4 Resultados e discussão

4.1 Retração

4.1.1 Retração plástica

4.1.1.1 Caracterização da evolução do calor de hidratação

As curvas de temperatura de aquecimento $\theta(t)$ e do calor dissipado ($\alpha.\theta(t)$) para a mistura de referência (CPB00) e para o compósito com 8% de polpa de bambu (CPB08) são mostradas nas Figuras 46 e 47. A Figura 48 traz curvas de calor de hidratação, num tempo t, para mistura de referência e compósito.



Figura 46: Curvas de aquecimento por calor de hidratação e de dissipação do calor em ensaio do compósito CPB00



Figura 47: Curvas de aquecimento por calor de hidratação e de dissipação do calor em ensaio do compósito CPB08



Figura 48: Curvas de calor de hidratação no tempo t, para mistura de referência (CPB00) e compósito CPB08

Na curva de aquecimento do CPB08, o ponto de inflexão, associado ao tempo de início da pega, se deu para um período em torno de 8 horas após a água ter sido posta em contato com o cimento. O aquecimento máximo, correspondente a 14° C, foi atingido em 27,43 horas, podendo-se considerar como final da pega algum momento um pouco antes desse pico de aquecimento.

Comparando-se a evolução da variação de temperatura por aquecimento do compósito reforçado com 8% de polpa de bambu com aquela da mistura de

referência, cuja curva apresentou ponto de inflexão em torno de 2,5 horas, observa-se que a presença das fibras mais que triplicou o tempo de início da pega do cimento da mistura. O gráfico mostra que o ponto de aquecimento máximo, que correspondeu na pasta de cimento à cerca de 45° C, se deu num período em torno de 11 horas após o cimento ter sido posto em contato com a água. O aquecimento máximo obtido para a pasta de cimento nesse ensaio está condizente com o exemplo apresentado por Holt (2002), que consta da Figura 6, no item 2.2.1.1.1. Houve, para o compósito com 8% polpa de bambu, um aumento de 2,5 vezes em relação ao tempo de fim de pega.

Foi possível concluir que, por conter determinadas substâncias, tais como açúcares, a polpa vegetal alterou significativamente a evolução da hidratação da pasta de cimento, alterando, conseqüentemente, a evolução do ganho de resistência mecânica do compósito nas primeiras horas após a moldagem. Conseqüentemente, há necessidade de maiores períodos para retirada dos moldes, para elementos moldados com esses compósitos, de modo a evitar deformações precoces e mesmo a desagregação do material.

A Figura 48 mostrou que o compósito com fibras vegetais atingiu níveis de calor de hidratação bastante inferiores que a mistura de referência, sendo que, no ponto de máximo valor, a mistura CPB00 alcançou quase o triplo dessa medida para o CPB08. O retardo nas reações fez com que o calor fosse gerado mais lentamente e, assim, num dado instante t, não houve tão grande acúmulo de calor no compósito como na mistura sem fibras. Essa característica traz o benefício de diminuir as movimentações de origem térmica no material, passíveis de provocar fissuras.

4.1.1.2 Comportamento dos compósitos sob retração plástica

Foi caracterizado o desempenho sob retração no estado fresco dos compósitos com polpa refinada de bambu, para os teores de fibras previamente estabelecidos. A influência do teor de fibras de bambu presente no compósito sobre a retração plástica da matriz é mostrada na Figura 49, que apresenta os deslocamentos verticais, ao longo do tempo, em misturas plásticas com teores de fibras de 8%, 10%, 12% e 14%, como também na mistura de referência. Os

resultados das variações de altura foram tomados, a cada intervalo de medida, como a média aritmética das medidas de dois corpos-de-prova. O tempo referido pelo zero do eixo das abscissas corresponde ao instante do início das medidas dos deslocamentos, ou seja, transcorridos 30 minutos desde o momento em que o cimento foi adicionado à dispersão das fibras em água.



Figura 49: Influência do teor de polpa de bambu na retração plástica do compósito

Ficou evidente, dentro do intervalo de teores de fibras e para a configuração utilizada para esses testes, que houve considerável redução da retração plástica com o aumento do teor de polpa de bambu adicionado à matriz de pasta de cimento. Esse fato pode ser atribuído à alta capacidade de absorção de água apresentada pela inserção fibrosa, que chega a atingir cerca de 450% ao cabo das quatro primeiras horas de imersão em água (dos Anjos 2002).

Pode-se considerar que as fibras absorvem e retêm considerável parcela da água da mistura, possibilitando a redução da movimentação da umidade no interior do material e dificultando sua ascensão à superfície exposta do corpo-deprova, onde ocorre a evaporação da água exsudada. Observou-se uma rigidez das misturas com polpa, crescente com o teor de fibras inserido. Além disso, pode-se esperar que, nessas primeiras horas, estando a pasta de cimento ainda muito pouco rígida, as fibras vegetais, embora úmidas, possam apresentar módulo de elasticidade superior ao da matriz e certa aderência, que lhes permitiria exercer um papel de reforço mecânico capaz de causar certa restrição à retração plástica, contribuindo para a obtenção de valores inferiores aos apresentados pela matriz isoladamente. A restrição mostrou-se maior com o aumento do teor de fibras no compósito, tendo a retração plástica sofrido reduções de 28,5% e 84,2% em relação à mistura de referência, para os teores de polpa de 8% e 14%, respectivamente.

Considerando o retardo das reações de hidratação dos compósitos pela presença da polpa de bambu, aumentando consideravelmente o período em que esses materiais ainda se encontram em estado plástico, foi medida a variação percentual da altura também após 24 horas de iniciado o ensaio. Como está mostrado na Figura 50, as misturas continuaram a ter as mesmas tendências de aumento da retração plástica assim medida, sendo que, para a pasta de cimento, houve pequena redução dessa taxa de crescimento.



Figura 50: Variação média da altura dos corpos-de-prova no período entre 290 minutos e 24 horas do início do ensaio

4.1.2 Retração na secagem

4.1.2.1 Comportamento dos compósitos sob retração livre

A influência do teor de polpa de bambu sobre a retração na secagem dos compósitos pode ser vista na Figura 51, que mostra a evolução desse tipo de deformação durante um ano. O tempo foi contado a partir do instante em que os corpos-de-prova foram expostos ao ambiente de secagem da câmara climática, o que se deu 8 horas após a moldagem.



Figura 51: Retração livre para misturas com diferentes teores de polpa durante um ano

Pode-se observar um aumento da retração livre com o aumento do teor de polpa, dentro do intervalo considerado. A mistura de referência, composta por pasta de cimento sem reforço, teve, inicialmente, retração um pouco superior à do compósito com 8% de polpa, mas, com o passar do tempo, a retração do compósito com polpa de bambu superou a da matriz sem reforço em cerca de 16%. As misturas com 10 e 12% apresentaram retrações muito próximas. Em relação à mistura de referência, o compósito com 14% de polpa de bambu teve retração, após um ano, aproximadamente 40% superior. Foi notável que, mesmo depois de um ano de exposição a ambiente com temperatura e umidade relativa do ar constantes, os valores de retração medidos ainda revelavam certa tendência ao crescimento.

Segundo Tolêdo Filho et al. (2001), o aumento da retração pode se dever ao fato de que, sendo as fibras vegetais bastante porosas, podem criar caminhos no interior da matriz cimentícia, por onde a água pode transitar e, posteriormente, ser perdida para o ambiente, com incremento das deformações de retração. Com efeito, estudo de Rodrigues (2004), sobre compósitos de pasta de cimento reforçados com polpa e bambu, utilizando os mesmos materiais usados no presente trabalho, mostrou, através de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, que a adição de 8% dessa polpa celulósica à matriz e cimento acarretou na diminuição da densidade global (que inclui os vazios) em 18,6% e aumento da porosidade de 75,4%. A partir desse ensaio, foi possível concluir que a inclusão do reforço celulósico trouxe aumento da porosidade de forma concentrada na interface e no interior do reforço, sem modificar a estrutura porosa da matriz.

