

O efeito do tratamento térmico a 300 °C na conectividade da estrutura de poros de argamassas de cimento Portland reforçadas por fibras de polipropileno

(The effect of heat-treatment at 300 °C on pore structure connectivity of Portland cement mortars reinforced by polypropylene fibers)

E. C. Amaral¹, R. A. Botelho¹, F. S. Lameiras², S. C. Reis², E. Tolentino³

¹Instituto Militar de Engenharia - IME, Praça Gen. Tibúrcio 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ 22290-270

²Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN, Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, Av. Pres. Antônio Carlos 6.627, Pampulha, Belo Horizonte, MG 31270-901

³Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Campus VII, Av. Amazonas 1193, Vale Verde, Timóteo, MG 35183-006

fernando.lameiras@pq.cnpq.br, reissc@cdtn.br, toentino.evandro@gmail.com

Resumo

A degradação térmica a 300 °C de argamassas de cimento Portland reforçada por fibras de polipropileno foi investigada. Foi proposto um modelo computacional para a avaliação qualitativa da conectividade da estrutura de poros. Os resultados revelaram a degradação das argamassas com a temperatura dos tratamentos térmicos. A conectividade da estrutura de poros aumentou com a temperatura do tratamento térmico para as argamassas com fibra. Os resultados também mostraram um aumento da conectividade da estrutura de poros para as argamassas com fibra não submetidas à alta temperatura.

Palavras-chave: adsorção de nitrogênio, argamassa, conectividade, fibras, picnometria a hélio.

Abstract

Thermal degradation at 300 °C of polypropylene fiber reinforced Portland cement mortars was investigated. A geometric modeling considering pore with cylindrical shape was also used in order to do quantitative evaluation of pore structure's connectivity. The results revealed thermal degradation of the mortars by high temperature. The pore structure connectivity increased with thermal treatment temperature for mortar samples with fiber content. The test results also showed pore structure connectivity increase for non-heat treated fibered mortars.

Keywords: nitrogen sorption, mortar, connectivity, fiber, helium picnometry.

INTRODUÇÃO

Nas usinas nucleares que utilizam reatores do tipo PWR (pressurized water reactor), como nos casos de Angra 1 e Angra 2, os vasos de pressão do reator e o gerador de vapor são instalados dentro de um grande envoltório de aço. Esse envoltório, denominado contenção de aço, com aproximadamente 3,8 cm de espessura e formato cilíndrico ou esférico, é uma barreira física construída para manter contidos os gases ou vapores possíveis de serem liberados durante a operação do reator. Adicionalmente, há um último envoltório, de concreto armado, revestindo a contenção de aço, que é o próprio edifício do reator. Essa edificação, com aproximadamente 1 m de espessura, além de ser uma barreira física que impede a saída de materiais radioativos para o meio ambiente em caso de acidentes, também protege o reator nuclear contra agressões externas (impactos de aviões,

explosões, etc.). Tais barreiras físicas constituem um sistema passivo de segurança, isto é, elas atuam independentemente de qualquer ação [1]. Os sistemas de segurança nas usinas nucleares são projetados para atuar de forma redundante. Entretanto, a hipótese de um acidente não deve ser descartada. Torna-se então importante o conhecimento do desempenho térmico do concreto, em termos de estrutura e propriedades, se, no caso de um acidente, ele for submetido a altas temperaturas contínuas ou a um elevado gradiente de temperatura, pois consideráveis danos poderiam ser produzidos. Deve ser salientado que acidentes que provocam uma rápida elevação da temperatura, como no caso dos incêndios, são passíveis de acontecer em quaisquer estruturas de concreto produzidas pela construção civil, tais como edifícios, túneis, etc.

Desde a década de 50 a indústria nuclear vem gerando rejeitos radioativos. A gerência de rejeitos radioativos é definida como o conjunto de atividades administrativas

e técnicas envolvidas na coleta, segregação, manuseio, tratamento, condicionamento, transporte, armazenamento, controle e deposição do rejeito radioativo. O impacto ambiental causado pela deposição dos rejeitos depende de uma série de fatores, como da qualidade do rejeito tratado, de suas embalagens, das barreiras de engenharia e do sítio selecionado para o repositório, principalmente dos caminhos de liberação dos contaminantes para o meio ambiente. A migração de radionuclídeos, através dos diversos meios que compõem o sistema de deposição, é considerada a via mais importante para esta liberação [2]. Dentre os sistemas de deposição de rejeitos radioativos estudados em muitos países estão os depósitos definitivos de rejeitos de médio e alto nível. As estruturas de concreto que os contiverem estarão submetidas a temperaturas de 60-250 °C por extensos períodos [3, 4].

O desempenho térmico de concretos pode efetivamente ser avaliado por três métodos: (1) em ensaios aquecidos e sob carregamento compressivo (*stressed test method*), nos quais os corpos-de-prova estão submetidos à alta temperatura e a um carregamento que corresponde a 40% de sua resistência de compressão, aplicado antes do aquecimento; (2) em ensaios aquecidos sem carregamento compressivo (*unstressed test method*), nos quais os corpos-de-prova estão sob alta temperatura, mas descarregados (sem nenhum tipo de restrição); e (3) em ensaios sem carregamento compressivo, de determinação de propriedades residuais (*unstressed residual property test method*), nos quais os corpos-de-prova têm as suas propriedades determinadas na temperatura ambiente após serem submetidos descarregados à alta temperatura. Os métodos de ensaio (1) e (2) foram projetados para prover informações sobre as propriedades sob elevadas temperaturas e o método de ensaio (3) foi projetado para prover informações sobre as propriedades residuais [5].

