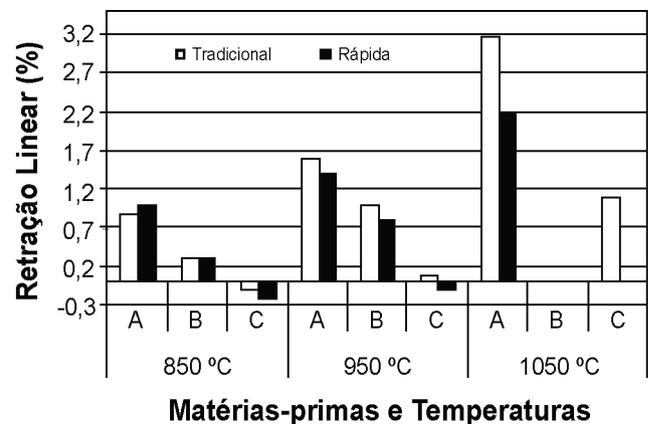


Figura 3: Retração linear de queima dos corpos-de-prova.  
 [Figure 3: Linear firing shrinkage of the sample bodies]

Na Fig. 4 são apresentadas as resistências mecânicas, determinadas por flexão a três pontos, das matérias-primas com relação aos dois ciclos de queima utilizados. Observa-se que a resistência mecânica foi entre as propriedades estudadas a que sofreu maior oscilação em relação ao ciclo de queima. Com exceção da matéria-prima “C” na temperatura de 850 °C, todas as demais amostras apresentaram aumento da resistência mecânica com a inclusão da queima rápida, principalmente a resistência da matéria-prima “A” na temperatura de 850 °C, a qual apresentou um aumento de

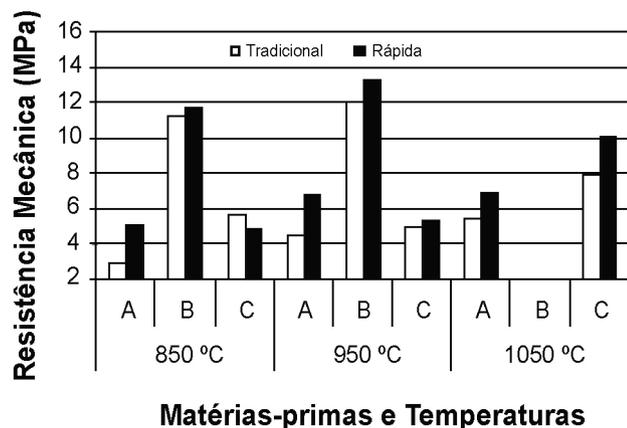


Figura 4: Módulo de ruptura dos corpos-de-prova.  
[Figure 4: Modulus of rupture of the sample bodies.]

mais de 75%, na qual possuía resistência de 2,9 MPa na queima tradicional, alcançando os 5,1 MPa na queima rápida. O caso específico da matéria-prima “C”, a temperatura de 850 °C e no curto tempo de queima de 43 min não foram suficientes para sinterizar o material, pelo fato desta conter a maior quantidade de minerais acessórios entre as matérias-primas, fazendo com que o feldspato contido permaneça na estrutura de forma inerte devido às baixas temperaturas utilizadas.

Analisando as microestruturas na superfície de fratura da matéria-prima “A”, queimadas na temperatura de 950 °C com a taxa de 1 °C/min (Fig. 5a) e com taxa de 20 °C/min (Fig. 5b), as quais tiveram resistência mecânica de 4,6 MPa e 6,8 MPa, respectivamente, observa-se que as morfologias das amostras apresentaram diferentes texturas. Comparativamente, as matérias-primas queimadas usando o ciclo tradicional tiveram uma absorção de água muito próximas as correspondentes matérias-primas obtidas com a queima rápida. Com esses

