



METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO ENVELHECIMENTO NAS PROPRIEDADES DOS FIBROCIMENTOS

Cleber M. R. Dias (1), Vanderley M. John (2), Holmer Savastano Jr. (3)

- (1) Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: cleber.dias@poli.usp.br
(2) Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: vanderley.john@poli.usp.br
(3) Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: holmersj@usp.br

RESUMO

Neste estudo foram avaliados os efeitos do envelhecimento na microestrutura e no comportamento mecânico de corpos-de-prova de fibrocimento. O envelhecimento acelerado foi feito através de ciclos de molhagem e secagem assimétricos (500 ciclos) enquanto o envelhecimento natural foi feito com a exposição dos corpos-de-prova durante um ano em diferentes cidades do Brasil: São Paulo, Pirassununga e Belém. As propriedades dos fibrocimentos foram avaliadas através de uma metodologia que consiste de análise termogravimétrica, caracterização da microestrutura (porosimetria por intrusão de mercúrio e MEV) e das propriedades mecânicas (ensaios de flexão) dos corpos-de-prova, antes e após o envelhecimento. Esta metodologia mostrou-se adequada para avaliar os efeitos da degradação e permitiu comparar os diferentes métodos de envelhecimento empregados (acelerado e natural). Constatou-se que envelhecimento natural favoreceu a hidratação da matriz enquanto o envelhecimento acelerado favoreceu a carbonatação. A colmatação dos lumens das fibras de celulose foi observada com o envelhecimento natural, o mesmo não foi verificado após o envelhecimento acelerado. Os resultados mostraram que os níveis de degradação foram distintos em diferentes cidades do Brasil. A redução da tenacidade foi o principal efeito do envelhecimento no comportamento mecânico.

Palavras-chave: fibrocimento, microestrutura, efeitos do envelhecimento, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Accelerated aging and natural weathering tests in non-asbestos fiber-cement were performed. Fiber-cement specimens were exposed to natural weathering in three cities of Brazil: São Paulo, Pirassununga and Belém and the accelerated aging tests were performed under asymmetrical wetting-drying cycles. The methodology of aging effects evaluation consisted of thermo gravimetric analyses, X-ray diffraction, characterization of microstructure (MIP and SEM) and of mechanical properties (four-point bending tests) of fiber-cement specimens before and after aging tests. This methodology shows adequate to evaluate the aging effects and to compare the effects of different aging methods. After one year it was possible to verify that the natural weathering provide lumens filling of cellulose fibers with hydrated cement compounds unlike the accelerated test. Degradation levels shows different in not similar aging tests. Toughness reduction was the main effect on the mechanical performance.

Keywords: fiber cement, microstructure, aging effects, mechanical performance.

1 INTRODUÇÃO

Algumas indústrias de fibrocimento no Brasil já utilizam as fibras de celulose associadas a fibras sintéticas como as de poli (vinil-álcool) (PVA) ou polipropileno para a produção de componentes para a construção. Porém, existe pouco conhecimento acumulado sobre a durabilidade destes produtos quando expostos às condições climáticas brasileiras. A durabilidade de componentes da construção em geral pode ser determinada com o envelhecimento em uso, ou avaliada com o envelhecimento natural e através de métodos acelerados. Numa situação em que um componente da construção, desenvolvido com uma nova tecnologia, precisa ser colocado de imediato no mercado, a utilização do envelhecimento acelerado para avaliar a durabilidade torna-se imprescindível para a redução de riscos. No entanto, os métodos acelerados só representam bem o envelhecimento em uso se reproduzirem os principais mecanismos de degradação esperados em situações normais de uso e a sinergia entre eles (JOHN, 1987). Embora a literatura técnica sobre o tema seja escassa, métodos acelerados de avaliação da durabilidade de telhas de fibrocimento, em particular, já são normalizados (ISO, 1995; ABNT, 2005).

1.1 Objetivo

Desenvolver uma metodologia para avaliar os efeitos do envelhecimento acelerado e do envelhecimento natural nas propriedades dos fibrocimentos e comparar os diferentes métodos de envelhecimento.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste estudo, os efeitos do envelhecimento nas propriedades de fibrocimentos sem amianto foram avaliados através de uma metodologia que envolve analise termogravimétrica, caracterização da microestrutura e das propriedades mecânicas. Optou-se por utilizar como método acelerado, os ciclos de molhagem e secagem assimétricas em corpos-de-prova de pequenas dimensões, para isso, foi necessário desenvolver um equipamento adequado. Foram realizados até 500 ciclos de molhagem e secagem. Neste trabalho não serão apresentados resultados dos ciclos intermediários. O envelhecimento natural está sendo feito em três cidades do Brasil. Serão apresentados aqui somente os resultados após 1 ano de envelhecimento.

2.1 Formulações e materiais utilizados

Os corpos-de-prova utilizados neste estudo foram produzidos com diferentes formulações de cimento reforçado com fibras de celulose associadas a fibras de PVA (Tabela 1). O teor de fibras é a principal característica que diferencia as formulações. A sílica ativa utilizada apresentou alta superfície específica ($22,5 \text{ m}^2/\text{g}$) e alta reatividade pozolânica (814 mgCaO/g) determinada pelo método Chapelle (Raverdy et al., 1980). As propriedades das diferentes fibras de PVA são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 – Formulações de cimento reforçado com fibras de celulose e PVA.