A adição de fibras poliméricas naturais ou artificiais (também denominadas sintéticas) aos concretos e argamassas de cimento Portland produz um efeito benéfico, se eles forem submetidos a elevadas taxas de aquecimento. A degradação das fibras devido ao aquecimento cria conexões permeáveis entre as diversas regiões da estrutura do concreto e com a superfície, que permitem a migração para o exterior do vapor d'água gerado, diminuindo assim as tensões de tração internas. Isso reduz (ou mesmo elimina) o risco do estilhaçamento (ou lascamento) explosivo das estruturas de concreto [6]. Com relação ao estilhaçamento explosivo, foi sugerido que após certo tempo de exposição à alta temperatura o interior de uma peça de concreto de cimento Portland apresentará três zonas distintas: (1) uma zona superficial seca e desidratada; (2) uma zona intermediária em processo de secagem e desidratação; e (3) uma zona mais interna quase-saturada, criada pela migração de vapor em altas temperaturas para o interior do concreto (região mais fria), onde é condensado, formando uma parede impermeável (*moisture clog*). A parede impermeável formada impede a migração de vapor para a região mais fria do concreto, o que gera uma concentração de gases próxima à parede, deixando uma só saída para todo o vapor produzido, que é o exterior da peça. Se a taxa de aquecimento e/ou o nível de saturação for suficientemente alto e a permeabilidade

suficientemente baixa, a taxa de migração do vapor será inferior à sua taxa de formação. Conseqüentemente, a pressão aumenta substancialmente na interface parede impermeável-zona intermediária, fazendo com que haja uma transferência de massa forçada de vapor e ar superaquecido para o exterior, provocando o estilhaçamento da peça [7]. As fibras poliméricas também vêm sendo adicionadas aos concretos e argamassas de cimento Portland para atuarem como elementos de reforço primário ou secundário. No caso do reforço primário, que utiliza fibras de alto módulo de elasticidade, o volume deve ser tal que possibilite um aumento da capacidade portante do compósito após o aparecimento da fissuração, ou seja, as fibras devem exceder o volume crítico (volume para o qual a capacidade portante residual do compósito fissurado é a mesma da matriz). No caso do reforço secundário, que utiliza fibras de baixo módulo de elasticidade, o teor de fibras utilizado é bem inferior ao volume crítico. As fibras de baixo módulo de elasticidade, com as de polipropileno, nylon e polietileno, têm a capacidade de reforço da matriz restrita às primeiras horas após o lançamento do concreto ou argamassa; a eficiência do reforço diminui com o processo de hidratação do cimento e ganho de resistência e módulo de elasticidade por parte da matriz. Nos últimos anos tem crescido o uso de fibras poliméricas de baixo módulo de elasticidade para controle da fissuração por retração plástica (ou inicial), que ocorre nas primeiras idades dos concretos e argamassas de cimento Portland. Os mecanismos de diminuição da fissuração por retração plástica pela adição de fibras são: (1) minoração da água exsudada, como consequência das fibras formarem uma malha que estabiliza a matriz, prevenindo o assentamento e a segregação dos materiais mais pesados da mistura, tais como os agregados; e (2) ponte de transferência de tensões, devido à carga que inicialmente era suportada pela matriz ser agora transferida para a fibra que intercepta a trinca surgida ao se atingir a tensão de ruptura da matriz [8].

Os parâmetros topológicos, que são aqueles que não se alteram quando a estrutura é esticada ou torcida, podem ser utilizados para a avaliação da integridade estrutural de concretos e argamassas de cimento Portland. Um importante parâmetro topológico da estrutura de poros de materiais é a conectividade por unidade de volume, que representa quão interligada é uma estrutura de poros. *Grosso modo*, a conectividade é o número máximo de caminhos que se tem para sair de um lugar e chegar a outro, sem sair da estrutura. A conectividade de um volume isolado é definida como o número de curvas fechadas independentes que podem ser continuamente contraídas até um ponto sem deixar o volume; a conectividade de uma esfera é então zero, porque qualquer curva fechada construída em seu interior pode ser reduzida a um ponto [9]. A conectividade pode ser relacionada com algumas propriedades do material, dentre elas, a permeabilidade. Além disso, a utilização e aplicação de recursos computacionais possibilitam o desenvolvimento de poderosas ferramentas, como a modelagem geométrica computacional que, por sua vez, pode ser utilizada na obtenção, visualização e análise de estruturas de poros de materiais.

Está em desenvolvimento um modelo que permitirá

estimar a permeabilidade relativa (comparação entre dois materiais de mesma natureza) através da analogia da estrutura de poros com circuitos elétricos resistivos. Em um circuito elétrico a resistência equivalente de um circuito em paralelo é inversamente proporcional ao número de resistências em paralelo e a resistência de cada elemento resistivo é função da resistividade do material do qual é feito, sendo que a resistividade é inversamente proporcional à área da seção transversal do material e diretamente proporcional ao seu comprimento. O modelo considera que são análogos, respectivamente, o número de elementos resistivos, a área da seção transversal do material e o comprimento do material resistivo com o número de braços por unidade de volume, a área da seção transversal dos braços e o comprimento dos braços da estrutura de poros.

