

Condições de mistura e a permeabilidade de concretos refratários contendo fibras poliméricas

(Processing conditions and the permeability of polymeric fiber-containing refractory castables)

V. G. Domiciano, R. Salomão, C. S. Isaac, V. C. Pandolfelli

Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa

Universidade Federal de S. Carlos

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

g176710@polvo.ufscar.br, vicpando@power.ufscar.br

Resumo

Fibras poliméricas têm sido adicionadas a concretos refratários para aumentar sua permeabilidade e diminuir riscos de explosão durante a secagem. Entretanto, a incorporação das fibras pode dificultar a homogeneização do concreto e reduzir sua trabalhabilidade. Trabalhos anteriores dos autores indicam que a magnitude do aumento de permeabilidade gerado pelas fibras está relacionada, em parte, ao seu comprimento médio final, determinado pelas condições de processamento. O objetivo deste trabalho foi estabelecer relações entre aumento de permeabilidade e condições de processamento para concretos contendo fibras com diferentes comprimentos iniciais. Os aspectos reológicos das misturas foram avaliados em um reômetro para concretos desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais (GEMM). Duas formas de processamento foram investigadas: adição das fibras ao material seco e adição após mistura e homogeneização do concreto. Os valores de permeabilidade foram calculados utilizando-se a equação de Forchheimer. Os resultados mostraram que os métodos de adição das fibras geraram diferentes níveis de cisalhamento e de redução dos comprimentos iniciais. Observou-se, também, que fibras mais longas (12 e 24 mm) consumiram mais energia durante a mistura e apresentaram menores níveis de permeabilidade após tratamento térmico que aquelas mais curtas (3 e 6 mm).

Palavras-chave: concretos refratários, permeabilidade, fibras poliméricas, mistura.

Abstract

Polymeric fibers have been added to refractory castables to improve their permeability and reduce the risks of spalling during the drying step. Nevertheless, the fiber addition inhibits a homogeneous mixture and also diminishes the castable workability. Previous work of the same authors has shown that the gain in permeability is related to the final medium length of fibers and the processing conditions. The aim of this work is to establish the relations between the permeability increase and the processing conditions of refractory castables containing polymeric fibers with different lengths. The rheological behavior during mixing was analyzed using a castable rheometer. Two processing conditions were investigated: fibers addition to the dry material and addition of fibers after mixing. The permeability analysis was carried out using Forchheimer's equation. The relationships among mixing energy, permeability and final medium lengths of fibers were established.

Keywords: refractory castables, permeability, polymeric fibers, mixing conditions.

INTRODUÇÃO

Fibras poliméricas têm sido adicionadas (0,01-0,1% em peso) a formulações de concretos refratários como alternativa para diminuir os riscos de explosão durante o processo de secagem e aquecimento inicial [1]. O mecanismo de atuação destas fibras está associado a reações físico-químicas (como fusão e degradação) [2-5] que acontecem durante o aquecimento. Os canais permeáveis gerados na estrutura do concreto conectam as regiões de baixa (poros fechados) e alta permeabilidade (poros abertos, interfaces matriz-agregados e os próprios canais gerados pelas fibras), facilitando a saída do vapor de água pressurizado. Importantes avanços têm sido obtidos na otimização das fibras como aditivo de secagem, dentre eles, a adequada seleção do tipo de fibra utilizada, que pode influenciar consideravelmente seu desempenho [3, 4].

Um outro fator a ser considerado na tentativa de otimizar a atuação das fibras na secagem, é o efeito que diferentes comprimentos de fibras podem promover na permeabilidade dos concretos. Partindo-se de um teor fixo de polímero, quando fibras muito curtas (abaixo de 1 mm) são adicionadas ao concreto, ainda que um grande número de pequenos canais seja gerado, o aumento de permeabilidade verificado não é significativo [6]. Por outro lado, não alterando o seu diâmetro, fibras maiores produzem um número menor de canais com maior comprimento que podem aumentar significativamente a permeabilidade do concreto [4-6].