Material	Formulações/porcentagem em massa (%)		
	PVA14	PVA20	PVA30
Cimento CPII - F	75,20	75,20	74,00
Filler calcário	12,72	12,72	13,50
Sílica ativa	6,68	6,08	5,00
Fibras de PVA1	1,40	2,00	1,20
Fibras de PVA2	----	----	1,80
Celulose1 (fibra longa)	1,20	1,20	3,50
Celulose2 (fibra curta)	----	----	1,00
Celulose3 (resíduo de jornal)	2,80	2,80	----
Total de fibras de PVA	1,40	2,00	3,00
Porcentagem em volume anroximada (%)			
Fibras de PVA	3,00	4,20	6,30
Fibras de celulose	8,60	8,50	9,40

Tabela 2 – Propriedades das fibras de PVA.

Propriedades	PVA1	PVA2
Diâmetro médio (10^{-6} m) ^I	15,34	14,85
Comprimento nominal (mm)	6,0	6,0
Forma da seção transversal ^I	Circular	oval
Densidade real (g/cm ³) ^{II}	1,23	1,27
Resistência à tração (MPa) ^{III}	1308	1004

Obs: ^IDeterminados através de microscopia óptica e análise de imagem. ^{II}Determinada através de picnometria com gás hélio.

^{III}Metodologia descrita por MOTTA, JOHN e AGOPYAN (2003).

2.2 Moldagem dos corpos-de-prova

Placas com dimensões de 20 cm x 20 cm e espessuras de aproximadamente 5,0 mm foram moldadas com as formulações da Tabela 1. A moldagem das placas foi feita seguindo a metodologia descrita por CALDAS E SILVA (2002) que consiste de misturar os materiais, adensar por sucção e prensar a manta de fibrocimento. Após a prensagem, que foi feita com tensão de 3,2 MPa por 5 min, as placas foram colocadas em sacos plásticos vedados onde permaneceram por dois dias. Logo após foi feita a cura imersa em água por um período de cinco dias, seguido de cura ao ar em ambiente de laboratório, até completar 28 dias. Os corpos-de-prova utilizados nos experimentos foram extraídos das placas moldadas. Estes corpos-de-prova foram cortados com dimensões aproximadamente iguais a 160 mm de comprimento e 40 mm de largura.

2.3 Envelhecimento natural e acelerado

Os corpos-de-prova das formulações PVA14, PVA20 e PVA30 (45 por série) foram instalados, em sítios de envelhecimento natural localizados em diferentes cidades do Brasil: São Paulo (SP), Pirassununga (SP) e Belém (PA). Estes sítios apresentam diferentes características ambientais: a) São Paulo – ambiente industrial com elevado teor de agentes poluentes no ar; b) Pirassununga – localizada em zona rural no interior de São Paulo e c) Belém – região com intensa incidência de radiação solar e com temperaturas e umidades relativas elevadas durante todo o ano. Os corpos-de-prova foram instalados em suportes de fixação de forma que as superfícies expostas às intempéries ficassem direcionadas para o norte verdadeiro e inclinadas de um ângulo aproximadamente igual a 45° com a superfície do terreno. Estes corpos-de-prova foram caracterizados após um ano de envelhecimento.

O envelhecimento acelerado dos corpos-de-prova de cimento-amianto e das formulações PVA14, PVA20 e PVA30 foi feito através de molhagem e secagem assimétricas em um equipamento desenvolvido especialmente para este ensaio. Para avaliar os efeitos do envelhecimento acelerado, os corpos-de-prova foram caracterizados antes e depois de serem submetidos a 100, 250 e 500 ciclos. Para a realização do envelhecimento acelerado, um equipamento foi projetado e construído de forma a permitir realizar ciclos de molhagem e secagem assimétricas automatizados. Cada ciclo (6h) é constituído por 2h 50min de molhagem e 2h 50min de secagem com intervalos de 10 min entre as etapas. Os corpos-de-prova são posicionados de tal forma que eles ficam parcialmente imersos durante a molhagem. Durante a secagem a temperatura num corpo negro posicionado no centro do reservatório (R1) é mantida igual a 70 °C.

2.4 Caracterização dos corpos-de-prova

2.4.1 Análise termogravimétrica e microestrutura

As análises termogravimétricas foram feitas em um equipamento NETZSCH STA409 PG usando amostras de massa igual a 1,0 g. Utilizou-se atmosfera de nitrogênio (fluxo de 60 ml/min) e taxa de aquecimento igual a 10 °C/min até 1000 °C. Antes dos testes as amostras foram secas a 40 °C em estufa a vácuo (- 60 kPa) durante 24 h.

