

Reforço mecânico por fibras poliméricas e seus efeitos na secagem de concretos refratários (*Polymeric fiber reinforcement and its effects on the drying of refractory castables*)

C. M. Peret, R. Salomão, A. M. Zambon, V. C. Pandolfelli

Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais – GEMM

Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa

Universidade Federal de S. Carlos

Rod. Washington Luiz, km 235, C. P. 676, S. Carlos, SP, 13565-905

peret@iris.ufscar.br; vicpando@power.ufscar.br

Resumo

Fibras poliméricas têm sido utilizadas com sucesso para o aumento da resistência ao dano de concretos refratários durante a secagem. Tal aplicação se baseia no aumento de permeabilidade ocasionado pela fusão ou degradação dessas fibras durante o primeiro aquecimento do concreto. Além desse benefício, as fibras poliméricas podem também atuar como reforço, aumentando tanto a resistência mecânica quanto a energia total de fratura, se suas propriedades se mantiverem íntegras até a temperatura de máxima pressurização. Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência mecânica e a energia total de fratura de concretos úmidos e secos, reforçados com diferentes tipos de fibras poliméricas. Verificou-se um grande aumento das propriedades mecânicas com a adição de fibras, sendo que a influência do tipo de fibra adicionado mostrou-se mais acentuada nos ensaios realizados com o concreto seco. Os resultados ajudam a explicar o comportamento dos concretos com fibras durante a etapa de secagem.

Palavras-chave: secagem, concreto refratário, fibra polimérica, energia total de fratura.

Abstract

Polymeric fibers have been successfully used in order to improve refractory castables' performance during drying. There is a well-known permeability improvement brought upon by these fibers' melting or degradation, during heat up. Additionally, fibers can also provide mechanical reinforcement, increasing the material's strength and its work of fracture, but only if they are not weakened by heat up to the temperature of maximum pressurization of steam. In this paper, the mechanical strength of fiber-containing castables and the work of fracture are greatly increased by the use of short fibers, and these properties were well related to the materials' behavior during drying.

Keywords: work of fracture, mechanical strength, refractory castable, polymeric fiber, drying.

INTRODUÇÃO

A secagem de concretos refratários, necessária para levá-los da temperatura ambiente até aquela de trabalho, deve ser cuidadosamente projetada. Caso contrário, o risco de dano por propagações de trinca ou mesmo da explosão ocasionada pelo aprisionamento de vapor pressurizado em seu interior pode ser elevado [1].

Estudos realizados pelo grupo dos autores [2] têm indicado o emprego de fibras poliméricas para a geração de aumento de permeabilidade no concreto, com o objetivo de facilitar a saída do vapor. Demonstrou-se que o aumento de permeabilidade pode ser verificado a partir da fusão ou degradação das fibras, deixando canais disponíveis para o transporte de fluidos. A correlação com o comportamento de secagem mostra que, para a eficácia do emprego de fibras poliméricas no aumento de permeabilidade, é necessário que elas fundam ou degradem em temperaturas suficientemente baixas, permitindo o alívio da pressão interna [3, 4].

Além do aumento de permeabilidade ocasionado pela

adição de fibras, vários trabalhos [5-7] têm mostrado que elas podem atuar aumentando a resistência mecânica e a energia total de fratura (v_{wof}) de compósitos de matriz frágil (cerâmica ou polimérica), o que também pode contribuir para aumentar a resistência à secagem.

A adição de fibras em materiais rígidos faz com que parte da força atuante sobre o corpo seja transferida para elas, de acordo com a regra das misturas [8]. Isso diminui o nível de tensão sobre as partes mais solicitadas do corpo, reduzindo o comprometimento ocasionado por eventuais defeitos microestruturais e elevando a resistência mecânica do material. Além disso, devido a essa redistribuição de tensão, a energia elástica armazenada não será dissipada através de uma única frente de propagação, mas possivelmente por várias microtrincas. O comprimento de cada uma destas microtrincas geradas, assim como a perda de resistência ocasionada, será inferior ao causado por uma única trinca, mesmo que sua área superficial total seja a mesma. A energia necessária para a fratura completa do corpo, medida pelo v_{wof} , será assim aumentada.