Portanto, existe uma relação entre o número e o comprimento das fibras, como mostrado na Fig. 1 [6], que também pode ser fortemente afetada pelo processamento [7], uma vez que forças de capilaridade e cisalhamento atuam na mistura e homogeneização do concreto. Se ocorrerem

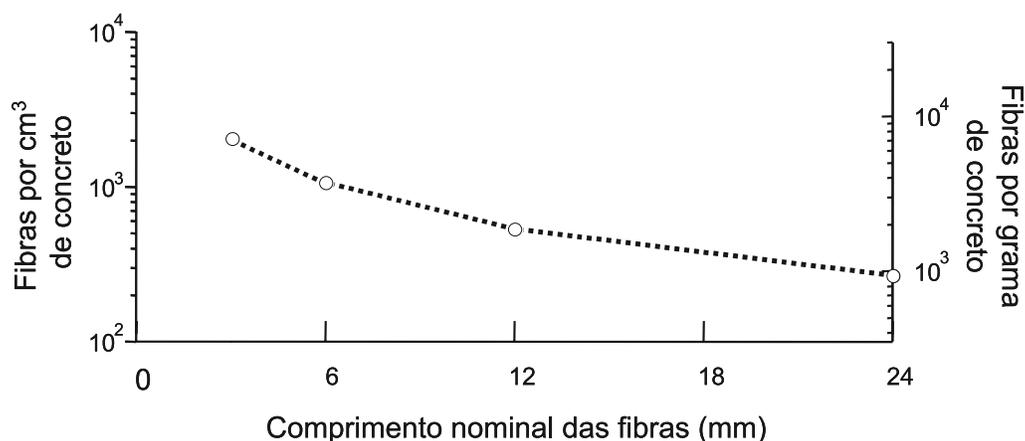


Figura 1: Correlações entre os tamanhos de fibra, número de fibras por volume e a massa de concreto (para um teor de fibras adicionado de 0,09% em peso) [6].

[Figure 1: Relationship between fiber length, number of fibers per volume and weight of castable (0,09wt% of fibers added) [6].]

modificações no comprimento inicial das fibras (rupturas e/ou alongamentos), estabelece-se uma nova relação entre número e comprimento de canais.

Adicionalmente, trabalhos anteriores mostraram a influência das condições de mistura sobre o comportamento reológico de concretos refratários.

O objetivo deste estudo foi estabelecer correlações entre os esforços envolvidos na mistura, o comprimento final das fibras e o aumento de permeabilidade gerado. Os aspectos reológicos do processamento foram avaliados em um reômetro para concretos [8] desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais (GEMM), onde as forças envolvidas na mistura foram avaliadas em função do tempo. Os valores de permeabilidade foram calculados por meio da técnica que utiliza a equação de Forchheimer [9].

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi utilizada uma composição de concreto refratário elaborada segundo o modelo de distribuição de partículas de Andreasen, com coeficiente (q) igual a 0,21, calculada por meio do programa PSDesigner. As matérias-primas utilizadas compuseram uma mistura de matriz fina (24% em peso, com diâmetro máximo de partículas < 100 μm) e agregados (74%

em peso, diâmetro máximo de partículas = 4,75 mm), contendo 98% em peso de alumina e 2% em peso de cimento a base de aluminato de cálcio CA14, Alcoa-EUA.

Um teor de 4,12% em peso (15% em volume) de água destilada foi adicionado à formulação para mistura e hidratação do cimento. A adição de água foi realizada em duas etapas: inicialmente a quantidade necessária para atingir o ponto de virada (77% em peso do total, após 60 s de mistura a seco) e, em seguida, o restante (23% em peso do total, após o ponto de virada). Ambas as etapas foram conduzidas a uma taxa de 8 g/s.

Fibras de polipropileno (Tabela I) com diferentes comprimentos (3, 6, 12 e 24 mm; diâmetro 15 μm) foram adicionadas às composições em um teor igual a 0,09% em peso (0,36% em volume). A incorporação das fibras no concreto foi realizada de duas maneiras: adição prévia ao material seco (AP) e adição após a mistura do material com toda água e homogeneização do concreto por 30 s (AAH).

Concluído o processo de mistura, foram moldados corpos de prova na forma de cilindros com 7,5 cm de diâmetro por 2,6 cm de espessura. A cura foi realizada em câmara climatizada (Vötsch 2020) a uma temperatura de 50 °C e umidade relativa igual a 100% por 72 h. Em seguida, as amostras permaneceram por mais 24 h a 50 °C, com umidade relativa do ambiente a 5%, para remoção da umidade residual.