A Figura 52 detalha o início das curvas de evolução da retração livre dos compósitos nos sete primeiros dias, mostrando que, nas primeiras horas após a retirada dos moldes, não houve grande distinção entre os valores de deformação medidos para as misturas.

Como a retirada dos moldes, nesses corpos-de-prova, se deu após oito horas da moldagem, os compósitos ainda se encontravam em seu estágio de pega, devido ao retardo das reações de hidratação provocado pela presença da polpa. É possível que fatores, tais como o grande teor de umidade interna ainda presente nos materiais aliado à exposição precoce a ambiente de secagem sem significativas restrições à deformação, além da geometria esbelta dos corpos-de-prova, tenham contribuído para tornar as diferenças entre as retrações dos compósitos pouco perceptíveis pelo método de determinação das medidas adotado, nas primeiras horas.



Figura 52: Retração livre para misturas com diferentes teores de polpa nos sete primeiros dias

Após transcorridas cerca de 12 horas da retirada dos moldes, entretanto, os perfis do desenvolvimento da retração se modificam, para os compósitos com polpa, havendo uma inflexão da curva, mais acentuada para maiores teores de fibras presentes no material. Aos sete dias, já era clara a relação entre maiores teores de polpa e a mais marcante tendência à retração.

A mesma tendência de aumento ocorreu com relação à perda de massa dos corpos-de-prova, resultante da saída da água, para maiores teores de polpa. A perda de massa dessas misturas, medida durante um ano, é apresentada na Figura 53.



Figura 53: Perda de massa para misturas com diferentes teores de polpa

Os compósitos com 8% e 14% de polpa sofreram perdas de água, em um ano, superiores em cerca de 55% e 75%, respectivamente, em relação à mistura de referência. As curvas de perda de água com o tempo, para os compósitos com polpa de bambu, tiveram um ponto de máximo, geralmente em torno do décimo primeiro dia de idade, mostrando, posteriormente, pequenos ganhos de massa, apesar da manutenção das condições constantes de temperatura e umidade relativa no interior da câmara climática. Os corpos-de-prova de pasta pura, ao contrário, tiveram perdas de massa sempre crescentes. Para esse fenômeno, que pôde ser observado claramente para todas as misturas com polpa, não foi possível chegar a conclusões definitivas, havendo apenas suposição de que a presença das fibras vegetais, muito absorventes, pode estar provocando as trocas de umidade com o meio, afetando o equilíbrio higrométrico entre o material e o ambiente.

Na Figura 54, vê-se a relação entre perda de massa e retração. Pode-se perceber que, no início da secagem, há grande perda de água sem grande incremento da retração, pois é nessa fase que se dá a saída da água livre, mais facilmente retirada. Após ter havido perda de cerca de 15% da água, passa a haver uma maior taxa de retração por percentual de água perdida. Para os compósitos com polpa, esse ponto de inflexão da curva se dá para percentuais de perda de água muito superiores aos da matriz sem reforço. Pode-se observar que esse percentual para as curvas dos compósitos com polpa é cerca de três vezes maior que o percentual de água correspondente na matriz sem reforço. Decerto

que as fibras vegetais presentes nos compósitos favorecem a saída da água do material, levando a que o percentual de água que deixa o material, sem grandes esforços, seja superior.



Figura 54: Relação entre deformação por retração e perda de massa

A adição de cinza de casca de arroz, modificando a matriz, resultou em aumento da retração livre (Figura 53). Para a substituição do cimento por 15% e 30% de 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. Estudando a estrutura porosa das matrizes cimentícias com adição da mesma cinza de casca de arroz usada nesse trabalho, Rodrigues (2004) concluiu que houve formação de maior volume de poros com diâmetros inferiores a 0,05 μ m, que são classificados por Metha e Monteiro (1994) como micro-poros. Esse aumento da quantidade de poros de menor diâmetro na matriz, que são os que mais influenciam na retração, pode estar respondendo pela maior retração dos compósitos com matriz modificada em relação à do compósito com mesmo teor de polpa, porém sem adição de cinza.

Rodrigues (2004) observou, através de ensaios por intrusão de mercúrio em pastas de cimento sem reforço, que a adição desse tipo de cinza aumentou a porosidade e diminuiu a densidade do material. A densidade global, que considera a amostra com todos os seus poros, diminuiu 9,8 e 17,4%, respectivamente, com a substituição parcial do cimento por 15 e 30% dessa cinza. Já a porosidade total aumentou em 17,7 e 17%, para as mesmas substituições. A justificativa para o fato da porosidade ter apresentado, praticamente, a mesma taxa de variação, para

as substituições de 15 e 30% do cimento por cinza, enquanto que a variação da densidade global foi de praticamente a metade para a substituição de 15%, em relação à substituição de 30% do cimento por cinza, foi que a cinza empregada é composta por partículas com alto teor de carbono, possuindo superfície rica em microporosidade, como pôde ser constatado pela determinação da área específica da cinza. Apenas parte desses poros compõe a rede porosa acessível ao mercúrio, durante a intrusão.

Esse estudo mostrou, ainda, que, na pasta de cimento sem adição, os poros menores que 0,05 µm representava 21% da porosidade. Com a adição de 15% de cinza, esses poros menores passaram a corresponder a 40% da porosidade e, com substituição de 30%, houve maior participação de poros menores, de 53%.

A presença da cinza de casca de arroz, em maior teor, levou ao aumento da perda de massa, pela saída da água do material, como pode ser visto na Figura 56.



Figura 55: Retração em compósitos com matriz modificada por cinza de casca de arroz



Figura 56: Influência da presença da cinza de casca de arroz sobre a perda de massa dos compósitos

A influência do tipo de polpa sobre a capacidade de sofrer retração do compósito é mostrada na Figura 57. Para um mesmo teor de polpa (8%), a retração no compósito com polpa de sisal superou a do compósito com polpa de bambu em 16,7%, após um ano. A Figura 58 mostra as perdas de massa dessas duas misturas, tendo-se percebido uma maior tendência do compósito com polpa de sisal em recuperar a perda de massa inicial.



Figura 57: Retração nos compósitos com polpa de bambu e de sisal

159



Figura 58: Influência do tipo de polpa vegetal sobre a perda de massa dos compósitos

Para a mistura CPB08, foram testados dois períodos de tempo antes da retirada dos moldes. Entre os corpos-de-prova desmoldados após 8 horas e 24 horas, não foi percebida alteração significativa no comportamento sob retração (Figura 59).



Figura 59: Retração nos compósitos com 8% de polpa de bambu com períodos diferentes de permanência no molde

Foi possível concluir que, dentro do intervalo estudado de teores de reforço com polpa de bambu, os compósitos cimentícios tiveram a retração livre aumentada com o aumento do teor de polpa. Para os mesmos teores de polpa, os resultados dos ensaios já mostrados em 4.1.1.2, sobre a retração do compósito no estado plástico, indicaram que houve redução da retração com o aumento do teor de polpa de bambu. Os mecanismos pelos quais as fibras atuam dentro do compósito são diferentes nos dois tipos de retração.

Com a mistura no estado plástico, a fibra vegetal, sendo porosa e absorvente, contribui para reduzir a retração pela maior capacidade de reter a água do compósito. Com o material já endurecido e submetido a um ambiente de secagem, havendo a presença de determinados teores dessas fibras porosas, há possibilidade de surgimento de rotas para a saída da água, através das fibras.

Para o teor de polpa mínimo investigado, de 8% em massa em relação à massa de aglomerante, a retração do compósito pouco se diferenciou da retração da pasta pura, até cerca de 140 dias. Após esse período, a retração no compósito com polpa continuou a crescer, enquanto que na matriz sem reforço esse crescimento foi bem menos acentuado. A substituição de parte do cimento por cinza de casca de arroz trouxe aumento da retração, que cresce com o aumento do teor de cinza, pelo surgimento de maior quantidade de poros menores que 0,05 µm, que influenciam na retração. O compósito reforçado com polpa de sisal apresentou maior retração livre que o compósito com polpa de bambu, para o mesmo teor de polpa de 8%.

