

## **5**

### **Conclusões e sugestões**

Os resultados obtidos dos experimentos, após compilados e analisados, permitiram o alcance das conclusões, a seguir apresentadas e tratadas separadamente, considerando as três categorias de estudo (retração, fluência e fratura), que tiveram como objeto de investigação os compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu. Os tópicos sugeridos como perspectivas de continuidade das pesquisas no âmbito da aplicação dos compósitos com fibras vegetais, emergiram da observação das lacunas de dados e informações que se mostraram úteis e necessários e que extrapolam o escopo desse estudo.

#### **5.1**

##### **Conclusões**

##### **5.1.1**

###### **Retração**

###### **5.1.1.1**

###### **Retração plástica**

Foi possível concluir que o período em que o material cimentício se mantém no estado plástico é maior para o compósito com polpa vegetal do que para a matriz sem reforço. Os resultados dos ensaios, que mediram a evolução do aquecimento sofrido pelos materiais estudados nas primeiras horas, mostraram que houve considerável retardo das reações de hidratação do cimento em virtude da presença da polpa vegetal no compósito. O início da pega do compósito, com 8% de polpa, ocorreu em um período de tempo em torno de 8 horas após a água ter sido posta em contato com o cimento, tempo esse que foi maior que o triplo do necessário para o início da pega da matriz. O final da pega, para o compósito, deu-se num período de tempo 2,5 vezes maior que para a matriz. A lentidão das reações levou a que o aquecimento máximo atingido no compósito fosse menos que um terço do aquecimento sofrido pela pasta de cimento. Assim, torna-se necessário observar, na produção de elementos com compósito, a exigência de um período de tempo mais extenso, para a desmoldagem do material, servindo como orientação para o estabelecimento da rotina de produção dos componentes. Por

outro lado, o menor acúmulo de calor num dado instante, no transcorrer das reações químicas, traz a vantagem de não expor o elemento moldado a maiores deformações térmicas, num período de tempo em que o material ainda não tem como resistir às tensões provocadas pelos possíveis impedimentos às deformações, que costumam provocar fissuras.

A capacidade de sofrer retração plástica mostrou decrescer com o aumento do teor de polpa de bambu no compósito, para composições com 0%, 8%, 10%, 12% e 14% de fibras. Pela grande capacidade de absorção de água das fibras, pode-se supor que esses elementos de reforço retêm considerável parcela da água da mistura, possibilitando a retenção e a redução da movimentação da umidade no interior do material e dificultando sua ascensão à superfície exposta do corpo-de-prova, onde ocorre a evaporação da água exsudada. Esse tipo de retração sofreu reduções de 28,5% e 84,2%, em relação à mistura de referência, para os teores de polpa de 8% e 14%, respectivamente.

#### **5.1.1.2 Retração na secagem**

##### **5.1.1.2.1 Retração livre**

As medidas de retração livre dos compósitos se estenderam por um ano e mostraram um aumento da retração livre com o aumento do teor de polpa, dentro do intervalo de teores considerado. Para o teor de 8% de polpa de bambu em massa, a retração do compósito superou à da matriz sem reforço em cerca de 16%. Para o teor de 14% de polpa, esse aumento foi de 40%, após um ano. Esse comportamento pode ser creditado ao fato de que as fibras vegetais, por sua porosidade, podem criar caminhos por onde a água pode ser perdida para o ambiente, provocando maiores deformações de retração.

A adição de cinza de casca de arroz, substituindo parcialmente o cimento, causou aumento da retração livre. Com 15% e 30% de substituição do aglomerante pela cinza, houve aumento da retração do compósito em relação à mistura de referência de cerca de 10% e 20%, respectivamente, ao final de um ano.

Comparando-se o reforço com polpa de bambu ao de polpa de sisal, foi constatado que, para o teor de 8% de fibras, a retração no compósito com polpa de sisal superou a do compósito com polpa de bambu em 16,7%, após um ano.

#### **5.1.1.2.2**

#### **Retração restringida**

Para as condições do ensaio do anel, com duração de cerca de 45 dias, os compósitos cimentícios com polpa de bambu, com 8% e 14% em relação à massa do cimento, mostraram-se eficientes no combate à fissuração por retração restringida, mesmo estando sujeitos, nas condições de contorno impostas, a deformações da mesma ordem da matriz sem reforço, como ocorreu com a mistura com 8% de polpa. Sob deformações semelhantes, a matriz de pasta pura fissurou rapidamente. Corpos-de-prova da mistura de referência (CPB00) apresentaram a primeira fissura em torno de 3 a 4 horas após a remoção dos moldes, e uma segunda fissura surgiu em torno de 24 horas. Após cerca de 25 dias, as aberturas dessas fissuras se estabilizavam. As aberturas das maiores fissuras de cada corpo-de-prova variaram de 0,90 a 1,50 mm.