Tabela I - Características das fibras de polipropileno empregadas.

[Table I - Polypropylene fibers typical properties.]

Material	Densidade (g/cm³)	Comprimento (mm)	Diâmetro (μm)	Aplicação de origem
Polipropileno (PP)	0,9081	3*, 6**, 12** e 24**	15	Reforço em concretos convencionais e aditivo de secagem em concretos refratários

* Wrigley-Fibres (Inglaterra); ** Fitesa S.A., Brasil

As dificuldades de mistura foram estimadas para cada composição por meio do parâmetro Índice de Dificuldade de Mistura (IDM), cujo valor é numericamente igual à área sob a curva torque x tempo. Embora o IDM não seja definido com dimensões de energia (N.m.s), trata-se de um indicativo das dificuldades encontradas durante a mistura, principalmente pela elevação dos níveis de torque.

Utilizou-se a Equação de Forchheimer (Equação A) para fluidos compressíveis como meio de calcular a permeabilidade de amostras verdes e queimadas (900 °C) a partir de um ajuste polinomial de pares de dados de pressão imposta e vazão resultante:

$$\frac{P_i^2 - P_o^2}{2P_o L} = \frac{\mu}{k_1} V_s + \frac{\rho}{k_2} V_s^2 \quad (A)$$

onde P_i e P_o são, respectivamente, a pressão do ar na entrada e saída da amostra; V_s é a velocidade do fluido; L é a espessura da amostra; σ é a viscosidade do fluido e ψ a densidade do fluido na temperatura do ensaio (25 °C). As constantes k_1 e k_2 representam a permeabilidade Darciana e não-Darciana do material, respectivamente.

Após a mistura, uma fração de fibras foi retirada do concreto através de flotação e seus comprimentos, e de outras não processadas, foram medidos por meio de uma câmera digital MavicaFD e um analisador de imagens ImagePró 4.1.0.0. Para cada condição de mistura foram realizadas pelo menos 800 medidas de comprimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de mistura torque versus tempo e os valores de IDM obtidos por meio delas (cálculo da área sob a curva torque versus tempo) para os concretos contendo fibras de diferentes comprimentos e para o concreto de referência sem fibras são mostrados na Fig. 2 e Tabela II.

Os resultados revelaram comportamentos de mistura distintos entre as composições contendo fibras de diferentes comprimentos e entre aquelas contendo fibras com mesmo

Tabela II - Índice de dificuldade de mistura para formulações contendo fibras de diferentes comprimentos.

[Table II - Mixing difficulty index for formulations containing different fibers length.]

Fibra (mm)	Índice de dificuldade de mistura (AP, adição prévia, N.m.s)	Índice de dificuldade de mistura (AAH, adição após mistura e homogeneização, N.m.s)
Sem fibras	1351	1351
3	1368	1351
6	1374	1377
12	1606	1440
24	1830	1524

comprimento inicial, mas adicionadas de modos distintos. Os valores de torque e índice de dificuldade de mistura (IDM) obtidos para as diversas composições contendo fibras foram significativamente superiores àqueles para a formulação sem fibras. Verificou-se, também, que aumentando o comprimento da fibra empregada, aumentam-se os valores de torque e índice de dificuldade de mistura IDM necessários para se misturar e homogeneizar o concreto.

Além disso, constatou-se uma grande diferença de IDM para fibras de 12 e 24 mm adicionadas previamente e após mistura e homogeneização. Já para as fibras de 3 e 6 mm, esta diferença foi pouco expressiva. Os maiores níveis de torque atingidos durante a mistura foram gerados pelas formulações com fibras adicionadas previamente, enquanto a adição posterior das fibras promoveu os maiores níveis de torque ao final da mistura (Fig. 2).

As diferenças de comportamentos de mistura entre as fibras de comprimentos distintos adicionadas de uma mesma maneira comparada ao da formulação sem fibras são atribuídas às restrições de mobilidade que as fibras promovem entre as partículas do concreto [7]. Fibras com maiores comprimentos geram maiores níveis de ancoramento que aquelas mais curtas, necessitando de níveis superiores de esforços para completar a mistura [7]. Para fibras com mesmo comprimento adicionadas de maneiras distintas, a adição prévia faz com que as fibras sejam submetidas a esforços mais intensos por mais tempo durante a mistura e homogeneização do concreto, enquanto, na adição posterior, os valores de torque envolvidos são menores.