4.1.2.1.1 Modelos para retração livre

Na tentativa de prever o comportamento dos compósitos frente à retração por secagem, dois modelos teóricos encontrados na literatura foram estudados. O primeiro deles, proposto por Zhang e Li (2001), é um modelo analítico para predição do desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras, baseado na teoria de cisalhamento desenvolvida por Cox (Cox 1952 *apud* Zhang e Li 2001), considerando a distribuição aleatória das fibras. Esse modelo incorpora parâmetros dos materiais que compõem a matriz e o reforço, tais como módulos de elasticidade das fibras e da matriz e geometria das fibras, além do comportamento sob retração da matriz cimentícia.

O segundo modelo empregado foi o modelo B3 (Bazant e Baweja 1995), assim chamado por ser a terceira atualização do modelo BP-KX (Bazant et al. 1991), desenvolvido na Northwestern University, para estruturas de concreto. A princípio, esse modelo está restrito a composições que não sejam desenvolvidas para concretos especiais, tais como os que contêm adições como pozolanas, micro-sílica e fibras. Contudo, se os parâmetros do modelo não são previstos a partir da composição e resistência do concreto, mas se são calibrados por dados experimentais, o modelo pode ser aplicado a esses concretos especiais.

Apesar dessas especificidades e de ter o compósito cimentício com polpa vegetal uma composição, métodos de produção e aplicação bastante diversos dos concretos para os quais esse modelo foi delineado, o mesmo foi empregado nesse trabalho, buscando utilizar os dados experimentais já obtidos. Esse modelo comporta uma forma de calibração da formulação, que permite lançar mão dessas informações obtidas empiricamente, sem considerar a presença das fibras vegetais, já que seus efeitos são muito complexos, dificultando chegar-se a uma teoria matemática que reflita suas influências na retração do material. Segundo Bažant e Baweja (1995), apesar das formulações matemáticas do modelo B3, baseadas na composição e resistência do concreto, serem válidas somente para concretos normais, o modelo, contudo, permanece válido para concretos especiais, se seus parâmetros são calibrados por testes, podendo os resultados de experimentos de curta duração ser usados com esse propósito.

4.1.2.1.1.1 Modelo de Zhang e Li para retração em compósitos cimentícios com fibras

Esse modelo supõe que, quando a matriz se retrai, uma tensão de cisalhamento surge, ao longo da interface fibra-matriz. A fibra fica então submetida à compressão e a matriz sofre tração. Considera-se que a retração da matriz, em qualquer direção, pode ser parcialmente restringida por fibras alinhadas, cujo comprimento efetivo é paralelo à direção da deformação por retração, baseando-se na aplicação de fibras de aço em matriz cimentícia, com módulo de elasticidade das fibras superior ao da matriz. Assim, a restrição promovida pelas fibras orientadas aleatoriamente, com comprimento l_f , raio r_f e fração volumétrica V_{fs} é equivalente à restrição promovida pelas fibras de um compósito idealizado, com fibras alinhadas, com comprimento efetivo L_{fe} e espaçamento entre fibras igual a 2R, conforme Figuras 60 e 61.



Figura 60: Compósito com fibras orientadas aleatoriamente e compósito equivalente



Figura 61: Corte e seção transversal do cilindro representativo da matriz com fibra

Nesse modelo, é determinado o comprimento médio da fibra projetado na direção da retração, introduzindo-se a função densidade de probabilidade $f(\mu)$, definida como a relação entre a quantidade de fibras com ângulo de orientação μ e a quantidade de fibras em um dado volume. A quantidade de fibras com orientação entre μ e μ + $d\mu$, por unidade de volume do compósito é dada pela eq. (45):

$$dV_f = V_f f(\mu) d\mu \tag{45}$$

onde $f(\mu)$ é determinada pelo número de dimensões da distribuição das fibras, sendo igual a $1/\pi e sen(\mu)$, respectivamente, nas distribuições em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D). O número de fibras entre os ângulos μ e μ +d μ , por unidade de volume do compósito, é dado pela eq. (46).

$$dN = \frac{dV_f}{A_f l_f} = \frac{V_f}{A_f l_f} \cdot f(\mu) d\mu$$
(46)

sendo A_f a área da seção transversal da fibra. Assim, o comprimento total de fibras projetadas na direção paralela à direção da retração entre μ e μ + $d\mu$, por unidade de volume, é dado pela eq. (47).

$$dL_{\iota\mu} = l_f \cdot dN \cdot \cos\mu = \frac{V_f}{A_f} \cdot \cos\mu \cdot f(\mu) \cdot d(\mu)$$
(47)

O comprimento efetivo de fibra, definido como o comprimento médio da fibra projetado na direção da retração, pode ser obtido da eq. (48).

$$L_{fe} = \frac{\int_{\mu} dL_{t\mu}}{\int_{\mu} dN} = l_{f} \int \cos \mu f(\mu) d\mu = k l_{f}$$
(48)

onde k é o fator de influência dimensional, ou fator de orientação das fibras.

Os limites de integração de μ dependem da orientação da distribuição das fibras no compósito. Na distribuição *ID*, $\mu=0$, então *k* é igual a 1 e L_{ef} é igual a l_f . Substituindo-se f(μ) por 1/ π , ou *sen*(μ), e μ variando de - $\pi/2$ a $\pi/2$, ou μ variando de 0 a $\pi/2$, respectivamente, para os casos de distribuição em 2D ou 3D, pode ser obtido o comprimento efetivo da fibra pela eq. (49), para 2D, ou pela eq. (50), para 3D. É assumido que a fibra tem seção circular.

$$L_{fe} = \frac{2}{\pi} I_f \tag{49}$$

$$L_{fe} = \frac{1}{\pi} I_f \tag{50}$$

Para determinação do espaçamento entre as fibras, igual a 2R, toma-se o elemento cilíndrico representativo da Figura 61, com raio R e comprimento $L_{fe}+2R$. Assumindo-se que o volume total do compósito é igual à soma dos volumes dos cilindros individuais, a relação entre o volume de cada cilindro individual, V_{f0} , e o número de fibras para uma unidade de volume do compósito, N_0 , é dada pela eq. (51). O número de fibras por unidade de volume do compósito

pode ser expresso pela relação entre o volume de fibras por unidade de volume do compósito (fração volumétrica) e o volume de cada fibra, conforme a eq. (52). O volume do cilindro representativo é dado pela eq. (53). Substituindo-se as eqs. (52) e (53) em (51), e com a eq. (48), é obtida a relação entre o espaçamento entre as fibras, fração volumétrica, raio e fator de orientação das fibras, dada pela eq. (54).

$$N_0 V_{f0} = 1 (51)$$

$$N_0 = \frac{V_f}{\pi r_f^2 l_f} \tag{52}$$

$$V_{f0} = \pi . R^2 . (L_{fe} + 2R)$$
(53)

$$R^{2}\left(1+\frac{2R}{kl_{f}}\right) = \frac{r_{f}^{2}}{kV_{f}}$$
(54)

Tomando-se o cilindro representativo da Figura 61, vê-se que a retração da matriz adjacente à fibra é influenciada pela fibra, enquanto que as porções, à esquerda e à direita, cada uma delas com comprimento R, são consideradas livres da influência da fibra. Supõe-se que a matriz fica submetida à tensão média, σ_{ma} , dentro da zona de restrição, devido à ação da fibra durante a retração da matriz. A tensão de tração, σ_{ma} , é função da posição, x (Figura 62).



Figura 62: Esquema usado na análise de transferência de tensões da fibra para a matriz

A expressão da retração livre do compósito reforçado com fibras é dada pela eq. (55).

$$\varepsilon_t = \varepsilon_m - \frac{1}{L_{fe} + 2R} \int_0^{L_{fe}} \frac{\sigma_{ma}}{E_m} dx$$
(55)

onde, $\varepsilon_t \in \varepsilon_m$ são as deformações por retração do compósito e da matriz, respectivamente, e E_m é o módulo de elasticidade da matriz.

Para determinar o campo de tensões desenvolvido no cilindro representativo, algumas simplificações são adotadas:

- Matriz e fibras são materiais elásticos;
- A interface fibra-matriz é infinitamente delgada;
- Não há escorregamento entre fibra e matriz, na interface;
- A deformação na matriz a uma distância radial *R* da fibra, na direção do eixo da fibra, é igual à deformação por retração livre da matriz, *ε_m*.