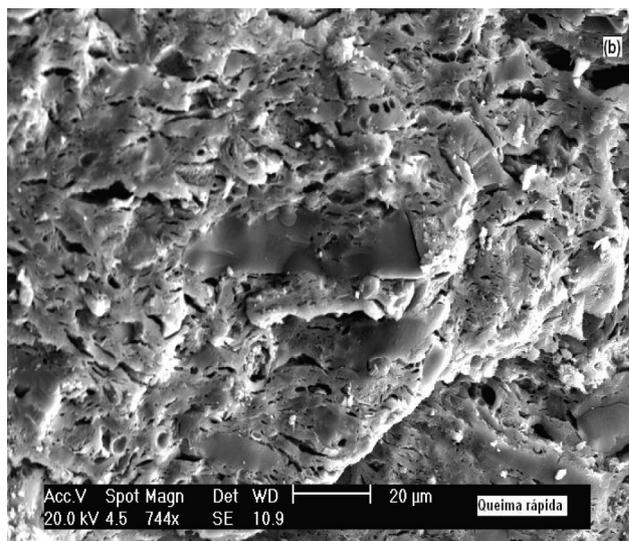
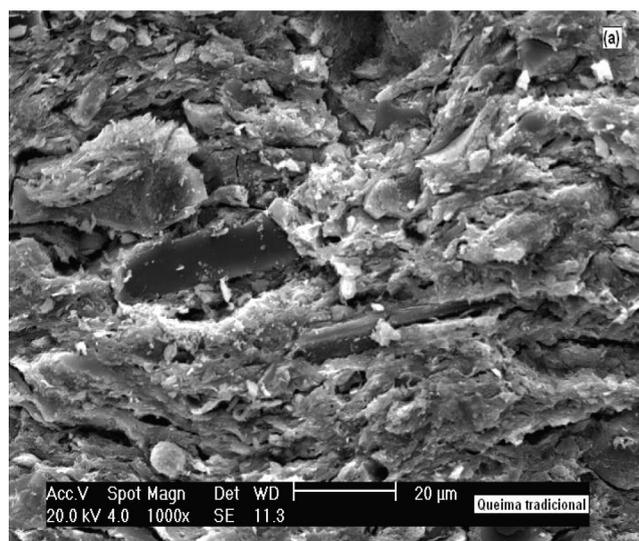
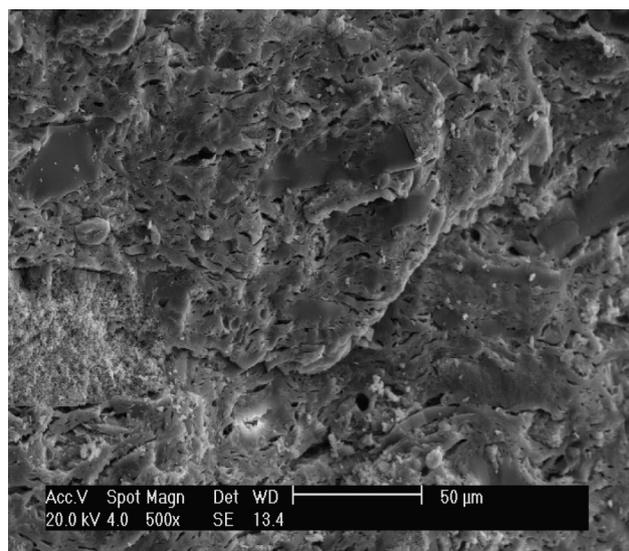
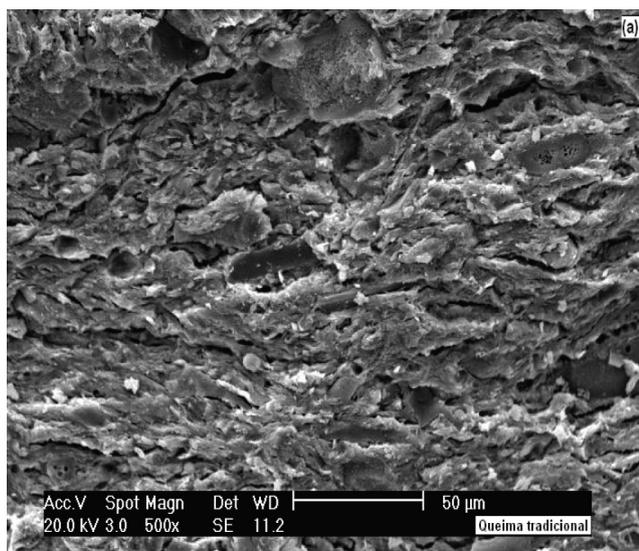


Figura 5: Micrografias por MEV da matéria-prima “A”: (a) ciclo tradicional e (b) ciclo rápido (950 °C).  
[Figure 5: SEM micrographs of the samples “A”: (a) slow cycle and (b) fast firing (950 °C).]

resultados é provável supor que o produto sinterizado com a queima rápida possua menor quantidade de porosidade fechada e maior formação de fases amorfas.

### CONCLUSÕES

O estudo das queimas usando o ciclo tradicional comparado com o ciclo rápido destacou algumas tendências gerais: a absorção de água permaneceu praticamente constante ou com pouca variação; a retração linear foi maior no ciclo de queima tradicional, principalmente para as temperaturas de 950 °C e 1050 °C; a resistência mecânica foi maior no ciclo de queima rápida, devido, possivelmente, pela maior quantidade de fases amorfas e menor quantidade de poros fechados.

A queima rápida nos produtos da indústria de cerâmica vermelha é possível, partindo-se de uma matéria-prima equilibrada entre as quantidades de argilominerais e minerais acessórios e com percentuais toleráveis de óxidos fundentes, matéria orgânica e óxido de ferro.

### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro.

### REFERÊNCIAS

- [1] S. F. Tavares, F. W. Grimme, Anais do IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, PA (2002) 731.
- [2] J. M. D. Soares, R. R. Tomazetti, I. S. Tavares, R. B. Pinheiro, Cerâmica Industrial **9**, 3 (2004) 43.
- [3] F. D. Bezerra, Anais do 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, S. Pedro, SP (2005) 7.
- [4] C. Manfredini, M. A. Sattler, Ambiente Construído **5**, 1 (2005) 26.
- [5] L. S. Messias, Cerâmica Industrial **1**, 2 (1996) 31.
- [6] A. G. Verduch, Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio **23**, 6 (1984) 387.
- [7] M. Dondi, M. Marsigli, I. Venturi, Brit. Ceram. Trans. **98**, 1 (1999) 12.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas, Determinação do Limite de Liquidez: Método de Ensaio - NBR 6459, Rio de Janeiro, RJ (1984).
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas, Determinação do Limite de Plasticidade: Método de Ensaio - NBR 7180, Rio de Janeiro, RJ (1984).
- [10] American Society for Testing and Materials, ASTM C 648, Standard Test Method for Breaking Strength of Ceramic Tile (1998).  
(*Rec. 14/05/2008, Ac. 20/06/2008*)