Os diferentes métodos de adição das fibras utilizados permitiram que níveis distintos de cisalhamento fossem impostos às composições contendo fibras com o mesmo comprimento. A restrição de movimento das partículas do concreto pelas fibras pode promover redução no comprimento médio das fibras [6, 7] devido ao aumento dos esforços de mistura. Mudando o tipo de processamento, diferentes comprimentos médios finais das fibras foram obtidos a partir de um mesmo comprimento inicial, como mostra a Fig. 3.

Observa-se que o comprimento inicial medido apresenta variações significativas em relação ao valor nominal. Isso pode ser atribuído ao processo de manufatura e corte das fibras que apresenta certa variabilidade. Verificou-se uma expressiva redução no comprimento inicial das fibras, principalmente para as fibras maiores (12 mm e 24 mm, onde a redução foi da ordem de 70% e 95%, respectivamente), em ambas as formas de adição. Essa redução foi atribuída aos elevados níveis de ancoramento que fibras maiores podem promover e de cisalhamento a que são expostas [7].

Comparando-se fibras com diferentes comprimentos iniciais, nota-se que os comprimentos médios finais atingidos foram próximos para um mesmo método de adição. Verificou-se ainda que, fibras adicionadas posteriormente apresentaram comprimentos médios finais ligeiramente superiores àquelas adicionadas previamente, considerando-se um mesmo comprimento inicial. Este fato foi associado aos menores níveis de cisalhamento e dano que a adição posterior proporciona às fibras.