A porosidade e a distribuição dos tamanhos dos poros das telhas foram determinadas através de porosimetria por intrusão de mercúrio. Utilizou-se um porosímetro Micromeritics (modelo Auto Pore III). Os ensaios foram realizados com amostras com massa de aproximadamente 1,0 g, compostas por pedaços removidos de trechos não fissurados de corpos-de-prova submetidos à flexão. As amostras foram secas em estufa à temperatura de (70 \pm 5) °C e vácuo de -60 kPa. Foram ensaiadas três amostras

por série. A Equação de Washburn foi utilizada para a determinação da distribuição dos tamanhos dos poros. Foram utilizados para os cálculos, ângulo de contato igual a 130° e tensão superficial do mercúrio igual a 485×10^{-3} N/m (SATO, 1998). A pressão máxima aplicada durante os ensaios foi igual a 412 MPa. Seções de fratura e seções polidas de corpos-de-prova foram observadas num microscópio eletrônico LEO Leica S440. Para as observações no microscópio as amostras receberam *coating* de carbono.

2.4.2 Propriedades mecânicas

A caracterização mecânica foi feita através de ensaios de flexão com quatro pontos (vão = 135 mm). Foram determinados o módulo de ruptura (MOR) e energia específica de fratura (tenacidade). Os ensaios de flexão foram feitos com corpos-de-prova depois destes terem sido submetidos à imersão em água por 24 h. Para a realização dos ensaios de flexão, utilizou-se uma prensa INSTRON (modelo 5569) com célula de carga com capacidade de 1 kN. Um LVDT Solatron com curso de 5 mm foi utilizado para medir a flecha a meio vão. A velocidade de deslocamento do cutelo que aplicou a carga foi fixada em 1,5 mm/min.

3 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise termogravimétrica

A Figura 1 apresenta as curvas DTG dos corpos-de-prova da formulação PVA14 antes e após o envelhecimento acelerado e natural. No envelhecimento acelerado a carbonatação dos corpos-de-prova está registrada pela redução da perda de massa do C-S-H e sulfatos (até 230 °C) e da portlandita (450 à 520 °C) e pelo aumento da perda de massa dos carbonatos (acima de 530 °C). Já no envelhecimento natural ocorre um aumento significativo na quantidade de produtos hidratados.

Os produtos gerados durante a carbonatação foram, em grande parte, calcita mal cristalizada (520 à 780 °C). A formação destes produtos se deu com grande intensidade nos corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado, o que parece estar associado a carbonatação da etringita que ocorre antes mesmo da portlandita ser totalmente consumida. Já no envelhecimento natural a carbonatação é mais lenta e isto parece não favorecer a formação de carbonatos de 520 a 780 °C de maneira tão intensa como no envelhecimento acelerado. Como exemplo, a quantidade de carbonatos na faixa de 530 à 780 °C da formulação PVA14 aumentou em aproximadamente 7 % no envelhecimento acelerado enquanto no envelhecimento natural este aumento foi de aproximadamente 1 %. Quantidades razoáveis de portlandita estão presentes nos corpos-de-prova mesmo após o envelhecimento (Figura 1), o que permite concluir que a pozolana utilizada não está sendo eficiente apesar da sua alta reatividade. Talvez a quantidade adicionada não seja suficiente para remover toda a portlandita ou a sua dispersão tenha sido ineficiente.

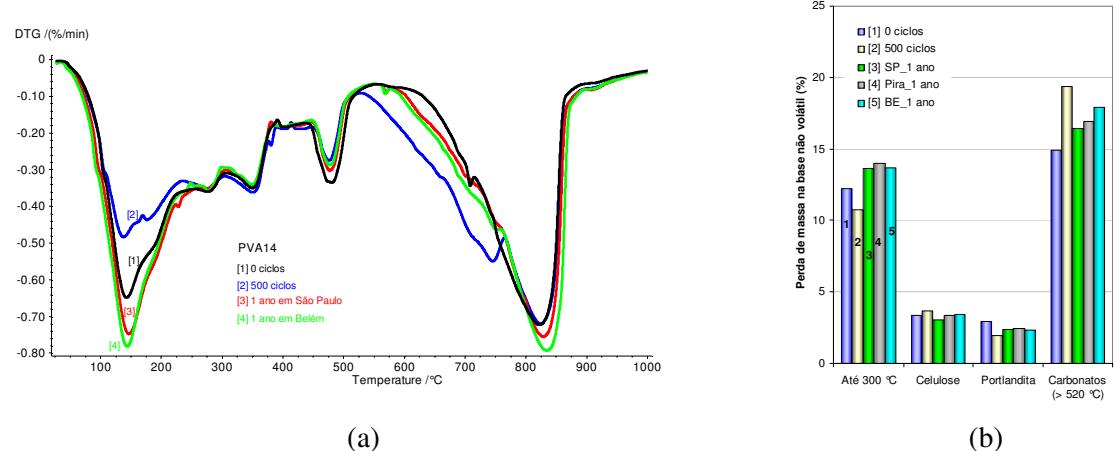


Figura 1– Formulação PVA14: a) curvas TG dos corpos-de-prova da antes e após o envelhecimento e b) perdas de massa na TG antes e após o envelhecimento.