Vários mecanismos podem ser mencionados como causadores desse comportamento, tais como o aumento da área real de fratura frente à área projetada, a deformação plástica da fibra, seu arrancamento (“*pull-out*”) e fratura, e a formação de pequenas trincas ao redor das fibras [9].

Este artigo visa a complementar a discussão sobre a influência de fibras poliméricas na secagem de concretos refratários, iniciada com a abordagem do aumento de permeabilidade e da velocidade de secagem [2]. As alterações mecânicas resultantes da adição de fibras ao material foram avaliadas e relacionadas com a resistência à explosão, sob altas taxas de aquecimento. Os benefícios mecânicos do uso de fibras poliméricas em concretos refratários foram relacionados com seu comportamento de secagem, por meio de simulações de secagem sob altas taxas de aquecimento para caracterizar a resistência ao dano do material, identificando a eficiência de diversos tipos de fibras para impedir a explosão.

METODOLOGIA

Neste trabalho foi empregada uma formulação de concreto refratário de alta alumina e ultra-baixo teor de cimento, descrito com mais detalhes em outros artigos do grupo [2], ao qual foram adicionadas fibras poliméricas de 6 mm de comprimento, em um teor de 0,36 vol% ao concreto.

As principais propriedades das fibras utilizadas constam das Tabelas I e II.

As fibras poliméricas foram incorporadas durante a mistura a seco, por cinco minutos, em misturador duplo-cone. A mistura a úmido ocorreu em um reômetro para concretos, desenvolvido a partir de trabalhos anteriores do grupo de pesquisa dos autores [13]. A água foi adicionada até a quantidade necessária para a

virada, a uma taxa constante. Após a virada e um tempo adicional de 1 minuto de mistura, adicionou-se a água restante, até atingir o teor volumétrico de 14,5% (3,7% em peso).

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 40 mm de diâmetro por 40 mm de altura, para a medida de resistência mecânica por compressão diametral e para as simulações de secagem, bem como corpos prismáticos de 25 x 25 x 150 mm³, para a avaliação da energia total de fratura (v_{wof}). No caso da medida de energia total de fratura, foram colados aos moldes insertos para a obtenção de entalhes de cerca de 1 mm de profundidade, com o objetivo de se facilitar a propagação estável da trinca.

A cura ocorreu por 72 h a 8 °C, em ambiente saturado de água, para a formação do hidrato CAH₁₀, de grande volume molar, e de um gel de alumina hidratada [14]. Essa condição permitiu a obtenção de comportamentos mais críticos de secagem, diferenciando os comportamentos durante o aquecimento.

Os ensaios mecânicos foram realizados em duas condições: imediatamente após a cura, com os corpos-de-prova ainda úmidos, e após 4 d de secagem a 8 °C com sílica-gel.

Os ensaios de energia total de fratura foram realizados por flexão a três pontos, com controle de deslocamento, com taxa de 40 σ m/min. O equipamento empregado foi a MTS 810 / TestStar II. O valor de v_{wof} foi obtido a partir da integração da curva de força (P) em função do deslocamento do atuador (d), e da área projetada de fratura (A), de acordo com a equação

$$\gamma_{wof} = \frac{\int Pdd}{2A} \quad (A)$$

O limite de integração foi definido de tal forma que a força

Tabela I – Características típicas das fibras empregadas [2].
[Table I – Typical features of the fibers [2].]

Tipo	Origem	Diâmetro (σ m)	T _{amolecimento} (°C)	T _{fusão} (°C)	T _{degrad.} (°C)
Polipropileno (PP)	Fitesa (BR)	15	150 (Vicat)	165	258
Poliéster (PET)	Rhodia-Ster (BR)	15	70 (T _g)	245	317
Poliaramida (PAr)	Dupont AFS (EUA)	20	-	-	395

Tabela II – Propriedades mecânicas das fibras [11,12].
[Table II – Mechanical properties of the fibers [11,12].]

	PP	PET	PAr
Módulo de elasticidade (MPa)	270	315	1120
Deformabilidade (%)	80	19-40	30
Resistência mecânica (MPa)	40	58	62

P, no fim do ensaio, fosse igual a 10% da carga máxima [15].

A resistência mecânica foi medida por compressão diametral, no mesmo equipamento utilizado para a determinação do v_{wof} , com taxa de força aplicada igual a 41,833 N/s (1 MPa/min), de acordo com a norma ASTM C496-96.