As medidas de permeabilidade referentes às formulações

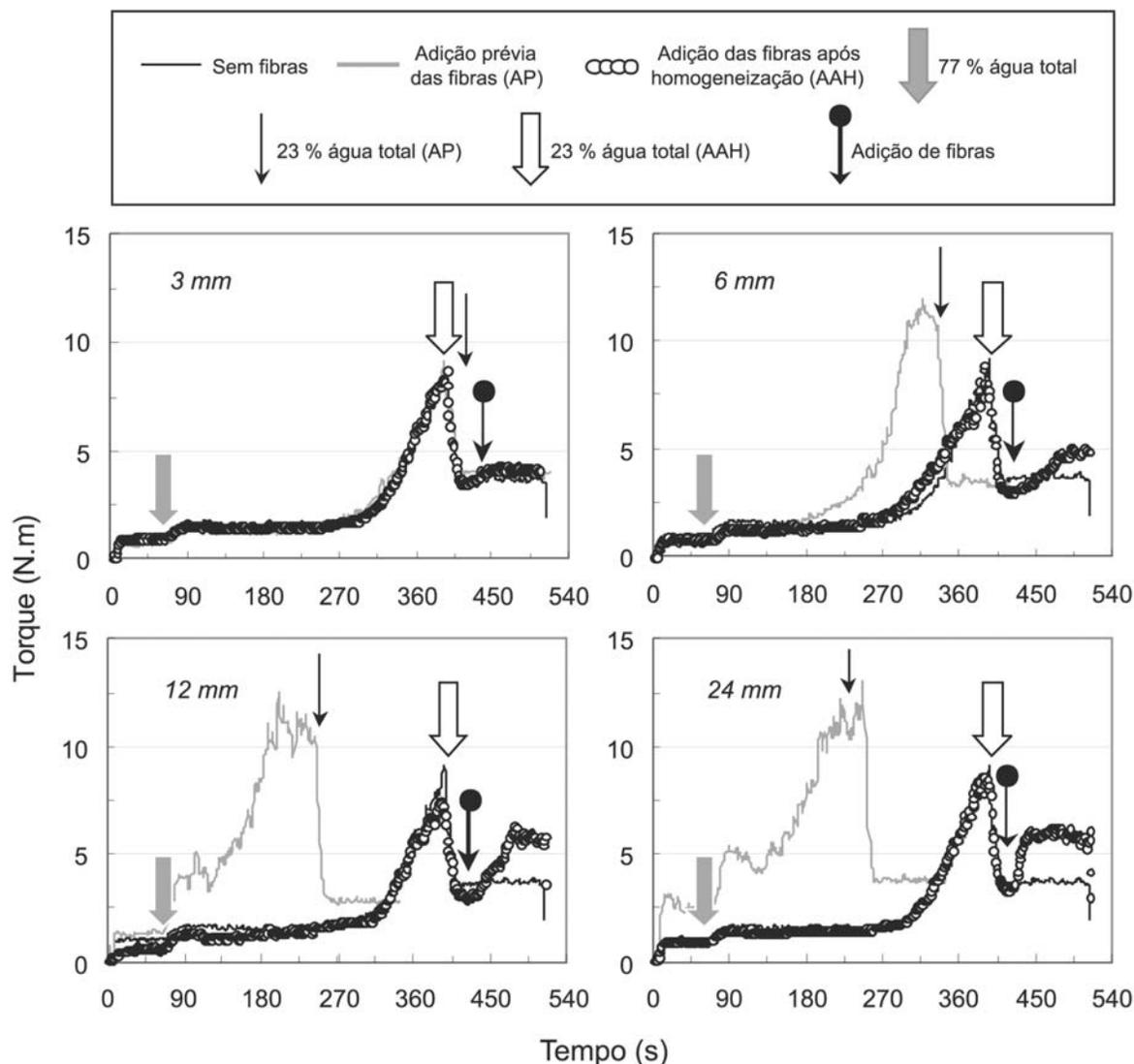


Figura 2: Curvas de mistura torque versus tempo para composições contendo diferentes comprimentos de fibras adicionadas previamente (AP) e após mistura e homogeneização do concreto (AAH).

[Figure 2: Torque versus time curves for castables containing different lengths of fibers added before (AP) and after the wet mixing step and castable homogenization (AHH).]

contendo fibras com diferentes comprimentos e processadas de forma distinta são apresentadas na Fig. 4a. A permeabilidade das amostras verdes não variou significativamente com a adição das fibras, permanecendo no mesmo nível da amostra sem fibras. Após o tratamento térmico, observou-se um aumento de permeabilidade para a amostra sem fibras proveniente da decomposição de fases hidratáveis, como hidróxidos e hidratatos [8].

Ainda após o tratamento térmico, aumentos expressivos de permeabilidade foram verificados nas amostras contendo fibras para todos os comprimentos nominais e em ambas as condições de adição. Para as amostras com fibras adicionadas previamente, os aumentos máximos de permeabilidade foram obtidos naquelas contendo fibras com 3 mm e 6 mm de comprimento. Já para as amostras com fibras adicionadas após mistura e homogeneização do concreto, esse máximo se

desloca para aquelas contendo fibras de 6 mm e 12 mm.

Nota-se ainda que a permeabilidade das amostras onde as fibras foram adicionadas posteriormente é superior à daquelas onde as fibras foram adicionadas previamente. Essa diferença pode ser explicada considerando as relações entre a severidade do processamento, as medidas de comprimento das fibras após a mistura e as medidas de permeabilidade correspondentes. Quando a permeabilidade das amostras tratadas termicamente é observada em função do comprimento das fibras medido após a mistura (Fig. 4b), pode-se estabelecer uma clara relação de crescimento exponencial, entre comprimento das fibras e aumento de permeabilidade.

A presença de fibras mais longas permite que os canais gerados após o tratamento térmico alcancem maiores distâncias dentro da estrutura do concreto, ou seja, mais regiões de baixa permeabilidade passam a ser conectadas por um