Quando a matriz é submetida à deformação por retração, ε_m , o equilíbrio entre a tensão axial na fibra, σ_f , e a tensão de cisalhamento, τ_0 , na interface, é dado pela eq. (56). Diferenciando, novamente, em relação a *x*, tem-se a eq. (57).

$$\frac{\partial \sigma_f}{\partial x} + \frac{2}{r_f} \tau_0 = 0 \tag{56}$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_f}{\partial x^2} + \frac{2}{r_f} \frac{\partial \tau_0}{\partial x} = 0$$
(57)

Da teoria de cisalhamento de COX (Cox 1952 apud Zhang e Li 2001), a tensão de cisalhamento interfacial pode ser expressa conforme a eq. (58), onde v e u são campos de deslocamento em r=R e $r=r_f$, respectivamente. Diferenciando-se essa equação em relação a x, para encontrar as deformações, é obtida a eq. (59).

$$\tau_0 = \frac{E_m}{2(1+V_m)} \frac{v-u}{r_f \cdot \log\left(\frac{R}{r_f}\right)}$$
(58)

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial x} = \frac{E_m}{2(1+V_m)r_f \cdot \log\left(\frac{R}{r_f}\right)} \left(\varepsilon_m - \frac{\sigma_f}{E_f}\right)$$
(59)

Substituindo-se a eq. (59) em (57), é obtida a eq. (60), que governa a distribuição de tensões axiais na fibra, σ_f . Resolvendo-se esta equação diferencial, com as condições de contorno ($x=L_{ef}$ e x=0, $\sigma_f=0$), chega-se às eqs. (61) e (62), para a distribuição de tensões axiais na fibra.

$$\frac{\partial^2 \sigma_f}{\partial x^2} + \frac{E_m}{r_f^2 (1 + V_m)} \frac{1}{\log\left(\frac{R}{r_f}\right)} \left(\varepsilon_m - \frac{\sigma_f}{E_f} \right) = 0$$
(60)

$$\sigma_{f} = E_{f} \cdot \varepsilon_{m} \left[1 - \frac{\cosh \beta (L_{fe} - 2x)}{\cosh \beta \frac{L_{fe}}{2r_{f}}} \right]$$
(61)

$$\beta = \sqrt{\frac{E_m}{\left(1 + V_m\right)E_m \log\left(\frac{R}{r_f}\right)}}$$
(62)

As eqs. (59) e (61) indicam que a retração da matriz, ε_m , influencia na tensão de cisalhamento interfacial e na tensão sobre a fibra. Como o somatório das forças na zona livre de restrição é zero, o equilíbrio da distribuição de cargas externas em qualquer valor de *x* leva à eq. (63), onde σ_m é a tensão axial na matriz, em função de r. Definindo-se a tensão média, σ_{ma} , pela eq. (64), pode-se escrever a eq. (65), onde A_f e A_m são as áreas das seções transversais da fibra e da matriz, respectivamente.

$$\sigma_f A_f + 2\pi \int_{r_f}^{R} \sigma_m r dr = 0 \tag{63}$$

$$\sigma_{ma} = \frac{2\pi \int_{r_f}^{R} \sigma_m r dr}{A_m} \tag{64}$$

$$\sigma_f A_f + \sigma_{ma} A_m = 0 \tag{65}$$

Substituindo-se eq. (61) na eq. (65), a tensão média na matriz pode ser dada pela eq. (66), como uma função de x. O sinal negativo na eq. (62) indica que a tensão na matriz é oposta à tensão na fibra. Esse modelo considera que a retração de volume da matriz cimentícia impõe uma tensão de compressão na fibra de reforço e uma tensão de tração na própria matriz. Substituindo-se a eq. (66) na eq. (55), a retração do compósito é expressa pela eq. (67), onde η , γ , γ_1 , γ_2 e β são dados pelas eqs. (68), (69), (70), (71) e (72).

$$\sigma_{ma} = -\frac{A_f}{A_m} E_f \varepsilon_m \left[1 - \frac{\cosh \beta (L_{fe} - 2x)}{\cosh \beta \frac{L_{fe}}{2r_f}} \right]$$
(66)

$$\varepsilon_{t} = \varepsilon_{m} \left[1 - \eta \frac{kV_{f}}{1 - kV_{f} \left(1 + \frac{1}{\gamma_{1}} \right)} \left(1 - \frac{1}{\beta \gamma} \tanh \beta \gamma \right) \right]$$
(67)

$$\eta = \frac{E_f}{E_m} \tag{68}$$

$$\gamma = \frac{kl_f}{2r_f} \tag{69}$$

$$\gamma_1 = \frac{kl_f}{2R} \tag{70}$$

$$\gamma_2 = \sqrt{\frac{1}{kV_f \left(1 + \frac{1}{\gamma_1}\right)}} \tag{71}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{(1+V_m)\eta\log\gamma_2}} \tag{72}$$

Para a aplicação desse modelo aos compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu, foram feitas as seguintes considerações:

- características das fibras da polpa de bambu:
 - o comprimento de 1,47 mm e diâmetro de 20 μm (item 3.1)
 - módulo de elasticidade de 30 GPa, tomado como um valor intermediário entre os valores de módulo de elasticidade para polpas celulósicas, publicados na literatura: 28,8 GPa (CEPED 1982) para polpa de bambu ; 30 GPa (Andonian et al. 1979) para polpa Kraft de *pinus radiata*; 40 GPa (Fordos e Tram 1986) para polpa Kraft de *pinus radiata*; 10 a 30 GPa (Nelson et al 2002) para polpa Kraft de *pinus radiata*;
 - Frações volumétricas das fibras de 7,43% e 12,32%, respectivamente, para os compósitos CPB08 e CPB14, conforme determinado em 3.2.1.
- características da matriz de pasta de cimento:
 - retração livre obtida experimentalmente, apresentada na Figura 49 do item 4.1.2.1;
 - módulo de elasticidade de 29,5 GPa, obtido experimentalmente, conforme descrito em 3.4.1.1.
- Distribuição aleatória e em 3D para as fibras dentro do compósito.

A Figura 63 apresenta as curvas de retração livre ao longo do tempo, obtidas através do modelo de Zhang e Li (2001) para os compósitos com 8% e 14% de polpa de bambu em relação à massa de cimento, juntamente com as curvas obtidas experimentalmente para esses compósitos e para a matriz sem reforço. Pode-se perceber que o modelo teórico, aplicado aos compósitos,

subestima a deformação por retração, principalmente para maiores teores de polpa vegetal. As deformações de retração previstas para os compósitos ficaram muito próximas dos valores de deformação da própria matriz.



Figura 63: Comparação entre curvas de retração obtidas experimentalmente e obtidas pelo modelo de Zhan e Li (2001)

A eq. (63) é uma expressão geral da retração livre de compósitos reforçados com fibras, que reflete determinadas características das fibras, como o comprimento, diâmetro e módulo de elasticidade, bem como determinadas propriedades da matriz, como a retração livre e o módulo de elasticidade. Leva em conta, ainda, características de distribuição das fibras na matriz. Tratando-se de reforço com fibras vegetais, as características de porosidade e capacidade de absorção de água mostraram-se, nos estudos experimentais, significativamente relevantes e não são consideradas nesse modelo. Para fibras sintéticas, como as fibras de aço usadas nos experimentos do estudo de Zhang e Li (2001), essas características são irrelevantes.

O modelo pressupõe que a fibra usada seja rígida o suficiente para promover a restrição da retração da matriz, fazendo surgir uma tensão de tração na matriz adjacente à fibra, como resultado dessa restrição. Em fibras vegetais, é comum que o módulo de elasticidade não ultrapasse o módulo elástico da matriz cimentícia. O módulo de elasticidade das fibras da polpa de bambu, tomado como igual a 30 GPa, é praticamente igual ao da matriz, tomado como igual a 29,5 GPa, não havendo, portanto, restrição considerável à deformação da matriz. Dessas peculiaridades dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais advêm as possíveis justificativas para que o modelo não tenha refletido com eficácia o comportamento sob retração livre desses materiais.