Os compósitos com 8% e 14% de polpa de bambu não apresentaram fissuras sob retração restringida que pudessem ser detectadas por fissurômetro. Pode-se supor que a presença das fibras da polpa de bambu respondeu pelo impedimento ao desenvolvimento das fissuras.

#### **5.1.1.2.3 Reversibilidade da retração**

A exposição a ciclos alternados de secagem e molhamento mostrou constituir-se num método peculiar de envelhecimento acelerado dos materiais, surgindo empenamentos e fissuras.

Para o ensaio que se iniciou com secagem dos corpos-de-prova, a mistura CPB00 mostrou tendência a alcançar um valor de deformação cíclica reversível média com razoável constância, em torno de 1600  $\mu\text{s}$ , quase que igualmente distribuído entre deformação positiva (expansão) e negativa (contração). A deformação máxima de expansão, ocorrida ao final do primeiro ciclo, ficou em torno do valor médio de 3300  $\mu\text{s}$ . Os valores médios de deformação cíclica reversível para os compósitos não diferiram muito dos atingidos pela matriz sem

reforço. Porém, os compósitos com fibras apresentaram deformações predominantemente negativas (de contração), alcançando valores maiores de contração em ciclos posteriores. Nessa condição de ensaio, as máximas deformações de expansão dos compósitos foram menores que a deformação máxima da pasta. No compósito CPB08 e no CPB14, essas deformações atingiram, respectivamente, 64% e 79% do valor para CPB00.

Pode-se supor que o predomínio de deformações de contração nos compósitos deva-se à atuação das fibras como reforço, restringindo deformações de expansão. Uma justificativa plausível seria baseada nos experimentos relatados por McKenzie (1994), que sugerem um caráter de irreversibilidade da retração por secagem inicial sofrida pelas micro-fibras.

Nos ensaios que se iniciaram com molhamento dos corpos-de-prova, a deformação máxima no primeiro ciclo (deformação máxima de contração) foi, nos compósitos, superior à deformação máxima para a matriz (23% e 29% maior para CPB08 e CPB14). Além disso, esses valores de deformação de contração inicial, nos compósitos, foram consideravelmente maiores que as deformações de expansão, dos mesmos compósitos, na seqüência que se inicia por secagem (2,0 vezes maior para o CPB08 e 1,7 vezes maior para o CPB14). Esses resultados confirmam a suposição de que o fenômeno da retração irreversível na secagem das fibras se constitua no fator mais importante a determinar o desempenho desses materiais. Havendo secagem antes do molhamento, essa irreversibilidade da retração das fibras impediria a expansão posterior por saturação, diminuindo o total de deformação entre os dois estados extremos (seco e saturado). Iniciando-se pela saturação, o material poderia se expandir ao máximo, sem restrições.

## **5.1.2 Fluência**

### **5.1.2.1 Fluência sob compressão**

Houve aumento da capacidade de sofrer fluência, com a inserção do reforço fibroso na mistura. Os compósitos com 8% e 14% de polpa atingiram valores de fluência básica 6,78 e 11,63 vezes maiores que os da matriz, respectivamente, aos

120 dias sob carregamento. Para a fluência total, sob secagem, esses índices foram 5,77 e 6,26 (CPB08 e CPB14 respectivamente).

O efeito da secagem sobre a fluência foi significativo, tendo sido a fluência sob ação concomitante da secagem foi 2,93 vezes maior que a fluência básica para a matriz. Para os compósitos com polpa, as proporções entre fluência total e básica foram de 2,49 e 1,58 vezes, respectivamente, para CPB08 e CPB14.

A diferença entre as fluências básicas dos dois compósitos com polpa (71,5% maior no CPB14 em relação ao CPB08) foi mais acentuada do que na condição de carregamento com secagem simultânea (8,6% maior no CPB14 em relação ao CPB08).