Para a correlação com o comportamento de secagem, foram realizadas análises termogravimétricas com taxa de aquecimento de 20 °C/min [2]. Os corpos-de-prova cilíndricos, de 40 mm de altura por 40 mm de diâmetro, foram moldados com um termopar inserido a cerca de 1 mm da superfície, a meia altura do cilindro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 1 são apresentadas curvas de compressão diametral dos concretos sem fibra (SF). Nota-se que o material úmido apresentou resistência mecânica inferior à do material seco. Além disso, a maior inclinação da curva de carregamento para o SF-seco indica que há um aumento no módulo de elasticidade com a secagem do material. Esse fenômeno pode estar relacionado com a aproximação das partículas pela eliminação da água livre.

A Fig. 2 mostra curvas de propagação estável para a obtenção do v_{wof} para o concreto sem fibra. Nesses ensaios,

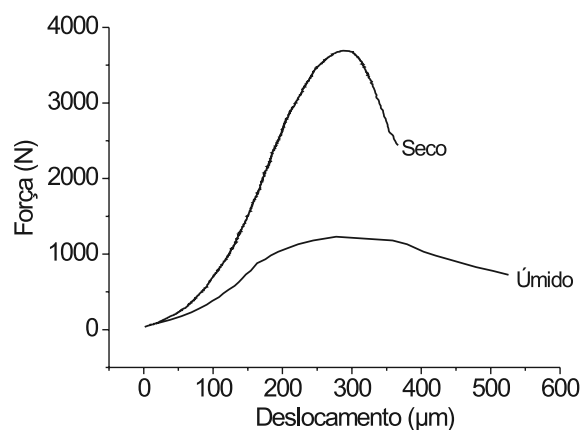


Figura 1: Curvas de carga versus deslocamento do atuador para ensaios de compressão diametral nos concretos úmido e seco, ambos sem fibras.

[Figure 1: Load versus displacement curves for splitting tensile strength tests, on wet and dry castable specimens without fibers.]

observa-se uma maior deformação para a fratura nos corpos úmidos.

Esses resultados (Figs. 1 e 2) mostram que, com a secagem, o material torna-se mais resistente mecanicamente, porém apresenta menor deformação até a fratura total, o que reduz a diferença de energia total de fratura entre as duas situações.

Os resultados de resistência mecânica são apresentados na Fig. 3. A presença de fibras elevou a resistência mecânica dos materiais, tanto na condição a seco quanto a úmido.

A eficácia de cada tipo de fibra para o aumento de α_f é mais perceptível nos ensaios a úmido, como indicado pela

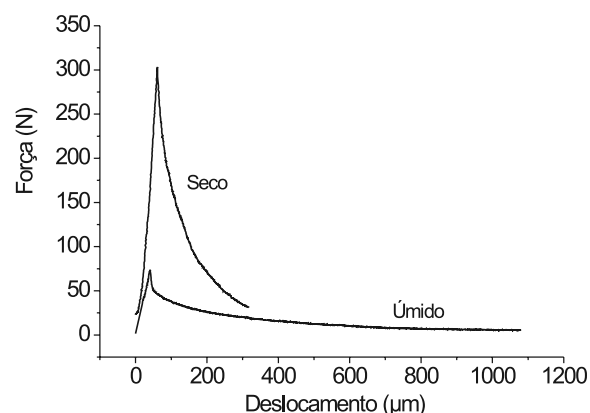


Figura 2: Curvas de P x d para ensaios de propagação estável de trinca, no concreto sem fibras, a úmido e a seco.

[Figure 2: Load versus displacement curves for stable crack propagation tests on wet and dry castable specimens without fibers.]