4.1.2.1.1.2 Modelo B3 para retração

Para obter uma formulação ajustada às condições específicas dos compósitos estudados, inicialmente foram obtidos os valores das deformações de retração a partir da eq. (73) do modelo B3, para a deformação média na seção transversal, onde t é a idade do compósito, em dias, e t₀ é a idade na qual o compósito foi exposto à secagem, em dias. O parâmetro de dependência do tempo, S(t), é dado pela eq. (74). O parâmetro τ_{sh} , chamado de meio-tempo de retração, depende espessura efetiva, da forma da seção transversal e da resistência à compressão da estrutura de concreto. O parâmetro de dependência da umidade relativa ambiental, k_h , é tomado como igual a $1-h^3$, para $h \leq 0.98$; -0,2 para h=1 (imersão em água) e tomado por interpolação linear, para $0.98 \leq h \leq 1$.

$$\varepsilon_{sh}(t,t_0) = -\varepsilon_{sh\infty}.k_h.S(t)$$
(73)

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}}$$
(74)

A deformação de retração final, $\varepsilon_{sh\infty}$, foi prevista, por aproximação, a partir da composição da mistura e resistência à compressão do material aos 28 dias, conforme a eq. (75) (Bazant et al 1992), onde α_1 foi tomado, como prevê o modelo, como igual a 0,85 (foi usado cimento Portland composto com filler, CP II F 32), α_2 foi tomado como igual a 1,4 (corpos-de-prova selados até a exposição), c é o consumo de cimento (em $lb.ft^{-3}$), w/c é a relação água/cimento, f_c é a resistência aos 28 dias, que deve ser dada em *psi*, a/c é a relação agregado/cimento em massa e $\rho/c=1+(w/c)+(a/c)$.

$$\varepsilon_{sh\infty} = \alpha_1 \alpha_2 \left\{ 1, 12 \left(\frac{W}{c} \right)^{1,5} . c^{1,1} . \left(f_c^{'} \right)^{-0,2} \left[1 - \left(\frac{a}{c} \right) \left(\frac{\rho_c}{c} \right) \right] + 0, 16 \right\} \quad (\text{em } 10^{-3})$$
(75)

Para ajuste dos dados dos testes de retração dos compósitos, foi utilizado um método de estimativa melhorada, previsto em Bazant e Baweja (1995). O problema existente nesse tipo de abordagem é que o valor do parâmetro τ_{sh} é envolvido de forma não-linear na expressão da retração, e de uma maneira tal que valores muito diferentes de τ_{sh} podem produzir dados igualmente bem ajustados. Esse problema é contornado, determinando-se o valor de τ_{sh} em função das perdas de água finais no ambiente de secagem a uma dada umidade relativa h, $\Delta w_{\infty}(h)$. Tomam-se as perdas de água dos corpos-de-prova, durante o ensaio, bem como a estimativa da perda de água final em ambiente de umidade relativa igual a zero, $\Delta w_{\infty}(\theta)$ (que é obtida secando-se os corpos-de-prova em estufa a 105° C). Assim, calcula-se $\Delta w_{\infty}(h)$ através da eq. (76). Calculam-se os valores auxiliares ψ_j , pela eq. (77), onde Δw_j são os valores das perdas de água medidas nos tempos t_j .

$$\Delta \omega_{\infty}(h) = 0.75 \left[1 - \left(\frac{h}{0.98} \right)^3 \right] \Delta \omega_{\infty}(0), \quad \text{para } 0.25 \le h \le 0.96$$

$$(76)$$

$$\psi_{j} = \left[\tanh^{-1} \left(\frac{\Delta \omega_{j}}{\Delta \omega_{\infty}(h)} \right) \right]^{2}, \qquad (j = 1, 2, ..., m)$$
(77)

$$\widetilde{\tau}_{sh} = 1,25 \left(\frac{\Sigma_j (t_j - t_0) \psi_j}{\Sigma_j \psi_j^2} \right)$$
(78)

Designando por $\varepsilon'_{shi} = \varepsilon'_{sh}(t_i, t_0)$ os valores de retração medidos nos ensaios nos tempos t_i , e por $\varepsilon''_{sh} = \varepsilon''_{sh}(t, t_0)$ os valores de retração calculados pelo modelo B3, substituindo τ_{sh} por τ_{sh} , calculam-se os valores de $\varepsilon''_{shi} = \varepsilon''_{sh}(t_i, t_0)$ para predição da retração para os tempos t, pelo modelo B3 (eq. (73)). A seguir, calcula-se o parâmetro de escala, p_6 , pela eq. (79). Os valores adaptados da predição da retração, para qualquer tempo t, $\varepsilon^*_{sh}(t, t_0)$, são dados pela eq. (80).

$$p_6 = \frac{\sum_i \mathcal{E}_{shi}^{'} \cdot \mathcal{E}_{shi}^{''}}{\sum_i \mathcal{E}_{shi}^{''2}}$$
(79)

$$\varepsilon_{sh}^{*}(t,t_{0}) = p_{6}\varepsilon_{sh}^{"}(t,t_{0})$$
(80)

As Figuras 64 e 65 mostram a aplicação do modelo B3, em sua forma adaptada para concretos especiais, aos compósitos CPB08 e CPB14, respectivamente. Pode-se notar que houve boa concordância da curva da predição adaptada, em relação aos dados obtidos experimentalmente, exceto pelo fato de que o modelo atualizado não prevê aumento da retração em períodos de secagem mais extensos que cerca de 150 ou 200 dias. Tanto o modelo B3 como sua forma adaptada têm como base uma formulação matemática que prevê um valor assintótico para a retração, após o período de maior taxa de crescimento da deformação. Foi observado nos ensaios que, nos compósitos cimentícios com polpa de bambu, a retração pode continuar a progredir, ainda que com menor taxa, mesmo após períodos longos de secagem, como cerca de um ano.



Figura 64: Predição adaptada da retração usando dados de ensaios de retração e perda de água para CPB08



Figura 65: Predição adaptada da retração usando dados de ensaios de retração e perda de água para CPB14

4.1.2.2 Comportamento dos compósitos sob retração restringida – ensaio do anel

Os anéis restringidos feitos com a mistura de referência (CPB00) apresentaram a primeira fissura em cerca de 3 a 4 horas após remoção dos moldes. Formaram-se duas fissuras em cada anel, sendo que a segunda fissura, que surgia em torno de 24 horas após a exposição, apresentou-se sempre bem menor que a primeira, com uma média de 12% da abertura da primeira. As medidas de deformação variaram de acordo com a posição do extensômetro (*strain-gage*) em relação às fissuras, já que na região em torno da fissura ocorria maior relaxamento das tensões. As Figuras 66, 67 e 68 apresentam os gráficos da evolução das deformações e das aberturas das fissuras nos três anéis restringidos da mistura de referência (CPB00).



Figura 66: Evolução das deformações e das aberturas das fissuras do primeiro anel restringido com a mistura de referência (CPB00-1)

Foi percebido que, nas primeiras horas de exposição, ocorreram deformações de tração, causadas pelo impedimento do anel metálico à retração do material. Por suas características de fragilidade, a pasta de cimento rompe sob as tensões de tração. A primeira e maior fissura, nesse primeiro corpo-de-prova, surgiu mais próxima do extensômetro 3 e a segunda e menor fissura, próxima do extensômetro 1. Isso levou a que esses dois extensômetros registrassem menores deformações de compressão, a partir do surgimento dessas falhas.



Figura 67: Evolução das deformações e das aberturas das fissuras do segundo anel restringido com a mistura de referência (CPB00-2)

Nesse segundo corpo-de-prova da mistura de referência, a fissura maior ocorreu próxima ao extensômetro de número 2 (Figura 69), que passou a sofrer menor deformação, por maior alívio das tensões de tração nessa região.