3.2 Efeitos do envelhecimento acelerado e natural na microestrutura

A Figura 2 apresenta as porosidades obtidas através de porosimetria por intrusão de mercúrio dos corpos-de-prova antes e depois de submetê-los ao envelhecimento. Comparando as formulações, observa-se que as porosidades são maiores para as formulações com maiores teores de fibras, o que pode ser explicado pela redução do empacotamento de partículas com a inclusão de fibras, pela presença de poros internos às fibras de celulose (lumens) e por mudanças nas propriedades reológicas do compósito no estado fresco que dificultam a moldagem. Redução significativa da porosidade foi observada com o envelhecimento natural, que está associada ao prosseguimento da hidratação, colmatando inclusive os poros internos das fibras.

A Figura 2 compara as curvas médias de distribuição dos tamanhos dos poros dos corpos-de-prova sem envelhecimento. Os picos entre os diâmetros de 200 nm e 10000 nm são característicos de formulações de cimento reforçado com fibras de celulose. Estes picos parecem estar relacionados aos lumens das fibras de celulose. Esta hipótese é coerente, já que o volume de poros nesta faixa é maior na formulação com maior teor de celulose (PVA30) (Tabela 1). É interessante notar também que a formulação PVA30, que tem fibras de celulose diferentes das utilizadas nas demais formulações, apresenta picos sobrepostos na faixa de 200 nm a 10000 nm. Os poros com diâmetros maiores que 10000 nm, denominados aqui de grandes poros, são característicos de matrizes pouco hidratadas (MEHTA e MONTEIRO, 1994) e de matrizes com defeitos de moldagem. Na Figura 2 pode-se observar que as formulações com maiores teores de fibras têm volumes maiores de grandes poros, o que pode ser atribuído tanto às alterações no empacotamento das partículas quanto às alterações das propriedades reológicas que dificultam a moldagem.

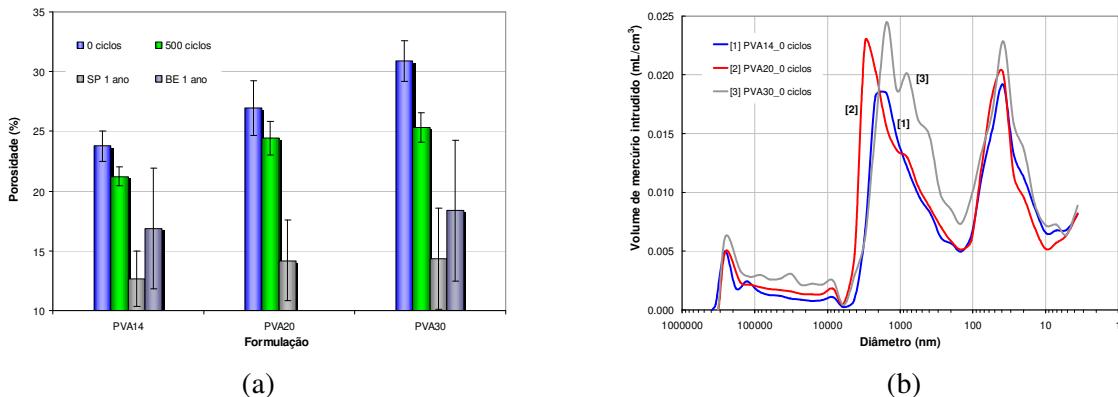


Figura 2 – a) porosidade dos corpos-de-prova antes e depois de submetê-los ao envelhecimento acelerado e natural e b) distribuição de tamanhos dos poros: corpos-de-prova sem envelhecimento.

Tanto o envelhecimento acelerado como o natural alteraram sensivelmente as curvas de distribuição dos tamanhos dos poros dos corpos-de-prova. A exemplo, a Figura 3 apresenta a distribuição de tamanho de poros dos corpos-de-prova da formulação PVA14. As principais alterações ocorridas foram: a) o aumento da quantidade de poros com diâmetros menores que 10 nm (refinamento dos poros) – ocorreu em todas as formulações, tanto no envelhecimento acelerado como no natural, o que está relacionado à formação do C-S-H pelo avanço da hidratação do cimento inclusive pela lenta reação pozolânica. Estes dados permitem sugerir que o teor de C-S-H está aumentando tanto no envelhecimento natural quanto no acelerado. Portanto, a redução da perda de massa observada na TG na faixa de decomposição do C-S-H e etringita deve ser associada à redução do teor de etringita com a carbonatação; b) Redução do pico a 38 nm – ocorreu em todas as formulações tanto no envelhecimento natural como no acelerado, o que está associada com a hidratação e carbonatação da matriz (BIER *et al.*, 1987; MATSUSATO *et al.*, 1992). Nos corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento natural esta redução é muito mais acentuada por causa da hidratação; c) redução do volume de poros da celulose – ocorreu pouco nas amostras submetidas ao envelhecimento acelerado, e de forma bastante acentuada nas amostras submetidas ao envelhecimento natural. Assim, conclui-se que no envelhecimento natural o regime (tempo de duração) de molhagem e secagem e o aumento da hidratação foram mais importantes que a carbonatação no mecanismo de colmatação dos lumens da

celulose. BENTUR e AKERS (1989) afirmam que o preenchimento dos lumens ocorre mais facilmente em compósitos nos estágios mais avançados de carbonatação, onde o pH da matriz é reduzido favorecendo a dissolução do C-S-H e do hidróxido de cálcio. No entanto, neste experimento os corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento acelerado apresentaram pouca alteração de porosidade na faixa de poros da celulose apesar de terem sofrido carbonatação mais intensa. Já os compósitos submetidos ao envelhecimento natural apresentaram baixo grau de carbontação e lumens preenchidos.