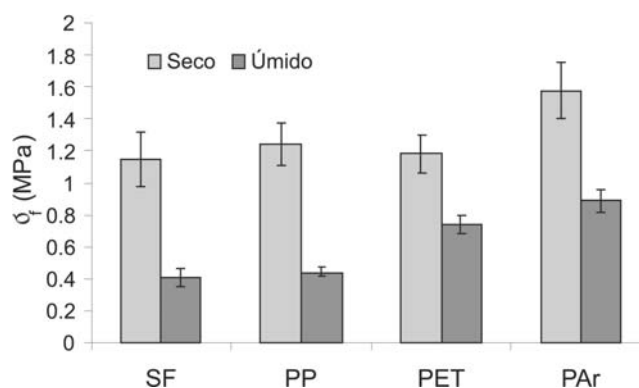


Figura 3: Comparação entre a resistência mecânica dos concretos com diferentes tipos de fibras, a úmido e a seco. As amostras foram ensaiadas sem a adição de fibras (SF) ou com 0,36% em volume de fibras de PP, PET ou PAr.

[Figure 3: Comparison between mechanical strength of wet and dry castables with different types of fibers. Specimens were tested without the addition of fibers (SF) or with 0.36 vol% of PP, PET or PAr fibers.]

razão entre as resistências mecânicas dos materiais contendo fibras e do SF (Fig. 4).

A Fig. 5 mostra os valores médios de v_{wof} obtidos para o material com os diversos tipos de fibra, nas condições a úmido e a seco.

A presença das fibras aumentou, em todos os casos, a energia total de fratura, com relação ao material sem fibras. Apesar disso, as diferenças de eficácia dos diferentes tipos de fibra para a tenacificação do concreto não são percebidas com clareza na Fig. 5.

A observação direta das curvas de força em função do deslocamento permite a análise das diferenças de comportamento mecânico. A Fig. 6 mostra quedas de carga mais suaves para os concretos com fibras do que para o SF, nas curvas P x d, especialmente no início da propagação.

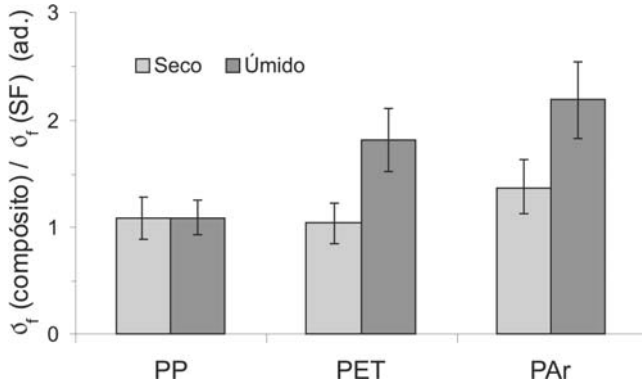


Figura 4: Aumento de resistência mecânica em relação ao concreto sem fibra, a úmido e a seco.
 [Figure 4: Relative strength improvement based on the fiber-free castable for the wet and dry specimens.]

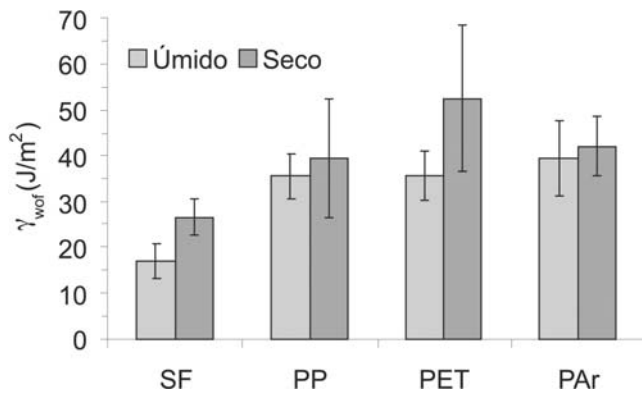


Figura 5: Energia total de fratura do concreto com vários tipos de fibras poliméricas.
 [Figure 5: Work of fracture of castable containing different types of fibers.]

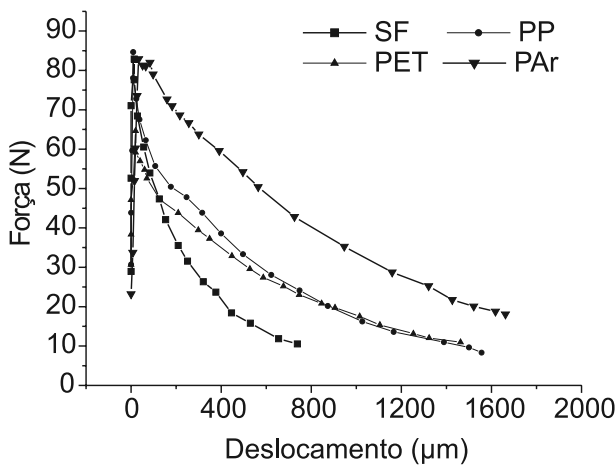


Figura 6: Curvas de P x d sob propagação estável de trinca, para o concreto úmido contendo os tipos de fibra estudados.
 [Figure 6: Load versus displacement curves under stable crack propagation, for the wet castable containing different types of fibers.]