Os compósitos com polpa de bambu apresentaram maior capacidade de recuperação instantânea da deformação, quando da retirada do carregamento, alcançando valores próximos da deformação elástica inicial, enquanto que, para a mistura de referência, os percentuais de deformação recuperada instantaneamente, em relação à deformação elástica inicial, ficaram em 45%, para os corpos-de-prova selados, e 62%, para os não selados. Para o compósito CPB08, esses percentuais foram de 88% e 94% e, para o compósito CPB14, foram de 96% e 94%. Essa diferença de comportamento pode ser reflexo da menor rigidez dos compósitos em relação à matriz sem reforço.

A parcela de deformação permanente da fluência, o fluxo, foi consideravelmente superior à deformação recuperável, em todas as misturas, e apresentou um certo aumento para os compósitos com polpa submetidos a fluência e secagem simultâneas, em relação às demais misturas.

### **5.1.2.2 Fluência sob flexão**

Houve uma pequena diminuição da fluência sob tração na flexão do compósito com o aumento do teor de polpa, para as composições observadas. Porém, a fluência sob compressão na flexão aumentou consideravelmente com a inserção das fibras. Os compósitos com polpa tiveram fluência total, sob compressão na flexão, de cerca de duas vezes a fluência da mistura de referência, sem que a variação do teor de polpa, de 8% para 14%, tivesse grande influência.

Sob tração na flexão houve redução da fluência total com a inserção da polpa de bambu na mistura, sendo essa redução mais acentuada para maiores

teores de reforço fibroso (7% menor para CPB08 e 30% menor para CPB14, em relação à matriz), creditando-se a diminuição da fluência à ação das fibras na restrição de deformações de tração na flexão.

Houve aumento da fluência específica sob compressão na flexão com aumento do teor de polpa na mistura. Quanto à tração na flexão, a fluência específica resultou maior para a matriz sem reforço e, entre os compósitos com polpa, o CPB14 apresentou maior fluência específica que o CPB08.

Os resultados mostraram, em geral, uma tendência à recuperação imediata, na retirada da carga, de valores de deformação próximos da deformação elástica inicial. As proporções entre as parcelas de deformação, recuperáveis e permanente, foi semelhante para os teores de 8% e 14% de polpa, assim como para as faces tracionadas ou comprimidas dos corpos-de-prova. Mas, para a mistura de referência, as proporções entre os tipos de deformação foram diferentes, havendo predomínio da deformação permanente (fluxo), com 89% da deformação total, na zona tracionada. Sob compressão, o fluxo representou cerca de 51% da deformação total dessa mistura.

### **5.1.3 Fratura**

Nos corpos-de-prova sem entalhe, a inserção de 8% de polpa de bambu em relação à massa de cimento levou a aumento considerável da resistência à flexão (51% de aumento em relação à matriz). Para o teor de 14% de polpa, não houve benefício para essa propriedade mecânica. A dificuldade em garantir a homogeneidade do material e a maior porosidade podem responder pelo prejuízo ao desempenho mecânico. A capacidade de deformação e a tenacidade foram sempre crescentes com o aumento do teor de polpa de bambu.

Nos corpos-de-prova com entalhe, houve melhoria considerável no comportamento à flexão dos compósitos com polpa de bambu em relação à matriz sem reforço, mas, entre os teores de 8% e 14% de polpa, não houve variação significativa de resistência à flexão. Com relação ao deslocamento de abertura da boca da trinca, com aumento do teor de polpa no compósito, houve considerável incremento. A influência do teor de fibras sobre o fator de sensibilidade ao entalhe, FSE, foi significativo, observando-se que o compósito com 14% de polpa

teve bem menor prejuízo à capacidade de suportar cargas, devido à presença do entalhe, do que a matriz sem reforço. O aumento do teor de polpa, de 8% para 14%, proporcionou significativo abrandamento do efeito do entalhe.

Observou-se que a ruptura devido à propagação da trinca, nos compósitos, foi precedida por um considerável amolecimento (*softening*). As curvas de resistência (curvas-R) obtidas a partir das curvas *P-CMOD* permitiram identificar os valores de  $K_{IR}$  em pontos típicos da curva *P-CMOD* e o traçado das curvas que relacionam a evolução do fator de intensidade de tensões,  $K_{IR}$ , com o aumento da razão  $\alpha$ , entre o comprimento da trinca,  $a$ , e a altura do corpo-de-prova  $W$ . Na matriz sem reforço, o valor de  $K_{IR}$  foi crescente, com o aumento da carga, até a ruptura, que se deu logo depois de atingida a carga de pico, não tendo sido obtido um valor para esse parâmetro que se mantivesse constante.