Os resultados aqui apresentados, referentes ao desempenho térmico residual de argamassas de cimento Portland, visam validar o modelo proposto para a avaliação da conectividade por unidade de volume, implementado num programa de computador [10]. Esse modelo utiliza diretamente as medidas experimentais de volume específico e de superfície específica de poros, obtidos através da adsorção de nitrogênio, e de densidade esquelética, obtida por picnometria a hélio, para cálculo da conectividade por unidade de volume. A fim de prover mais informações sobre a degradação das amostras, foi também avaliada a resistência de compressão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram confeccionados corpos-de-prova de argamassa de cimento Portland, utilizando o cimento CP III-40-RS da empresa Cauê, que corresponde ao cimento norte-americano ASTM IS (MS) [11], com e sem a adição de fibras de polipropileno. A composição adotada foi de 1:3, a relação água/cimento de 0,48 e as dimensões dos corpos-de-prova foram $\phi = 50$ mm e $h = 100$ mm [12, 13]. As fibras de polipropileno utilizadas, fabricadas pela empresa FitesaFiberweb, tinham comprimento 20 mm. As formulações das argamassas estão apresentadas na Tabela I. Posteriormente, alguns dos corpos-de-prova foram submetidos a tratamento térmico a 300 °C, conforme específica a Tabela II. A temperatura de 300 °C foi escolhida por nela ocorrer uma pronunciada decomposição do C-S-H [4]. A taxa de aquecimento foi 1 °C/min e o tempo de encharque na temperatura máxima foi 3 h. Esse tratamento térmico simula uma condição de acidente para uma estrutura de concreto [14, 15].

De alguns dos corpos-de-prova foram retiradas amostras para a realização de ensaios de adsorção de nitrogênio e picnometria a hélio, que, com o auxílio de um pistilo, foram fragmentadas, em pequenos pedaços, num grau de ágata, selecionadas e isoladas do meio externo através de um filme polimérico, para evitar a carbonatação [16, 17]. Outros corpos-de-prova foram selecionados para ensaio de resistência de compressão. Os equipamentos utilizados foram: Nova-2200 Quantachrome, para o ensaio de adsorção de nitrogênio, Ultrapycnometer Quantachrome, ensaio de

Tabela I - Composições das argamassas por m³.
[Table I - Mix design to obtain 1 m³ of mortar.]

Material	Quantidade (m ³)	
	Com fibra	Sem fibra
Cimento	400 kg	400 kg
Água	192 l	192 l
Areia	1200 kg	1200 kg
Fibra	800 g	-

Tabela II - Corpos-de-prova de argamassa.
[Table II - Series of mortar specimens.]

	Corpos-de-prova	Presença de fibras
Sem tratamento térmico	S1	Sem fibra
	S2	com fibra
300 °C	S3	sem fibra
	S4	com fibra

picnometria a hélio para se obter as densidades esquelética das amostras, e prensa universal EMIC, para o de ensaio de resistência de compressão.

MODELAGEM GEOMÉTRICA

O modelo descrito em [10] considera que toda a estrutura de poros é formada por cilindros, braços da estrutura, conectados uns aos outros em regiões denominadas de nós. O modelo considera também que estes nós estão distribuídos de forma aleatória e que toda estrutura dos poros está conectada entre si formando uma estrutura aberta. Entende-se como aberta à estrutura que tem acesso ao meio externo.

A conectividade por unidade de volume, C_v , pode ser calculada por meio de:

$$C_v = Nb_v - Nn_v + Np_v \quad (A)$$

na qual Nb_v é o número de braços por unidade de volume, Nn_v é o número de nós por unidade de volume e Np_v é o número de partes distintas da estrutura de poros. O modelo considera que toda estrutura de poros está conectada e, portanto, sendo constituída de apenas 1 parte, ou seja, $Np_v = 1$. Desta forma a equação A pode ser descrita como:

$$C_v = Nb_v - Nn_v + 1 \quad (B)$$

Supondo que todo o volume associado aos poros, V_{tp} , está, representado pela soma de todos os volumes dos cilindros (braços) que compõem a estrutura, tem-se:

$$V_{tp} = Nb_v \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot Hm \quad (C)$$

na qual Nb é o número de braços da estrutura, D é o diâmetro do braço e Hm é comprimento médio dos braços. Considerando-se, também, que toda a área superficial

associada aos poros, St_p , está representada pela soma das áreas dos cilindros (braços) que compõem a estrutura, tem-se:

$$St_p = Nb_v \cdot \pi \cdot D \cdot H_m \quad (D)$$

Dividindo-se ambos os lados das equações C e D por uma unidade de volume V , pode-se reescrevê-las como:

$$Vtp_v = Nb_v \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot H_m \quad (E)$$

$$Stp_v = Nb_v \cdot \pi \cdot D \cdot H_m \quad (F)$$

Com as equações E e F e após operações de álgebra, obtém-se:

$$D = \frac{4 Vtp_v}{Stp_v} \quad (G)$$

Substituindo-se G em F tem-se:

$$H_m = \frac{Stp_v^2}{Nb_v \cdot \pi \cdot 4 \cdot Vtp_v} \quad (H)$$

O número de braços por unidade de volume, Nb_v , e o número de nós por unidade de volume, Nn_v , podem ser relacionados através da equação:

$$Nb_v = Nn_v \cdot \frac{K1}{2} \quad (I)$$

na qual $K1$ é a média ponderada do número de vizinhos dos nós da estrutura, equação (J):

$$K1 = \sum_{i=1}^{i=n} I \cdot P_{ncl} \quad (J)$$

Substituindo-se a equação I na equação H tem-se:

$$H_m = \frac{2Stp_v^2}{Nn_v \cdot K1 \cdot \pi \cdot 4 \cdot Vtp_v} \quad (K)$$

Para uma distribuição aleatória de estrelas no espaço a média das menores distâncias entre as estrelas pode ser descrita segundo a equação L:

$$H_m = 0,554 \cdot Nn_v^{-1/3} \quad (L)$$

na qual H_m representa esta média e Nn_v é o número de estrelas por unidade de volume. Por analogia esta relação pode ser aplicada para o modelo em desenvolvimento, no qual H_m é interpretado como a média dos menores comprimentos dos braços (média das menores distâncias entre os nós da estrutura). Logo, igualando-se as equações K e L tem-se:

$$Nn_v = \left(\frac{2Stp_v^2}{0,554 \cdot K1 \cdot \pi \cdot 4 \cdot Vtp_v} \right)^{3/2} \quad (M)$$

Substituindo a equação I na equação B tem-se:

$$C_v = Nn_v \left(\frac{K1}{2} - 1 \right) + 1 \quad (N)$$

Substituindo a equação M na equação N tem-se:

$$C_v = 0,1540 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot K1^{1/2}} - \frac{1}{K1^{3/2}} \right) \cdot \frac{Stp_v^3}{Vtp_v^{3/2}} + 1 \quad (O)$$

Sabe-se que a superfície total dos poros, St_p , e o volume total dos poros, Vtp , podem ser obtidos pelas equações P e Q, respectivamente.

$$St_p = Sg \cdot m \quad (P)$$

$$Vtp = Sg \cdot m \quad (Q)$$

nas quais m é a massa do material, Sg é superfície específica e Vg é o volume específico de poros. Dividindo-se ambos os lados das equações P e Q pela unidade de volume V têm-se as equações R e S respectivamente:

$$Stp_v = Sg \cdot \frac{m}{V} \quad (R)$$

$$Vtp_v = Vg \cdot \frac{m}{V} \quad (S)$$

Observando-se que a densidade verdadeira, ρ_v , pode ser descrita como:

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (T)$$

na qual V é o volume do material incluindo o volume dos poros (volume total), pode-se substituir a equação T nas equações R e S, obtendo-se as equações U e V, respectivamente:

$$Stp_v = Sg \cdot \rho_v \quad (U)$$

$$Vtp_v = Vg \cdot \rho_v \quad (V)$$

Finalmente podem-se substituir as equações U e V na equação O, obtendo-se:

$$C_v = 0,1540 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot K1^{1/2}} - \frac{1}{K1^{3/2}} \right) \cdot \frac{Sg^3 \cdot \rho_{Ev}^{3/2}}{Vg^{3/2}} + 1 \quad (X)$$

Outras relações importantes podem ser verificadas através das equações W e Y, para densidade envelopada, ρ_{Ev} , "envelope density", que considera o volume dos poros abertos, e porosidade, PO , respectivamente, nas quais ρ_E é a densidade esquelética do material, definida como sendo a razão entre a massa das partículas discretas de um sólido pela soma dos volumes do sólido e de seus poros fechados

[18]. Para materiais com estrutura amorfa é razoável estimar que a densidade esquelética seja equivalente à densidade real utilizada no programa desenvolvido [10].

$$\rho_{Ev} = \frac{\rho_E}{\rho_E \cdot Vg + 1} \quad (W)$$

$$P0[\%] = 100 - \left(\frac{\rho_{Ev}}{\rho_E} * 100 \right) \quad (Y)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resistência à compressão

A Tabela III apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão. Para a obtenção do intervalo de confiança da média da população foi utilizada a teoria das pequenas amostras, distribuição de student, com intervalo de confiança de 95%. O número de corpos-de-prova utilizados para cada análise foi igual a 4.

Comparando-se os resultados obtidos para os corpos-de-prova S1 e S2, não submetidos a tratamento térmico, sem fibra e com adição de fibra, respectivamente, nota-se que a resistência à compressão das argamassas aumentou com a adição das fibras, pois os resultados de S2 são superiores aos de S1. O papel das fibras descontínuas, distribuídas aleatoriamente, é o de atravessar as trincas que se formam por retração plástica da argamassa [8]. Pode-se afirmar que as fibras presentes nos corpos-de-prova S2 auxiliaram a argamassa durante a transição do estado fresco para o endurecido, produzindo como benefício a redução da

Tabela III - Resultados de ensaios de resistência de compressão.