Figura 68: Evolução das deformações e das aberturas das fissuras do terceiro anel restringido com a mistura de referência (CPB00-3)



Figura 69: Perfil e posição da primeira fissura do anel CPB00-2

No terceiro anel restringido de CPB00, a primeira fissura ocorreu exatamente no local onde havia sido fixado o extensômetro de número 3, que, a partir desse momento, passou a acusar valores incoerentes de deformação de tração que, na verdade, correspondiam ao estiramento do extensômetro provocado pela abertura da fissura. Assim, os registros desse extensômetro passaram a ser desconsiderados e o mesmo foi retirado para que não causasse impedimento ao crescimento da fissura. Por sua maior distância em relação à fissura maior, o extensômetro de número 2 acusou deformações de retração superiores a todos os

outros, desse e dos demais corpos-de-prova dessa mistura. Na Figura 70, pode ser visto o perfil da fissura maior nesse corpo-de-prova, quando do seu surgimento e depois de completado o ensaio, já tendo sido retirado o extensômetro de número 3.



Figura 70: Perfil da primeira fissura do anel CPB00-3. Surgimento da fissura (a). Abertura da fissura na conclusão do ensaio (b)

As primeiras fissuras surgiam atravessando toda a altura dos respectivos anéis e permaneciam com abertura bem superior à segunda, apresentando uma taxa de crescimento acentuada até um período em torno do terceiro dia de exposição ao ambiente de secagem da câmara climática. A posição da segunda fissura tendeu a uma proximidade do ponto diametralmente oposto à localização da primeira fissura. Após cerca de 25 dias, as aberturas dessas fissuras se estabilizaram. As aberturas das maiores fissuras de cada corpo-de-prova variaram de 0,90 a 1,50 mm. Na Figura 71 são apresentados os gráficos de evolução do crescimento das aberturas das fissuras nos três anéis restringidos da mistura de referência. O anel de número 3 teve a menor fissura principal e a maior fissura secundária dos três corpos-de-prova, sugerindo um equilíbrio para o somatório das aberturas de fissuras em cada anel, que variou de 1,30 a 1,75 mm, correspondendo a um intervalo entre 0,5% a 0,7% do perímetro externo do corpo-de-prova.



Figura 71: Evolução das aberturas das fissuras dos três anéis restringidos de CPB00

As deformações também foram medidas em anéis livres da restrição do anel metálico interno. A Figura 72 traz as medidas dessas deformações e das aberturas das fissuras para os corpos-de-prova de anel livre, moldados com a mistura de referência. Na ausência do anel metálico interno, todo o corpo-de-prova se deforma, estando sua deformação final relacionada à diminuição dos raios interno e externo, diferentemente do anel restringido, onde a diminuição do raio interno é impedida. Mesmo sem haver a restrição do anel interno, dois, dos três corpos-de-prova do tipo "anel livre", apresentaram uma fissura, possivelmente provocada pela retração diferenciada, devido à selagem da face interna. A Figura 73 mostra a fissura surgida no anel livre de número 1 da mistura de referência.



Figura 72: Evolução das deformações e das aberturas de fissuras em anéis livres moldados com a mistura de referência (CPB00)



Figura 73: Fissura no anel livre número 1 da mistura de referência

Ao contrário dos corpos-de-prova de pasta pura, os que tiveram inserção de polpa de bambu, mesmo estando restringidos, não apresentaram fissuras que pudessem ser detectadas por fissurômetro com precisão de 0,1 mm. As Figuras 74, 75 e 76 apresentam as deformações medidas em três corpos-de-prova tipo "anel restringido", para o compósito com 8% de polpa. No terceiro desses anéis, houve problemas com o extensômetro de número 3, tendo sido suas medidas desconsideradas.



Figura 74: Evolução das deformações do primeiro anel restringido com CPB08



Figura 75: Evolução das deformações do segundo anel restringido com CPB08



Figura 76: Evolução das deformações do terceiro anel restringido com CPB08

As deformações nos anéis restringidos de CPB08 foram ligeiramente menores que as registradas para a mistura CPB00, já que não houve formação de fissuras perceptíveis nos primeiros. Pode-se supor que a presença das fibras da polpa de bambu respondeu pelo impedimento às fissuras de maior monta, visto que os corpos-de-prova de CPB08 estiveram submetidos a estados de deformações de mesma ordem de grandeza que os da mistura de referência. A evolução das deformações nos corpos-de-prova de CBB08, em forma de anéis livres, pode ser vista na Figura 77.



Figura 77: Deformações em anéis livres de compósito com 8% de polpa de bambu (CPB08)

Nos anéis livres, a princípio também foram registradas deformações de tração. Pó terem sido suas faces internas seladas, para tornarem suas condições de exposição semelhantes às dos anéis restringidos, criaram-se gradientes de umidade entre as faces internas e externas, fazendo surgir tensões de tração nas faces externas pelo impedimento à retração. As Figuras 78, 79 e 80 trazem as deformações medidas em três corpos-de-prova tipo "anel restringido" para o compósito com 14% de polpa.



Figura 78: Evolução das deformações do primeiro anel restringido com CPB14



Figura 79: Evolução das deformações do segundo anel restringido com CPB14



Figura 80: Evolução das deformações do terceiro anel restringido com CPB14

Os compósitos com 14% de polpa, sob a forma de anéis livres, sofreram deformações conforme mostrado na Figura 81.



Figura 81: Deformações em anéis livres de compósito com 14% de polpa de bambu (CPB14)

Do comportamento descrito para as misturas estudadas sob retração restringida, procede a ilação de que os compósitos cimentícios com polpa de bambu, com 8% e 14% em massa de fibras em relação à massa do cimento, mostraram-se eficientes no combate à fissuração por retração restringida, mesmo estando sujeitos a deformações da mesma ordem de grandeza da matriz sem reforço, que, sob esse estado, veio a sofrer fissuras rapidamente.

Admite-se que, para um certo grau de impedimento à retração, promovido pela presença do anel metálico interno, surgem tensões de tração tangencial no compósito, que são maiores junto à face interna, em contato com o anel metálico. Numa simplificação, supondo comportamento inicial elástico, as tensões têm valores diferentes para as misturas, pois variam os módulos de elasticidade à tração com a presença das fibras vegetais. Sob a ação dessas tensões, a mistura de referência (CPB00) rompeu, com o surgimento de duas fissuras perceptíveis visualmente, havendo a divisão do elemento em dois segmentos. Houve relaxação das tensões de tração nesses segmentos e surgiram deformações de contração, provocadas principalmente pela saída da água da mistura exposta a ambiente de secagem.

Nos corpos-de-prova de compósito (CPB08 e CPB14), além de menores módulos de elasticidade, é admitido que a atuação das fibras, no sentido de reter microfissuras em processo inicial, pode ter contribuído para a manutenção da integridade do elemento, ao menos em escala macroscópica. Nessas condições, esses materiais sofreram e suportaram as tensões de tração sem danos aparentes, apresentando deformação sob tração. Essas deformações tiveram efeito de alívio

das tensões causadas pelo impedimento à retração e, a seguir, os compósitos apresentam deformações de retração por secagem, que se deu, também, na direção radial dos corpos-de-prova.

4.1.2.3 Deformações sob alternância de molhamento e secagem – reversibilidade da retração

A exposição dos corpos-de-prova a ciclos alternados de secagem e molhamento mostrou constituir-se num método peculiar de envelhecimento acelerado do material. Ao cabo de alguns ciclos, eram perceptíveis os danos provocados, sob a forma de empenamentos e fissuras em algumas placas. Esses defeitos, eventualmente, influenciaram nos dados coletados e tiveram suas ocorrências registradas. Calcularam-se médias seletivas, de modo que os dados oriundos dos corpos-de-prova que sofreram muitos danos foram excluídos dos cálculos.

4.1.2.3.1 Ensaios que iniciaram com secagem dos corpos-de-prova

As Figuras de 82 a 85 mostram o desenvolvimento das deformações cíclicas nas três placas da mistura de referência (CPB00) e a média geral, obtida dos três corpos-de-prova, após submissão à alternância de secagem e molhamento, seguindo o procedimento do primeiro tipo de ensaio, que sempre se iniciava com a secagem do material. São mostrados os valores das respectivas medidas para cada direção marcada nas placas, identificadas por 1A e 1B (lado 1) e 2A e 2B (lado 2), como forma de indicar os desvios entre os valores individuais.