Apesar de alguns estudos apontarem a possibilidade de ocorrência de danos progressivos em fibrocimentos com as tensões geradas durante a molhagem e secagem assimétricas (JOHN, 2002; KALBSKOPF *et al.*, 2002), no presente trabalho, não foram encontrados sinais de ocorrência de degradação por este mecanismo. Esperava-se que os danos progressivos supostamente causados durante o envelhecimento acelerado promovessem alterações nas curvas de distribuição dos tamanhos dos poros semelhantes ao observado por ZHANG (1998), no entanto, isto não foi observado em nenhuma das amostras (Figura 3). É possível, no entanto, que estes venham se tornar visíveis em estágios mais avançados de envelhecimento, em uma fase onde não exista a formação de novos produtos de hidratação capazes de colmatar estes danos.

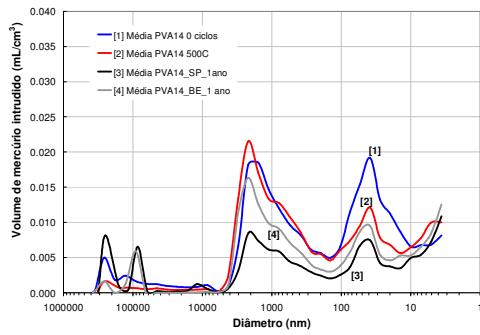


Figura 3 – Distribuição dos tamanhos dos poros dos corpos-de-prova da formulação PVA14 sem envelhecimento e envelhecidos.

3.2.1 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Micrografias obtidas por MEV da seção de fratura e da seção polida de corpos-de-prova da formulação PVA14 são apresentadas na Figura 4 à Figura 7. Os resultados mostram que na amostra sem envelhecimento as fibras de celulose são predominantemente arrancadas da matriz durante a fratura (Figura 4a e Figura 4b), o que provavelmente se deve à resistência das fibras, ainda pouco alterada com a degradação, e à baixa resistência de aderência entre as fibras e a matriz, que pode ser atribuída ao baixo grau de hidratação da matriz.

Após o envelhecimento acelerado as fibras de celulose são predominantemente rompidas (Figura 5a), resultado do aumento da resistência de aderência entre as fibras e a matriz com a densificação da zona de interface e do enfraquecimento das fibras com a degradação. A hipótese mais provável para explicar este fenômeno de que antes do envelhecimento as fibras de celulose ainda apresentavam resistência suficiente que permitiu que elas fossem arrancadas sem sofrer ruptura. Com o envelhecimento acelerado, as fibras foram degradadas, ficaram enfraquecidas e simultaneamente mais fortemente aderidas à matriz, de forma que a força de arrancamento supera a resistência da fibra e estas passaram a sofrer ruptura. É interessante observar que a mudança na forma de degradação das fibras não exigiu o preenchimento dos lumens, uma vez que nestes corpos-de-prova, as fibras apresentam predominantemente os lumens vazios e o preenchimento das fibras foi um fenômeno limitado à camada superficial dos corpos-de-prova. Após o envelhecimento natural há também a predominância de ruptura das fibras de celulose. No entanto o preenchimento dos lumens é claramente visível (Figura 7 e Figura 7) e não se restringe somente à camada superficial. Isto explica a redução do volume de poros entre 200 nm e 10000 nm observada nos resultados de porosimetria (Figura 3). As análises por EDS mostram que o material que preenche as fibras é uma fase rica em cálcio, elemento típico dos produtos de hidratação do cimento (Figura 6d). A redução do volume de poros com diâmetros entre 200 nm e 10000 nm observada na porosimetria foi menos intensa nos corpos-de-prova

da estação de Belém, cidade onde chove quase diariamente. Estes resultados permitem levantar a hipótese de que os poros com diâmetros entre 200 nm e 10000 nm também estão relacionados com as zonas de interface entre as fibras de celulose e a matriz, já que as micrografias da seção de ruptura das amostras envelhecidas em Belém, mostram que com frequência as fibras estão descoladas da matriz.

Foi observado que as fibras de PVA são predominantemente arrancadas tanto nas amostras sem envelhecimento como nas amostras envelhecidas, o que se deve ao fato da resistência destas fibras continuar superior ao esforço de arrancamento para o comprimento de fibra adotado, mesmo após o envelhecimento do compósito. Isto é consistente com o fato das fibras de PVA não sofrerem alterações químicas e nem tampouco perda resistência mecânica quando embutidas em matriz de cimento Portland, como mostrado por KALBSKOPF *et al.* (2002). Situações como a apresentada na Figura 6a, que mostra uma fibra de PVA claramente rompida na matriz aconteceram na amostra do corpo-de-prova envelhecido em São Paulo, porém devem ser consideradas exceções.