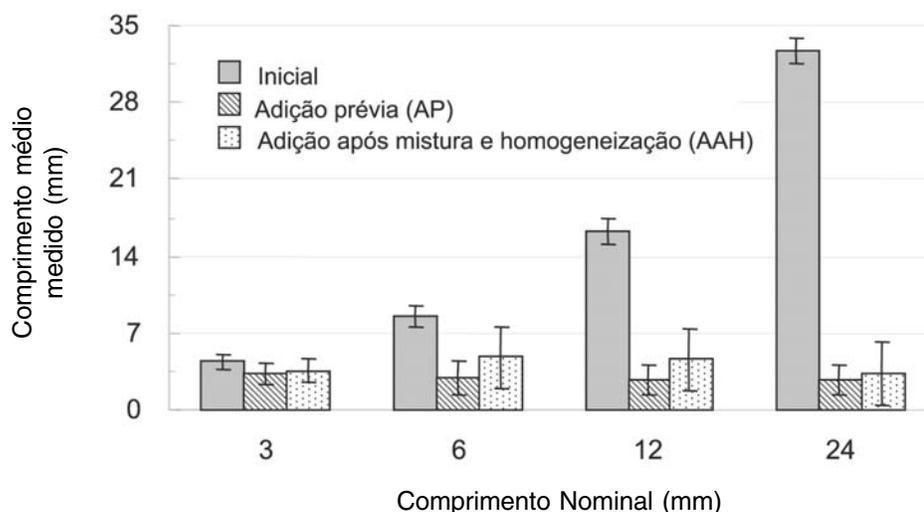


Figura 3: Medidas de comprimento para amostras de fibras não processadas e após processamento (fibras adicionadas previamente e após mistura e homogeneização do concreto).

[Figure 3: As-received and processed fiber's length measurements (fibers added previously to the dry-mixing and after mixing and homogenization of the castable).]

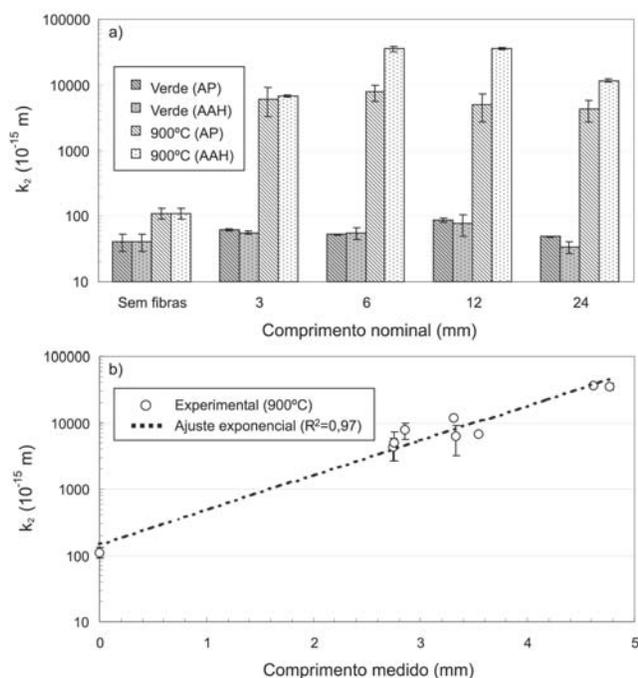


Figura 4: Medidas de permeabilidade para as amostras verdes e queimadas (900 °C) contendo fibras de diversos comprimentos adicionadas previamente (AP) e após mistura e homogeneização do concreto (AAH): (a) em função do comprimento nominal das fibras e (b) em função do comprimento das fibras medido após mistura.

[Figure 4: Permeability measurements of green and fired samples (900 °C) containing different lengths of fibers added previously (AP) and after mixing step and castable homogenization (AHH): (a) as a function of nominal fiber length and (b) as a function of fiber length measured after the wet mixing step.]

mesmo caminho permeável. Desse modo, ainda que menos canais sejam formados, a redução de tortuosidade e de energia despendida em mudanças de direção que os canais mais longos propiciam, facilita o escoamento do fluido permeante.

Considerando os valores dos aumentos de permeabilidade gerados pelos diferentes comprimentos de fibra, método de adição empregado e os níveis de torque envolvidos, pode-se optar por uma combinação que possibilite obter aumentos de permeabilidade elevados, sem grandes mudanças no comportamento reológico da mistura.

A escolha de fibras curtas (3 ou 6 mm) adicionadas previamente permite gerar aumentos significativos de permeabilidade para ambas as formas de adição, exigindo esforços próximos aos demandados pelo concreto sem fibras. É importante observar que a otimização do aumento de permeabilidade e dos esforços envolvidos está vinculada às condições práticas neste estudo, isto é, a utilização de outras formulações de concreto refratário ou condições de mistura pode alterar esse balanço.