[Table III - Compressive strength test results.]

	Corpos-de-prova	Intervalo de confiança da média da população (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Sem tratamento térmico 300 °C	S1	12,7 < μ < 31,1	22,8
	S2	21,3 < μ < 34,1	12,6
	S3	20,3 < μ < 22,1	2,3
	S4	21,4 < μ < 25,6	9,8

fragilidade da matriz cimentícia, resultando numa maior resistência à compressão. Observando-se os resultados obtidos para os corpos-de-prova S3 e S4, submetidos a um tratamento térmico de 300 °C, sem fibra e com adição de fibra, respectivamente, nota-se que novamente a adição de fibras aumentou a resistência à compressão das argamassas, pois os resultados de S4 são superiores aos de S3. Sabe-se que as fibras de polipropileno possuem temperaturas de fusão em torno de 170 °C, que apresentam o ponto de evaporação a 399,5 °C e, por fim, o ponto de chama a 442,9 °C, quando se desintegram por completo. Ademais, quando fundidas as fibras são parcialmente absorvidas pela matriz de cimento [7, 19]. Como em compósitos reforçados com fibras a fratura é retardada, pois as pontes de transferência formadas pelas fibras absorvem parte das solicitações, é plausível admitir que os corpos-de-prova S4 submetidos a tratamento térmico a 300 °C apresentavam uma quantidade residual de fibras de polipropileno, suficiente para atuarem como elementos de reforço do compósito.

Estrutura de poros

A Tabela IV apresenta os resultados de superfície específica Sg , de volume específico de poros Vg , obtidos por adsorção de nitrogênio, e densidade esquelética ρ_E , obtida por picnometria a hélio. Para a obtenção do intervalo de confiança da média da população foi utilizada a teoria das pequenas amostras, distribuição de student, com intervalo de confiança de 95%. O número de amostras utilizadas para cada análise foi igual a 4.

A Tabela V apresenta os valores de densidade envelopada ρ_{Ev} , porosidade $P0$ e diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume e a área superficial da estrutura de poros D , calculados pelo programa desenvolvido [10]. Para a obtenção do intervalo de confiança da média da população foi utilizada a teoria das pequenas amostras, distribuição de student, com intervalo de confiança de 95%. O número de amostras utilizadas para cada análise foi igual a 4. A expressão utilizada para a determinação de D é [20]:

$$D = \frac{4 Vg}{Sg} \quad (Z)$$

A Fig. 1 apresenta a tela gerada pelo programa de computador, resultado da modelagem proposta para a

Tabela IV - Resultados de superfície específica de poros, volume específico de poros e densidade esquelética.
[Table IV - Specific pore surface area, specific pore volume and skeleton density test results.]

	Corpos-de-prova	Sg (m ² /g)	Vg (cm ³ /g)	ρ_E (g/cm ³)
Sem tratamento térmico	S1	1,32 < μ < 1,44	0,0072 < μ < 0,0080	2,54 < μ < 2,56
	S2	2,76 < μ < 2,92	0,0106 < μ < 0,0114	2,59 < μ < 2,61
300 °C	S3	3,71 < μ < 3,85	0,0165 < μ < 0,0181	2,49 < μ < 2,53
	S4	4,36 < μ < 4,72	0,0167 < μ < 0,0177	2,53 < μ < 2,55

Tabela V - Resultados de densidade envelopada, porosidade e diâmetro médio do cilindro.
 [Table V - Envelope density, porosity and median pore diameter test results.]

Corpos-de-prova		ρ_{Ev} (g/cm ³)	P0 (%)	D (m)
Sem tratamento térmico	S1	2,48 < μ < 2,52	1,89 < μ < 1,91	(2,17 < μ < 2,31) x 10 ⁻⁸
	S2	2,52 < μ < 2,54	2,77 < μ < 2,79	(1,51 < μ < 1,59) x 10 ⁻⁸
300 °C	S3	2,39 < μ < 2,43	4,14 < μ < 4,18	(1,74 < μ < 1,92) x 10 ⁻⁸
	S4	2,41 < μ < 2,45	4,16 < μ < 4,22	(1,46 < μ < 1,58) x 10 ⁻⁸

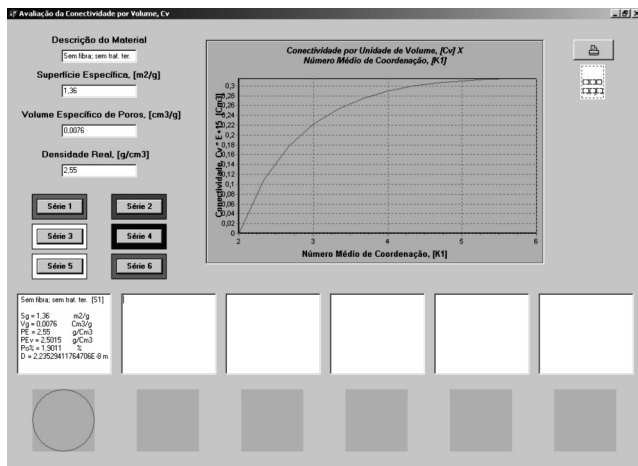
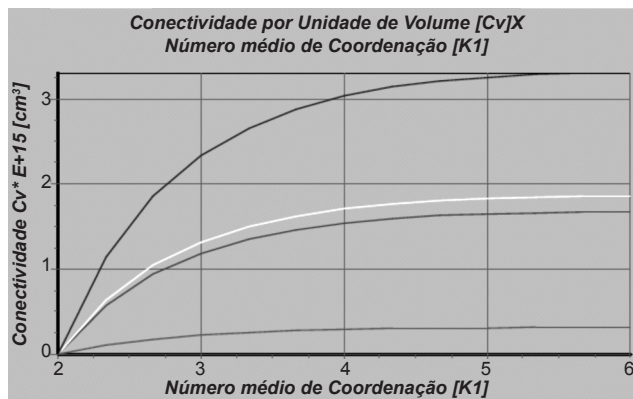