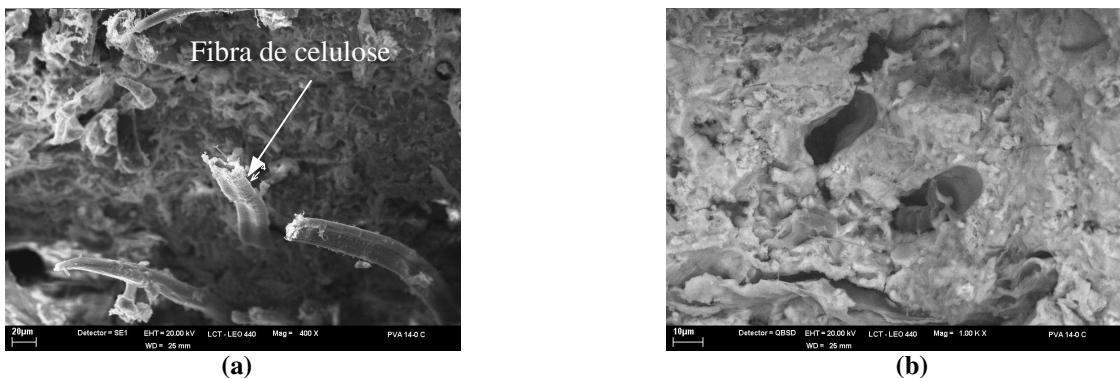


Figura 4 – Micrografias dos corpos-de-prova da formulação PVA14 sem envelhecimento: a) seção de fratura - fibras arrancadas; b) seção de fratura - vazios antes preenchidos por fibras de celulose.

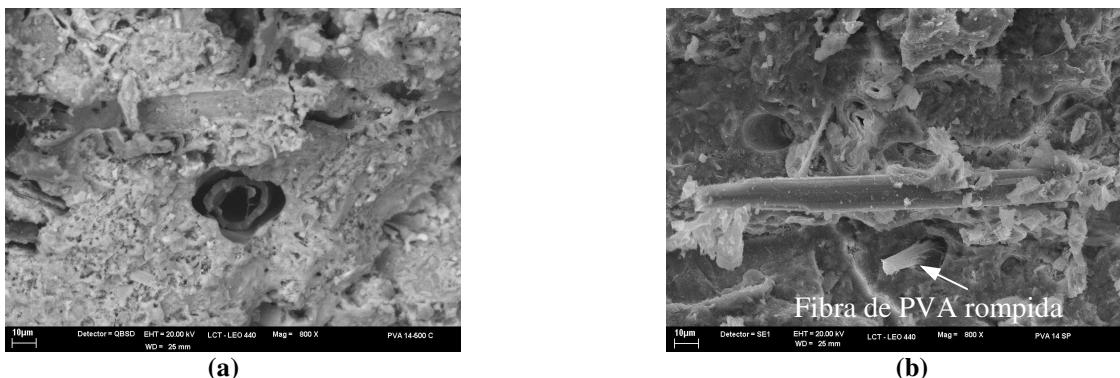


Figura 5 – Micrografias da seção de ruptura dos corpos-de-prova da formulação PVA14:a) após 500 ciclos de molhagem e secagem - fibra de celulose rompida e b) após 1 ano de envelhecimento em São Paulo - fibra de PVA rompida.

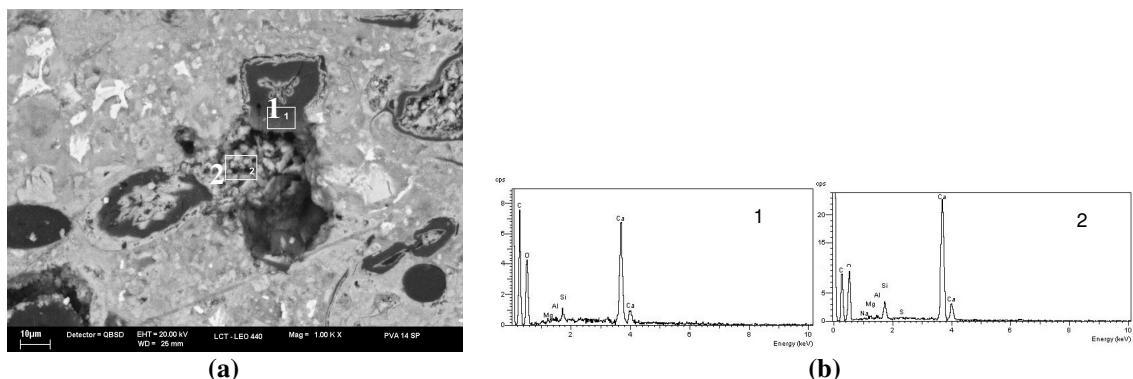
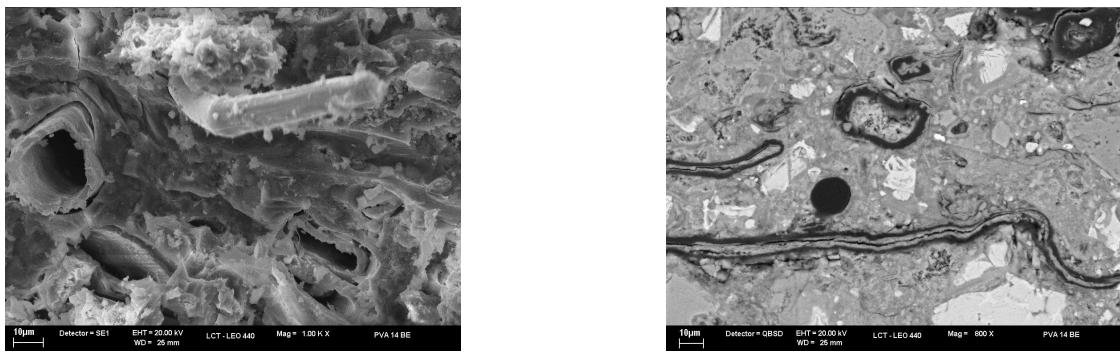