As placas compostas apenas com pasta de cimento apresentaram, em torno do quinto ciclo, tendência de ter uma face com maior deformação por expansão, sendo essa a face que, no período de manutenção da mistura nos moldes, permanecia exposta ao ar, portanto apresentando maior porosidade. A placa CPB00-3 apresentou visível fissuração, em ambas as faces, transcorridos oito ciclos, atribuindo-se a essa ocorrência o fato de ter mostrado certa tendência à expansão, superior às observadas nas duas primeiras placas (CPB00-1 e CPB00-2). Essas fissuras tornavam-se consideravelmente mais abertas quando a placa era umedecida, causando aumento irreal dos valores de deformação por expansão. Essa mesma placa não suportou os 25 ciclos de exposição pretendidos, vindo a
quebrar-se aos 19,5 ciclos, não obstante os cuidados tomados no manuseio dos corpos-de-prova. Assim, os pontos do gráfico da média geral foram determinados a partir dos valores das três placas, até o número de ciclos correspondente a 19,5.



Figura 82: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB00-1



Figura 83: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB00-2



Figura 84: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB00-3



Figura 85: Deformações médias das placas de CPB00 e média geral

A mistura CPB00 mostrou tendência a alcançar um valor de deformação cíclica reversível média, com razoável constância, em torno de 1600 µs, 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 µs.

Nas Figuras 86 a 88, são mostradas as variações das deformações para as três placas de compósito com 8% de polpa de bambu (CPB08-1, CPB08-2 e CPB08-3). A Figura 89 apresenta as médias de deformações para esses corpos-deprova e a média geral. Na segunda placa houve descolamento de algumas pastilhas e algumas medidas ficaram impossibilitadas. As medidas feitas nos corpos-de-prova desse compósito levaram a valores médios de deformação cíclica reversível de cerca de 1300 μ s e a máxima deformação por expansão ficou em torno de 2100 μ s.

A placa CPB08-3 passou a apresentar empenamento considerável, crescente a partir do 10° ciclo, tendo sido medida uma flecha máxima, no centro da diagonal da face côncava, de 4,8 mm, ao final do ensaio. O surgimento desse tipo de defeito é explicado pelo fato de que, com o processo de sucção a que é submetido o material compósito, durante a fabricação das placas utilizando vácuo, há uma tendência a que as fibras vegetais segreguem, concentrando-se, em maior quantidade, na face inferior da placa que fica voltada para o fundo da câmara de sucção. Essa heterogeneidade na distribuição das fibras leva ao comportamento diferenciado, em termos de deformação por secagem e umedecimento, pelo qual a face mais rica em fibras apresenta maior retração na secagem em relação àquela com menor teor de fibras.



Figura 86: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB08-1



Figura 87: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB08-2



Figura 88: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB08-3



Figura 89: Deformações médias das placas de CPB08 e média geral

Nas Figuras 90 a 92, são mostradas as variações das deformações para as três placas de compósito com 14% de polpa de bambu (CPB14-1, CPB14-2 e CPB14-3). A Figura 93 apresenta as médias de deformações para esses corpos-de-

prova e a média geral. Para esse compósito, os valores obtidos dos ensaios levaram a uma média de deformação cíclica reversível de cerca de 1400 µs e máxima deformação por expansão em torno de 2600 µs.

Como conseqüência do processo de envelhecimento acelerado desencadeado pela exposição aos ciclos alternados de secagem e molhamento, aliado a uma maior suscetibilidade a deformação desse compósito, os danos ocorreram em maior escala, com o aparecimento de fissuras, quebras e empenamentos. A placa CPB14-1 apresentou empenamento, tendo-se medido uma flecha máxima, em torno de 18 ciclos, de 3,0 mm. Essa mesma placa apresentou fissuração excessiva em torno do 22º ciclo, o que levou a medidas de deformação por expansão um pouco maiores, a partir desse ponto. A placa CPB14-3 sofreu empenamento, notável desde o 3º ciclo, fissuras a partir do 5º ciclo, teve um de suas quinas quebradas no 16º ciclo, vindo a quebrar-se inteiramente aos 21 ciclos. Por essas ocorrências, os dados coletados para essa última placa foram bastante distintos das outras da mesma mistura, tendo sido excluída do cálculo da média geral das deformações.



Figura 90: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB14-1



Figura 91: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB14-2



Figura 92: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB14-3



Figura 93: Deformações médias das placas de CPB14 e média geral

A Figura 94 mostra simultaneamente as deformações causadas pela variação do teor de umidade nas três misturas estudadas. Pode-se perceber que as medidas de deformação cíclica reversível dos compósitos com polpa não diferiram consideravelmente daquela determinada para a matriz sem polpa. Já as máximas deformações por expansão dos compósitos foram significativamente inferiores à apresentada pela matriz sem reforço, sendo essa última superior em 36% à da mistura CPB08. A diferença de comportamento mais significativa, no entanto, consistiu na constatação de que os compósitos com fibras apresentaram deformações predominantemente negativas (de contração), ao contrário da mistura de referência, alcançando valores maiores de contração em ciclos posteriores. Os corpos-de-prova de compósitos com polpa de bambu, na primeira secagem, sofreram contração, em relação às suas dimensões quando expostos ao ar. Em seguida, ao serem completamente saturadas, ao término primeiro ciclo, essas placas quase não ultrapassaram as dimensões que tinham antes do ensaio (quando estavam secas ao ar). Com a continuidade dos ciclos, a parcela de deformação cíclica diminuiu, caracterizando a parcela de contração reversível para cada mistura. As deformações de contração chegaram a atingir valores superiores a 4000 µs, para a mistura CPB14.



Figura 94: Variação da deformação por variação da umidade nas três misturas

Pode-se supor que esse comportamento dos compósitos com polpa de bambu, caracterizado pela preponderância de deformações de contração, encontre justificativa no fato de que, havendo perda de água na secagem, o volume do compósito sofre compressão, intensificada pela facilidade de saída da água proporcionada pelas fibras vegetais, reconhecidamente dotadas de grande porosidade. Mas, quando o corpo-de-prova é saturado, o volume tende a aumentar e, possivelmente, essa movimentação encontra como objeção a atuação do reforço fibroso. Por outro lado, esse impedimento à recuperação da capacidade de expansão, após uma primeira secagem, encontra justificativa em experimentos relatados por McKenzie (1994) que sugerem um caráter de irreversibilidade da retração por secagem inicial sofrida pelas micro-fibras recicladas.

Segundo McKenzie (1994), quando se trata da densidade das folhas na produção do papel, os termos "compacidade úmida" ou "conformação úmida" são freqüentemente usados para cobrir um espectro de características que contribuem para a transição do tecido de fibras molhadas para a folha de papel seca. Essas características dependem da combinação da elasticidade da fibra úmida (tendência de recuperar-se da deformação) com a plasticidade úmida (tendência de permanecer no estado deformado). Durante o processo de separação das fibras, na produção da polpa vegetal, ocorrem alterações na parede da célula que afetam as propriedades mecânicas e o comportamento sob molhamento e secagem. Alterações, tais como a remoção da lignina e outros componentes da parede da célula, ou separação da ligação entre as fibras, como ligações lignina-carboidrato, aumentam o acesso de água à parede da célula e aumentam a tendência à deformação plástica, tanto inicial quanto a posterior, provocada pelo refino da polpa quando da manipulação mecânica da fibra saturada. Além disso, trabalho experimental desse mesmo autor sugere que a retração da fibra (especialmente a retração lateral) pode ser uma componente crítica nesse processo de consolidação, estando esses três fatores, elasticidade, plasticidade e retração claramente inter-Como exemplo, o refino da polpa reduzirá a elasticidade e relacionados. aumentará a plasticidade e retração, enquanto que a deslignificação aumenta a capacidade da fibra de expandir-se e retrair-se e aumenta sua capacidade de sofrer deformação plástica.