Figura 1: Apresentação da tela gerada pelo programa para dados referentes a uma amostra dos corpos-de-prova S1.
 [Figure 1: Computer generated screen presentation for the S1 mortar specimen data.]

avaliação da conectividade por unidade de volume [10], após o lançamento dos dados referentes aos corpos-de-prova S1, não submetidos a tratamento térmico e sem fibra. Nesta tela estão presentes o gráfico de conectividade por unidade de volume Cv vs. número médio de coordenação K1 gerado, os dados de entrada da amostra (descrição do material, superfície específica, volume específico de poros e densidade real) e os resultados dos cálculos realizados pelo programa (de densidade envelopada, ρ_{Ev} , porosidade, PO, e diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume e a área superficial da estrutura de poros, D). Na parte de baixo da tela está apresentado, para visualização e comparação, um círculo representando o diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume e a área superficial da estrutura de poros. Nota-se que existem cinco campos em branco. Isso por que o programa permite que sejam lançados dados de até seis amostras diferentes para a comparação.

A Fig. 2 apresenta os resultados referentes aos corpos-de-prova S1 e S2, não submetidos a tratamento térmico, sem fibra e com adição de fibra, respectivamente; e corpos-de-prova S3 e S4, submetidos a um tratamento térmico de 300 °C, sem fibra e com adição de fibra, respectivamente.

A comparação dos resultados de superfície específica Sg e volume específico de poros Vg, obtidos para os corpos-de-prova S1 e S2, não submetidos a tratamento térmico, sem fibra e com adição de fibra, respectivamente,



<p>Sem fibra; sem trat. tér. [S1]</p> <p>Sg = 1.36 m2/g Vg = 0.0076 cm3/g Pr = 2.55 g/cm3 Pv = 2.5015 g/cm3 Po% = 1.9011 % D = 2.23529411764706E-8 m</p>	<p>Com fibra; sem trat. tér. [S2]</p> <p>Sg = 2.84 m2/g Vg = 0.011 cm3/g Pr = 2.6 g/cm3 Pv = 2.5277 g/cm3 Po% = 2.7804 % D = 1.54929577464789E-8 m</p>	<p>Sem fibra; 300 C [S3]</p> <p>Sg = 3.78 m2/g Vg = 0.0173 cm3/g Pr = 2.51 g/cm3 Pv = 2.4055 g/cm3 Po% = 4.1615 % D = 1.83068783068783E-8 m</p>
---	---	--

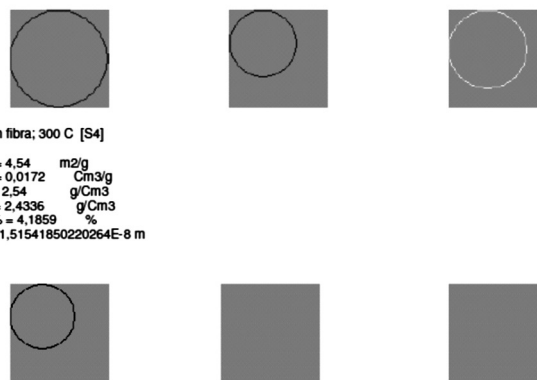


Figura 2: Resultados referentes a uma amostra dos corpos-de-prova de S1 a S4.
 [Figure 2: Test results for mortar specimens S1 to S4 data.]

e para os corpos-de-prova S3 e S4, submetidos a um tratamento térmico de 300 °C, sem fibra e com adição de fibra, respectivamente, revela a degradação produzida nas argamassas pelo tratamento térmico, pois os valores superiores foram obtidos para os corpos-de-prova S3 e S4, se comparados aos corpos-de-prova S1 e S2. Os resultados de superfície específica Sg, volume específico de poros Vg e de porosidade P0, revelam valores superiores para os corpos-de-prova S2 se comparados com os corpos-de-prova S1. Sabe-se que quando a água se desloca para fora de um corpo poroso não totalmente

rígido, ocorre uma contração e que nos concretos esse tipo de deslocamento de água geralmente ocorre desde o estado fresco até idades mais avançadas; também pode ser perdida água por evaporação da superfície dos concretos ainda no estado plástico. Essa contração é conhecida como retração plástica [21]. Quando as variações de volume em matrizes de cimentícias são restringidas pela presença de agregados, armadura, ou pelo contato com alguma outra superfície, a retração plástica pode gerar tensões internas na matriz do compósito, que ao superarem a sua resistência induzem à fissuração. Deve-se salientar que o número de trincas será maior em um compósito reforçado com fibras em relação à matriz sem fibras, porém com menor abertura de trincas [8]. Adicionalmente, a região de interface entre fibras e argamassa também possui uma concentração de trincas que foram produzidas por dilatação térmica diferenciada, devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica dos constituintes [22], ou devido à retração de secagem diferenciada [23, 24]. Infere-se, portanto, que os maiores resultados obtidos para os corpos-de-prova S2 em relação dos corpos-de-prova S1 foram devido às trincas existentes interface fibra-argamassa, produzidas sem a aplicação de qualquer carregamento, devido à incompatibilidade de movimentação entre os constituintes dessa região.