Os resultados da Fig. 4 sugerem que valores ainda mais elevados de permeabilidade poderiam ser atingidos após o tratamento térmico se fibras mecanicamente mais resistentes que o polipropileno fossem empregadas. Devido a maior resistência ao dano durante a mistura, essas novas fibras apresentariam comprimentos médios superiores aos apresentados pelas fibras de polipropileno nas mesmas condições, gerando canais permeáveis mais eficientes.

CONCLUSÕES

A incorporação de fibras pode modificar o comportamento reológico da etapa de mistura de concretos refratários. As

formulações contendo fibras de maior comprimento inicial necessitaram de maiores níveis de torque para a mistura e homogeneização do concreto. O índice de dificuldade de mistura foi significativamente maior para as fibras de 12 e 24 mm adicionadas previamente quando comparadas com aquelas adicionadas após mistura e homogeneização.

Para as formulações contendo fibras de 3 e 6 mm, uma pequena diferença entre os índices de dificuldade de mistura foi observada para um mesmo método de adição. Além disso, esta diferença é pouco significativa quando são comparados os dois métodos de adição para um mesmo comprimento de fibra. Verificou-se que os índices de esforços apresentados pelas formulações contendo fibras de 3 e 6 mm são próximos àqueles demandados pela referência sem fibras.

As condições de processamento empregadas causaram níveis distintos de dano às fibras poliméricas. Para um mesmo método de adição, os danos provocados foram menores para as fibras mais curtas e, considerando um mesmo comprimento de fibra, os danos causados foram menores para o método onde as fibras foram adicionadas posteriormente à virada do concreto.

Os maiores aumentos de permeabilidade foram obtidos nos casos onde a redução no comprimento das fibras foi menor: 3 e 6 mm para as fibras adicionadas previamente e, 6 e 12 mm para as fibras adicionadas após mistura e homogeneização do concreto.

Dentre as diferentes possibilidades, a adição prévia de fibras de 3 e 6 mm pode proporcionar maiores facilidades ao processamento dos concretos. Além de gerar aumentos significativos de permeabilidade, estas fibras pouco alteram o comportamento reológico da etapa de mistura dos concretos. Adicionalmente, pouca diferença foi observada para os esforços de mistura entre os dois métodos de adição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP, ALCOA S.A. e MAGNESITA S.A. pelo suporte fornecido a esse trabalho, e aos fornecedores de fibras FITESA S.A. e WRIGLEY FIBRES pelas amostras gentilmente cedidas, e aos Dr. Rafael G. Pileggi e Dr. Murilo D. M. Innocentini pelas importantes contribuições a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] P. H. Havranek, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **62**, 2 (1983) 234-243.
- [2] T. R. Klebb, J. A. Caprio, *Advances in Ceramics*, 13, ed. Robert Fisher, The Am. Ceram. Soc. (1985) 149-161.
- [3] J. M. Canon, T. P. Sandler, J. D. Smith, R. E. Moore, UNITECR' 97, New Orleans, EUA, 583-592 (1997).
- [4] M. D. M. Innocentini, R. Salomão, C. Ribeiro, F. A. Cardoso, L. R. M. Bittencourt, R. P. Rettore, V. C. Pandolfelli, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **81**, 7 (2002) 34-37.
- [5] M. D. M. Innocentini, C. Ribeiro, R. Salomão, L. R. M. Bittencourt, V. C. Pandolfelli, *J. Am. Ceram. Soc.* **85**, 8 (2002) 2110-2112.
- [6] R. Salomão, F. A. Cardoso, M. D. M. Innocentini, V. C. Pandolfelli, L. R. M. Bittencourt, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **82**, 4 (2003) 51-56.
- [7] R. Salomão, V. G. Domiciano, R. G. Pileggi, M. D. M. Innocentini, R. P. Rettore, L. R. M. Bittencourt, V. C. Pandolfelli, *Anais do 46º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, S. Paulo (2002) 256-268.
- [8] R. G. Pileggi, A. E. Paivava, J. Gallo, V. C. Pandolfelli, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **79**, 1 (2000) 54-58.
- [9] M. D. M. Innocentini, A. R. F. Parardo, V. C. Pandolfelli, *J. Am. Ceram. Soc.* **85**, 6 (2002) 1517-1521.
(*Rec.* 03/06/03, *Rev.* 22/07/03, *Ac.* 08/08/03)