Sendo assim, assumiu-se que a atuação das fibras na tenacificação dos concretos será evidenciada nas diferenças de inclinação das curvas da Fig. 6, considerando-se a parte inicial da propagação. Fibras mais rígidas levam a um maior consumo de energia para a propagação da trinca, especialmente nos primeiros instantes de propagação, por obrigar o material a sofrer maiores deformações no decorrer do processo de fratura.

As fibras aramídicas levaram a uma tenacificação inferior ao que se poderia esperar. Isso pode ser atribuído provavelmente à manutenção do formato regular e liso de sua seção transversal durante a mistura, dificultando o ancoramento no concreto.

Para se verificar o efeito destas propriedades na resistência à explosão, a taxa de perda de massa durante a secagem em função da temperatura da superfície da amostra, dW/dt , é apresentada na Fig. 7 sob uma taxa elevada de aquecimento de 20 $^{\circ}C/min$. Apenas o concreto sem fibra (SF) e o com fibras de PET explodiram durante o ensaio. Os corpos-de-prova contendo fibras aramídicas (PAr) e de polipropileno (PP) mantiveram-se íntegros, mostrando seu papel no aumento da resistência ao dano pela secagem.

As fibras de PP apresentam amolecimento e fusão em temperaturas inferiores à temperatura de explosão do concreto sem fibras [16], onde ocorre a pressurização máxima durante o aquecimento do concreto. Este resultado evidencia que as fibras de PP devem contribuir principalmente com o aumento de permeabilidade, ao invés de reforço mecânico. No caso do PAr, a utilização da fibra por períodos de tempo curtos em temperaturas da ordem de 300 $^{\circ}C$ não gera degradação apreciável [10]. Por essa razão, praticamente não há contribuição desse tipo de fibra para o aumento da permeabilidade na faixa de temperatura desejada [2], e os efeitos mecânicos foram predominantes na manutenção da integridade dos corpos.

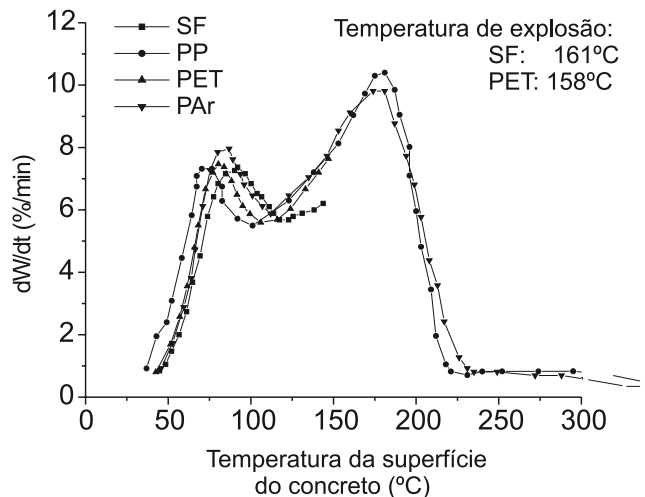


Figura 7: Comportamento de secagem dos concretos refratários contendo fibras poliméricas.
 [Figure 7: Heat-up behavior of fiber-containing refractory castables.]

Para que o reforço mecânico proporcionado por fibras poliméricas seja ativado durante a secagem, estas devem necessariamente manter suas características, em especial o módulo elástico, na temperatura de máxima pressurização. Com sua temperatura de transição vítrea por volta de 70 °C, as fibras de PET constituíram reforço mecânico pouco significativo ao concreto. Esse polímero também não gera aumento de permeabilidade significativo até sua temperatura de fusão cristalina, (por volta de 245 °C) [2]. Por essas razões, o comportamento do concreto com fibras de PET assemelha-se ao daquele sem fibras.