Os resultados de diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume e a área superficial da estrutura de poros D , revelam valores inferiores para os corpos-de-prova S2, se comparados com os obtidos para os corpos-de-prova S1. Os círculos desenhados na parte inferior da Fig. 2 propiciam a visualização desse comportamento. Apesar da presença das trincas na região de interface fibra-argamassa produzir um aumento da área superficial com pequena contribuição no volume da estrutura de poros, a razão Vg/Sg diminui, reduzindo, assim, o diâmetro equivalente, conforme pode ser observado a partir de uma análise da eq. Z. Verifica-se que a densidade esquelética ρ_E e a densidade envelopada ρ_{Ev} permaneceram praticamente constantes, para os corpos-de-prova S2 e S1. Isso é devido ao fato de que para a obtenção de ambas as densidades, são retiradas amostras apenas da argamassa para os corpos-de-prova S2.

Os resultados de superfície específica Sg , obtidos para as amostras tratadas termicamente a 300 °C, revelam que a degradação produzida para os corpos-de-prova S4 foi maior que para os corpos-de-prova S3. Os resultados de volume específico de poros Vg , densidade esquelética ρ_E , densidade envelopada ρ_{Ev} e de porosidade $P0$, foram praticamente constantes. Sabe-se que as fibras de polipropileno apresentam uma ligeira expansão volumétrica de aproximadamente 10% ao se fundirem, produzindo tensões de tração na matriz, que podem ajudar na formação de microtrincas [7]. Sugere-se que o tratamento térmico a 300 °C foi suficiente para aumentar a superfície específica dos poros, devido à nucleação e crescimento de microtrincas antes da fusão das fibras a 170,5°C, mas sem efeito nos outros parâmetros determinados. Os resultados de diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume e a área superficial da estrutura de poros (D), mostram valores inferiores para os

corpos-de-prova S4 se comparadas com os corpos-de-prova S3, revelando uma diminuição da razão Vg/Sg . Os círculos na parte inferior da Fig. 2 fornecem uma idéia visual desse comportamento.

Com relação aos resultados obtidos para conectividade por unidade de volume Cv observa-se, para as amostras ensaiadas, um aumento dos valores desse parâmetro com o tratamento térmico. Analisando a Fig. 2 constata-se também que o modelo prevê uma saturação a partir do número médio de coordenação $K1$ igual a 4 [20]. Para valores de conectividade superiores a 4, os pontos da curva gerada pelo gráfico conectividade por unidade de volume *vs.* número médio de coordenação se aproximam de uma assíntota horizontal. Percebe-se para as amostras submetidas a 300 °C uma enorme diferença entre a conectividade por unidade de volume para os corpos-de-prova S4, se comparada com o valor obtido para os corpos-de-prova S3 (o valor obtido para S4 é quase 82% maior que o obtido para S3). Infere-se que a degradação das fibras de polipropileno pela alta temperatura produziu uma porosidade mais conectada para os corpos-de-prova S4, se comparados com os corpos-de-prova S3. Isso revela o importante papel das fibras orgânicas como método preventivo no combate ao lascamento explosivo, ao criar uma rota de fuga para o vapor d'água, produzido pela alta temperatura, permitindo sua migração para o exterior do material, reduzindo assim a pressão gerada. É importante comentar que o estilhaçamento explosivo observado para estruturas de concreto ocorre em temperaturas abaixo de 200 °C [25]. Portanto, a presença de fibras de polipropileno seria efetiva em criar percolação em sistemas não percolados, em caso de acidentes que gerem um elevado gradiente de temperatura, evitando assim o colapso da estrutura de engenharia. É possível observar que a conectividade por unidade de volume obtida para os corpos-de-prova S2 (com fibra; sem tratamento térmico) é muito próxima do valor obtido para os corpos-de-prova S3 (sem fibra; tratados termicamente a 300 °C). Comprova-se então a eficiência da fibra orgânica em criar uma porosidade mais conectada mesmo sem a sua degradação por alta temperatura, mas apenas devido à incompatibilidade de movimentos existente na região de interface fibra-argamassa.