Figura 6 – Micrografias da seção de ruptura dos corpos-de-prova da formulação PVA14 após 1 ano de envelhecimento em São Paulo: a) fibras de celulose preenchidas e b) EDS dos pontos 1 e 2 da Figura 6a.



(a)

(b)

Figura 7 – Micrografias da seção de ruptura dos corpos-de-prova da formulação PVA14 após 1 ano de envelhecimento em Belém: a) seção de fratura – fibras de celulose rompidas e vazias; b) fibras de celulose preenchidas e fibra de PVA arrancada.

3.3 Efeitos do envelhecimento acelerado e natural no desempenho mecânico

Os resultados obtidos com a caracterização mecânica estão apresentadas de forma resumida na Figura 8. Os resultados mostram que a tenacidade dos corpos-de-prova é sensivelmente reduzida tanto no envelhecimento acelerado como no envelhecimento natural, o que pode ser atribuído à degradação das fibras de celulose e a densificação da zona de interface fibra de celulose-matriz que provocou a mudança de arrancamento para rompimento destas fibras, reduzindo o consumo de energia. Alterações favoráveis ao desempenho da matriz, como a carbonatação e a hidratação, fazem com que ocorra o aumento do MOR (Figura 8). O aumento observado para a tensão no limite elástico e para o módulo de elasticidade – resultados não apresentados neste trabalho – levam a concluir que ocorreu melhora no desempenho da matriz com o envelhecimento. O aumento no MOR deve-se provavelmente, em parte, ao aumento da aderência entre as fibras de PVA e a matriz.

Com o envelhecimento natural o MOR aumenta consideravelmente, o que se deve à melhora do desempenho da matriz com a hidratação e ao aumento da aderência entre as fibras de PVA e a matriz. Isto pôde ser observado também com o aumento da tensão no limite elástico e do módulo de elasticidade dos compósitos.

Os corpos-de-prova de Belém parecem ter sido submetidos a um ambiente mais agressivo ao compósito. O módulo de ruptura neste caso não aumentou na mesma proporção que o dos corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento em São Paulo e Pirassununga. Diferenças no grau de hidratação da matriz parecem não ser suficiente para explicar este comportamento, já que os resultados das análises termogravimétricas não mostram diferenças significativas no grau de hidratação de corpos-de-prova de diferentes sítios de envelhecimento. É provável que a porosidade do compósito, que é maior para os corpos-de-prova de Belém comparado aos de São Paulo, tenha um importante papel na resistência mecânica do compósito. Esta diferença de porosidade poderia eventualmente ter sido provocada por lixiviação ou diferentes graus de carbontação.

A tenacidade dos corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento natural é reduzida tanto quanto no envelhecimento acelerado (500 ciclos), mostrando que a degradação das fibras de celulose também ocorreu de maneira intensa neste modo de envelhecimento. Os resultados mostraram que as fibras de PVA têm um papel determinante na tenacidade final e que as tenacidades foram maiores para as formulações com maiores teores de fibras de PVA. Observou-se que mesmo após o envelhecimento acelerado e natural, os corpos-de-prova das formulações PVA20 e PVA30 mantiveram tenacidades superiores aos normalmente obtidos para o cimento-amianto ($\sim 1 \text{ kJ/m}^2$), o que reforça a importância das fibras de PVA. As curvas de tensão *versus* flecha apresentadas na Figura 8 ilustram os efeitos do envelhecimento discutidos anteriormente.