As fibras poliméricas em muito podem auxiliar na redução do dano por secagem. É necessário, para tanto, saber reconhecer os mecanismos através dos quais elas atuam, para poder projetar materiais que otimizem o processo, reduzindo perdas de peças conformadas ou elevando a rapidez de substituição ou reparos com refratários monolíticos.

CONCLUSÕES

A adição de fibras poliméricas pode reduzir o dano durante a secagem de concretos refratários aumentando a sua permeabilidade, (redução da pressão interna) ou por reforço mecânico, seja através do aumento de resistência mecânica e, como consequência, da pressão necessária para a ocorrência da fratura, seja pelo aumento da energia total de fratura, dissipando energia e minimizando possíveis propagações de trincas.

O reforço promovido pelas fibras persistirá até que alguma transformação térmica ocorra, permitindo sua deformação visco-elástica ou a degradação do polímero.

Por sofrerem uma redução considerável em suas propriedades mecânicas antes da pressurização máxima do vapor, as fibras de PET não são indicadas para o reforço de concretos para a secagem. As poliaramídicas, por outro lado, resistiram em temperaturas elevadas, e sua eficácia é comprovada pela resistência à explosão, não vinculada ao aumento de permeabilidade. O polipropileno encontra-se no limite da utilização mecânica, sendo possível sua atuação tanto em termos de aumento de permeabilidade, na região externa do corpo, quanto de reforço mecânico, em regiões internas menos aquecidas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, Magnesita S.A., ALCOA e CNPq pelo suporte; à Fitesa Fibras e Filamentos S.A., Rhodia-Ster e DuPont AFS pelo fornecimento das fibras.

REFERÊNCIAS

- [1] M. D. M. Innocentini, V. C. Pandolfelli, C. Ribeiro, J. Yamamoto, A. E. Paiva, L. R. M. Bittencourt, R. P. Rettore, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **80**, 11 (2001) 47.
- [2] R. Salomão, C. M. Peret, V. C. Pandolfelli, *Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa, PB (2003).*
- [3] M. D. M. Innocentini, R. Salomão, C. Ribeiro, F. A. Cardoso, V. C. Pandolfelli, R. P. Rettore, L. R. M. Bittencourt, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **81**, 7 (2002) 34.
- [4] M. D. M. Innocentini, R. Salomão, C. Ribeiro, F. A. Cardoso, V. C. Pandolfelli, R. P. Rettore, L. R. M. Bittencourt, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **81**, 8 (2002) 65.
- [5] A. N. Noumowe, P. Clastres, G. Debicki, J. L. Costaz, *Nucl. Eng. Des.* **166**, 1 (1996) 99.
- [6] R. C. Wetherhold, J. Bös, *Theor. Appl. Fract. Mec.* **33**, 2 (2000) 83.
- [7] B. Rand, R. J. Zeng, in *Carbon Fibre Filaments and Composites*, Ed. C. A. Bernardo et al, Kluwer Academic Press, The Netherlands, 1990, p. 367-398.
- [8] P. Lawrence, *J. Mater. Sci.* **7**, 1 (1972) 1.
- [9] E. Cailleux, *Microstructure et comportement thermomécanique d'un béton réfractaire renforcé par des fibres métalliques. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Tese. Paris (2001) 242 p.*
- [10] R. F. Zollo, *Cement Concrete Comp.* **19**, 2 (1997) 107.
- [11] OLEFIN Fibers. In: *ENCYCLOPEDIA of Polymer Science and Technology*. John Wiley & Sons, New York (1969).
- [12] *TECHNICAL guide for NOMEX® brand fiber. DuPont. Disponível em: <http://www.dupont.com/nomex>. Acesso em 21/11/2002.*
- [13] R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, A. E. Paiva, J. Gallo, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **79**, 1 (2000) 54.
- [14] G. Maczura et al., in *Ceramic Proceedings*, Am. Ceram. Soc., Columbus, 1983.
- [15] M. F. A. Magon, J. A. Rodrigues, V. C. Pandolfelli, *Anais do 39º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Águas de Lindóia, SP (1995) p. 478.*
- [16] R. Salomão, M. D. M. Innocentini, V. C. Pandolfelli, *Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, J. Pessoa, PB (2003). (Rec. 04/06/03, Rev. 01/09/03, Ac. 07/09/03)*