CONCLUSÃO

As fibras de polipropileno podem atuar benéficamente na matriz de um compósito cimentício, produzindo um aumento da resistência de compressão e da conectividade por unidade de volume, dos corpos-de-prova sem tratamento térmico e dos corpos-de-prova tratados termicamente a 300 °C. A sua atuação está baseada na redução da fragilidade da matriz cimentícia e na criação de uma porosidade mais conectada, criando percolação em sistemas não percolados. Apesar de não determinar de forma específica a conectividade por unidade volume Cv dos materiais analisados, pode-se pelo programa verificar que existe uma tendência bem definida de saturação deste parâmetro para números de coordenação $K1$ próximos a 6 em todos os materiais analisados. É

possível também, através do programa, identificar diferenças significativas na conectividade da estrutura de poros entre os materiais, principalmente quando as curvas são plotadas no mesmo gráfico. Além das curvas Cv versus K1, o programa fornece a seu usuário importantes informações como a porosidade PO% e a densidade verdadeira ρ_v dos materiais, bem como círculos representando os diâmetros equivalentes das estruturas de poros, de forma que se possa ter uma idéia visual dessa diferença, podendo assim auxiliar o pesquisador em sua análise, definindo melhores rotas de processamento buscando propriedades adequadas para o material em fase de desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] CNEN, *Apostila Educativa: Energia Nuclear*, Rio de Janeiro, RJ (s.d.)
- [2] C. B. Freire, C. C. O Tello, *Repositórios*, Rev. Bras. Pesq. Des. **9**, 3 (2007).
- [3] M. Lion, F. Skoczylas, Z. Lafhaj, M. Sersar, *Experimental study on a mortar. Temperature effects on porosity and permeability. Residual properties or direct measurements under temperature*, Cement Concrete Res. **35** (2005) 1937-1942.
- [4] M. C. R. Farage, J. Sercombe, C. Gallé, *Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300°C*, Cement Concrete Res. **33** (2003) 1047-1056.
- [5] L. Biolzi, S. Cattaneo, G. Rosati, *Evaluating residual properties of thermally damaged concrete*, Cement Concrete Comp. **30** (2008) 907-916.
- [6] A. Noumowe, *Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibers exposed to temperatures up to 200°C*, Cement Concrete Res. **35** (2005) 2192-2198.
- [7] A. A. Nince, A. D. Figueiredo, *Concretos expostos às altas temperaturas*, S. Paulo, Boletim Técnico, Escola Politécnica, Universidade de S. Paulo, BT/PCC/494, (2008) 36 p.
- [8] J. Tanesi, A. D. Figueiredo, *Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP)*, Boletim Técnico, Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, (BT/PCC/239) S. Paulo, SP (1999) 25 p.
- [9] W. L. Vasconcelos, *Descrição da permeabilidade em cerâmicas porosas*, Cerâmica **43**, 281-282 (1997) 119-122.
- [10] S. C. Reis, *Aplicação de modelagem geométrica computacional na obtenção, visualização e análise de estruturas de poros de materiais*, Diss. Mestrado Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, MG (2000).
- [11] P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*, 1ª Ed., Pini Ltda., S. Paulo, SP (1994) 573 p.
- [12] ABNT, NBR 7215: *Cimento Portland: determinação da resistência à compressão*, Rio de Janeiro, RJ (1996).
- [13] ABNT, NBR 7214: *Areia normal para ensaio de cimento*, Rio de Janeiro, RJ (2002).
- [14] Rilem Draft Recomm. 129-MHT: *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Compressive strength for service and accident conditions*, Mater. Structures **28** (1995) 410-414.
- [15] Rilem TC 129-MHT: *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Recommendations: Part 7: Transient Creep for service and accident conditions*, Mater. Structures **31** (1998) 290-295.
- [16] R. L. Rarick, J. J. Thomas, B. J. Christensen, H. M. Jennings, *Deterioration of the nitrogen BET surface area of dried cement paste with storage time*, Advanced Cement Based Mater. **3** (1996) 72-75.
- [17] J. J. Thomas, J. Hsieh, H. M. Jennings, *Effect of carbonation on the nitrogen BET surface area of hardened Portland cement paste*, Advanced Cement Based Mater. **3** (1996) 76-80.
- [18] ASTM D 3766, *Standard Terminology Relating to Catalysts and Catalysis*, ASTM, Philadelphia, EUA (2008) 1.
- [19] P. Kalifa, G. Chéné, C. Gallé, *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure*, Cement Concrete Res. **31** (2001) 1487-1499.
- [20] W. L. Vasconcelos, *Evolution and Properties of Sol-gel Silica Monoliths*, Tese Dr., University of Florida, EUA (1989).
- [21] A. M. Neville, *Propriedades do Concreto*, 2ª Ed., Editora Pini Ltda., S. Paulo, SP (1997) 828 p.
- [22] Y. F. Fu, Y. L. Wong, C. A. Tang, C. S. Poon, *Thermal induced stress and associated cracking in cement-based composite at elevated temperatures-Part I: Thermal cracking around single inclusion*, Cement Concrete Comp. (2004) 99-111.
- [23] T. T. C. Hsu, *Mathematical analysis of shrinkage stress in a model of hardened concrete*, J. Am. Concrete Inst. **60**, 3 (1963) 371-390.
- [24] T. T. C. Hsu, F. O. Slate, *Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar*, J. Am. Concrete Inst. **60**, 4 (1963) 465-486.
- [25] P. Kalifa, F. D. Menneteau, D. Quernard, *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures*, Cement Concrete Res. **30** (2000) 1915-1927.
- (Rec. 07/01/2011, Rev. 21/06/2011, Ac. 26/08/2011)