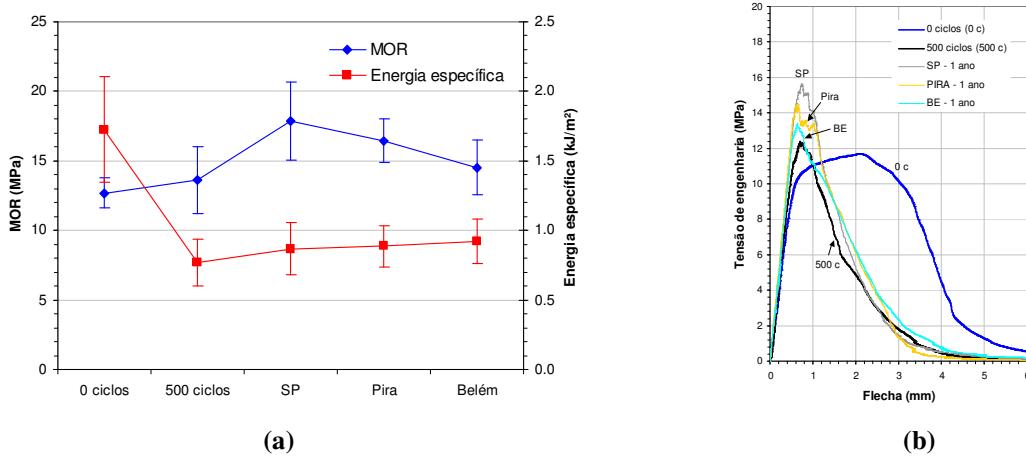


Figura 8 – Corpos-de-prova da formulações PVA14: a) módulo de ruptura e energia específica antes e após o envelhecimento acelerado e b) curvas médias de tensão x flecha.

4 CONCLUSÕES

Os efeitos do envelhecimento acelerado e do natural na microestrutura dos fibrocimentos avaliados foram significativamente diferentes. No envelhecimento acelerado a carbonatação da matriz prevaleceu sobre a hidratação, o mesmo não ocorreu com o envelhecimento natural. A colmatação dos lumens das fibras de celulose foi favorecida no envelhecimento natural diferentemente do envelhecimento acelerado. Esta maior colmatação por cálcio é confirmada pela redução do volume de poros na faixa atribuída à celulose.

Com o envelhecimento, as fibras de celulose passam a sofrer predominantemente ruptura durante a fratura do compósito e isto produz um efeito negativo na tenacidade. Os envelhecimentos acelerado e natural levaram a resultados similares na tenacidade. No envelhecimento acelerado a perda de tenacidade se processou praticamente nos ciclos iniciais (100 primeiros ciclos). Após o envelhecimento a tenacidade passa a depender basicamente do teor de fibras de PVA, já que as fibras de celulose passam a sofrer predominantemente ruptura conforme mostram as micrografias obtidas. Após os ciclos iniciais do envelhecimento acelerado os corpos-de-prova sofreram redução do MOR, o que se deve à decomposição das fibras de celulose. Após 500 ciclos foi observado um ganho de resistência o que é atribuído à melhora do desempenho da matriz e ao aumento da resistência de aderência entre as fibras de PVA e a matriz que compensaram a perda ocasionada pela degradação da celulose. A melhora do desempenho da matriz dos corpos-de-prova com a hidratação ocorrida no envelhecimento natural, bem como a redução da porosidade, contribuíram substancialmente para o aumento do MORs dos compósitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR15210-1 – Telha ondulada de fibrocimento sem amianto e seus acessórios - Parte 1 - Classificação e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

BENTUR, A.; AKERS, A.S. *The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in a normal environment*. In: The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. V11 N2. 1989.

BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Elsevier Applied Science. London and New York, 1990.

BIER, TH.A.; KROPP, J.; HILSDORF, H.K. *Carbonation and realkalinization of concrete and hydrated cement paste*. In: Durability of Construction Materials V3. Proceedings of the 1st Congress from Materials Science to Construction Materials Engineering. RILEM. 1987.

CALDAS E SILVA; A. *Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose* [Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da USP]. 2002.

DIAS, C.M.R.; JOHN V.M. *Modelagem da variação dimensional de placas de cimento-celulose-PVA submetidas à molhagem*. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo, 2003.

JOHN, V.M. *Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e edificações* [Dissertação de mestrado]. Porto Alegre, 1987.

JOHN, V.M. *On the use of lignocellulosic fibre reinforced cement* [Relatório de Pós-doutorado realizado na HÖGSKOLAN I GÄVLE]. 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO9933: Products in fibre-reinforced cement - Long corrugated or asymmetrical section sheets and fittings for roofing and cladding*. 1995.

KALBSKOPF, R.; DE LHONEUX, B.; VAN DER HEYDEN, L.; ALDERWEIRELDT, L. *Durability of fiber-cement roofing products*. In: Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials V8. Sun Valley, 2002.

MATSUSATO, H.; OGAWA, K.; FUNATO, M.; SATO, T. *Studies on the carbonation of hydrated cement and its effect on microstructure and strength*. In: 9th International Congress on the Chemistry of Cement V5. New Delhi, 1992. p363-369

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto*: Estrutura, propriedades e materiais. Ed PINI. São Paulo, 1994.

MOTTA, L.A.C.; JOHN, V.M.; AGOPYAN, V. *Caracterização de fibras sintéticas para uso como reforço de matrizes cimentícneas*. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003.

Raverdy, M., Brivot, F., Paillère, A. M., Dron, R. *“Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires”* - 7e. Congrès International de la Chimie des Ciments Volume III, 36. Paris 1980.

SATO, N.M.N. *Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concreto* [Tese apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Doutor em Engenharia]. São Paulo, 1998.

STUDINKA, J.B. *Asbestos substitution in the fibre cement industry*. In: The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete V11. 1989. p73-78.

ZHANG, B. *Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue*. In: Cement and Concrete Research. V28 N5. Eelsevir Science. 1998. p699-711.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP pelo apoio financeiro na pesquisa que deu origem a este trabalho.