Os compósitos com fibras tiveram comportamento diferente daquele da matriz, tendo sido determinados os valores de  $K_{IR}$  até o ponto do ramo descendente da curva *P-CMOD* correspondente a 40% da carga máxima. Os valores de  $K_{IR}$  aumentaram com o aumento da carga, alcançando um valor que manteve certa constância, durante o amolecimento. Nesse platô da curva, para os compósitos com fibras, CBP08 e CPB14, os valores de  $K_{IR}$  foram próximos, tendo sido de  $1,88 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  e  $1,84 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , respectivamente. A presença das fibras tornou que os corpos-de-prova de compósitos ainda apresentassem certa resistência, mesmo com grande aumento do comprimento da trinca.

Observando-se o perfil do caminho trilhado pela trinca em crescimento, percebeu-se que o mecanismo de fratura foi mais intensamente dominado pela presença do entalhe inicial na matriz sem reforço que nos compósitos. Nesses últimos, a trinca seguiu um caminho bastante tortuoso.

## 5.2

### Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista a geração de dados sobre os materiais compósitos reforçados com fibras vegetais, principalmente os que utilizam reforço de polpas celulósicas visando a substituição dos asbestos na produção de fibrocimento, alguns temas são propostos para novos estudos:

- Há a necessidade de obtenção de dados reais que caracterizem o comportamento mecânico das fibras. São características como resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência de aderência interfacial com a matriz cimentícia, que são difíceis de serem obtidas para as polpas celulósicas, devido às dimensões das micro-fibras, mas que são imprescindíveis para a predição do comportamento do compósito sob diversas solicitações, compondo formulações matemáticas adequadas a cada material. Maior quantidade de dados de ensaios dessas características trariam maior grau de confiança nas aplicações.
- Apesar dos esforços envidados pelos grupos de pesquisa na busca do conhecimento sobre o desempenho desses materiais ao longo do tempo, a questão da durabilidade dos compósitos com fibras vegetais ainda se constitui num ponto de incerteza, dada a variedade de fatores passíveis de causar a degradação desses materiais e à característica de dispersão e especificidade das condições das pesquisas sobre o tema. Torna-se, pois, necessária a formulação de um programa abrangente de pesquisas, que consiga ordenar as informações já obtidas, estabelecer metodologias de avaliação da durabilidade dos compósitos, tanto em ensaios acelerados, em laboratório, como por exposição a diversos ambientes naturais, com suas respectivas intempéries. Poder-se-ia buscar correlações entre as medidas observadas nessas duas formas de exposição, de modo a racionalizar o processo de avaliação do desempenho de componentes.
- Sente-se a necessidade de estudos que busquem elucidar a questão da compatibilidade entre as polpas celulósicas e o material cimentício, sob o ponto de vista de interações químicas e da aderência mecânica.
- Seriam oportunos trabalhos em que fossem desenvolvidas e analisadas as aplicações de revestimentos das fibras ou inserção de agentes de acoplamento entre fibra e matriz, de modo a minimizar os efeitos da higroscopicidade do reforço e melhorar o comportamento mecânico do compósito.
- A retração desses compósitos é um problema presente na indústria de fibrocimento que já utiliza as polpas vegetais. Complementarmente a esse estudo, que buscou caracterizar a retração e a tendência de fissuração



como propriedades do material, novos trabalhos poderiam estudar a retração dos componentes produzidos, em escala real e submetidos às condições de cura e armazenagem existentes na indústria, para o alcance de soluções adaptáveis aos processos produtivos já em curso. O aprofundamento da investigação sobre fissuração provocada por retração poderia ser alcançado pela utilização de microscopia eletrônica em equipamento que possibilite a observação de amostras sem necessidade de secagem prévia, o que provoca alteração da abertura das fissuras.

- Futuros estudos sobre fluência do material poderiam incluir a medida da evolução dos parâmetros de fratura sob carga constante, tentando simular a situação, na prática, de um componente com uma falha significativa, submetido a carregamento estável.
- Estudos poderiam ser desenvolvidos no sentido de descrever a ação dos constituintes das polpas celulósicas que provocam retardo e alterações das reações de hidratação do cimento.
- Levando-se em conta as aplicações do fibrocimento compondo coberturas e reservatórios para água, poder-se-ia realizar avaliação da permeabilidade desses materiais ao longo do tempo.
- Um estudo sobre comportamento à fratura desse materiais poderia incluir a ação de cargas cíclicas.