Em relação a fibras recicladas, foi descrita a deformação irreversível como resultante de um processo em que a célula, originalmente úmida e expandida, se retrai durante a secagem, permitindo a aderência lateral de cadeias adjacentes de polisacarídeos que tinham sido previamente separadas. Algumas das novas áreas aderidas não são muito acessíveis à água e, então, na re-umidificação, não há o mesmo nível de deformação que estava presente antes da secagem (*op. cit.*).

4.1.2.3.2 Ensaios que iniciaram com saturação dos corpos-de-prova (segundo ensaio)

As Figuras 95 a 97 mostram o desenvolvimento das deformações cíclicas nos três corpos-de-prova da mistura de referência (CPB00) em ensaios que se iniciaram pela saturação dos elementos. O primeiro corpo-de-prova (CPB00-1) começou a apresentar pequenas fissuras após 6 ciclos de molhamento e secagem e quebrou-se ao cabo de 15 ciclos. Foram registradas fissuras no CPB00-2 após 11 ciclos. Devido a essas ocorrências, pode-se perceber uma certa inclinação desses gráficos para a região das deformações por expansão, já que as deformações no estado saturado eram acrescidas das aberturas dessas pequenas fissuras, que aumentavam quando o material era saturado.

A Figura 98 apresenta as curvas médias de cada corpo-de-prova de CPB00 e a curva da média entre os três elementos, onde pode ser percebida uma distribuição quase equivalente entre contração e expansão, no transcorrer dos ciclos. Esse gráfico da média entre as placas foi traçado até o 15º ciclo, de modo a incluir o primeiro corpo-de-prova. A deformação máxima de contração ficou em torno de 3500 µs e a deformação cíclica reversível ficou em torno de 1800 µs.

Comparando-se o comportamento dessa mistura para os dois tipos de ensaio, foi verificado um certo aumento entre as deformações máximas (6%) e deformação cíclica reversível (12,5%) para o ensaio que se iniciou com saturação dos elementos. Pode-se supor que essas diferenças foram causadas pela diversidade dos danos ocorridos nos corpos-de-prova, o que leva à conclusão de que, para a mistura de referência, não houve considerável influência do modo como se iniciou o processo de exposição dos elementos.



Figura 95: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB00-1 (segundo ensaio)



Figura 96: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB00-2 (segundo ensaio)



Figura 97: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB00-3 (segundo ensaio)



Figura 98: Deformações médias das placas de CPB00 e média geral (segundo ensaio)

As Figuras 99 a 101 mostram as deformações por movimentação da umidade nos corpos-de-prova da mistura CPB08. A segunda placa (CPB08-2) apresentou fissuras pequenas já no 6° ciclo e quebrou-se no 15° ciclo. A placa CPB08-3 apresentou certo empenamento, percebido a partir do 10° ciclo, o que se reflete na distinção entre os valores das deformações medidas no lado 1 (maior contração) e no lado 2 (menor contração), certamente por segregação das fibras durante o processo de moldagem das placas. A Figura 102 apresenta os valores de deformação médios de cada placa e a média geral. Verificou-se uma deformação máxima de contração aproximada de 4300 µs, valor que superou em 105% a deformação máxima de expansão, obtida no primeiro tipo de ensaio, que foi de 2100 µs.

Essa diferença de comportamento da mistura com polpa, devido à submissão inicial à molhamento, sugere que esse tipo de tratamento seja mais danoso ao material do que aquele que se inicia com a secagem. Na saturação inicial, o elemento atinge valores consideráveis de deformação por expansão e, quando seco, há grande contração. A variação das dimensões entre esses dois estados hídricos pode se traduzir em esforços, quando surgem impedimentos à movimentação do elemento.

Observando-se o gráfico dessa mistura CPB08 no primeiro tipo de ensaio (Figura 80), percebe-se que o compósito sofreu considerável contração na secagem inicial, mas, em seguida, quando da primeira saturação, quase não houve expansão além das dimensões que o elemento possuía originalmente, quando estava exposto às condições da câmara climática (temperatura de 25° C e umidade

relativa de 50%). Pode-se supor, levando-se em conta o comportamento da mistura de referência, que sejam as fibras vegetais a fase responsável por esse comportamento singular do compósito.

As micro-fibras, uma vez secas, se retraem e não voltam a ter o volume expandido, mesmo com re-umidificação. Iniciando-se o processo pela saturação, as fibras se expandem e esse montante de deformação se soma à posterior deformação de contração por secagem. Tendo sido feita a primeira secagem, daí em diante as fibras não recuperam sua capacidade de expansão. Se os elementos moldados com compósito são, inicialmente secos, reduz-se a possibilidade de tão grande movimentação inicial por alternância de molhamento e secagem.

A deformação cíclica reversível, nesse tipo de ensaio, para o compósito com 8% de polpa de bambu ficou em torno de 1800 µs, sendo 38% superior à obtida para essa mistura no primeiro tipo de ensaio.



Figura 99: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB08-1 (segundo ensaio)



Figura 100: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB08-2 (segundo ensaio)



Figura 101: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB08-3 (segundo ensaio)



Figura 102: Deformações médias das placas de CPB08 e média geral (segundo ensaio)

As Figuras 103 a 105 apresentam os gráficos de variação dimensional das placas de CPB14, por alternância dos estados de completa saturação e secagem. Nesse segundo tipo de ensaio, que se inicia com a saturação, os corpos-de-prova apresentaram ainda mais danos do que no primeiro tipo de ensaio. As placas apresentaram fissuração e o terceiro elemento veio a quebrar-se já no oitavo ciclo. Foi determinada a deformação máxima de contração, como sendo de 4500 µs, que foi 73% superior à deformação máxima de expansão, do primeiro tipo de ensaio.

A Figura 106 apresenta as deformações médias de cada placa de CPB14 e a média entre as médias desses corpos-de-prova. A deformação cíclica reversível resultou próxima a 2000 µs, sendo cerca de 43% superior à deformação cíclica no primeiro ensaio. Também para a mistura com 14% de polpa, foi notável que esse segundo tipo de ensaio danificou os elementos em maior escala, quando comparado com o primeiro ensaio, possivelmente devido à maior deformação inicial que ocorreu quando o compósito foi inicialmente saturado e, a seguir, foi totalmente seco. A Figura 107 mostra os gráficos das três misturas nesse segundo tipo de ensaio. A Tabela 12 apresenta os valores médios obtidos para os parâmetros de variação de dimensões por movimentação da umidade nas misturas estudadas. Baseando-se nos dados obtidos nesses experimentos, poder-se-ia sugerir um procedimento de secagem e saturação iniciais, nessa ordem, como uma alternativa de tratamento dos compósitos reforçados com polpa de bambu, visando diminuir a intensidade de futuras variações dimensionais dos elementos.



Figura 103: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB14-1 (segundo ensaio)



Figura 104: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB14-2 (segundo ensaio)



Figura 105: Variação das deformações por alternância de secagem e molhamento na placa CPB14-3 (segundo ensaio)



Figura 106: Deformações médias das placas de CPB14 e média geral (segundo ensaio)



Figura 107: Variação da deformação por variação da umidade nas três misturas (segundo ensaio)

Tabela 12: Valores médios dos parâmetros dos ensaios de reversibilidade da retração

Misturas	Ensaios que se secagem dos	iniciaram com	Ensaios que se iniciaram com saturação dos elementos			
	Deformação	Deformação	Deformação	Deformação		
	máxima de	cíclica	máxima de	cíclica reversível		
	expansão (µs)	reversível (µs)	contração (µs)	(µs)		
CPB00	3300	1600	3500	1800		
CBP08	2100	1300	4300	1800		
CPB14	2600	1400	4500	2000		

4.2 Fluência

4.2.1 Fluência sob compressão

4.2.1.1 Caracterização da resistência à compressão

A Tabela 13 apresenta os valores médios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, obtidos dos ensaios com corpos-de-prova do mesmo tipo e submetidos às mesmas condições de cura que aqueles usados no ensaio de fluência sob compressão. A Figura 108 contém exemplos de curvas obtidas para um corpo-de-prova de cada mistura, onde ficam bastante denotadas as diferenças de comportamento relacionadas à capacidade de resistência e deformabilidade, com o acréscimo da polpa na mistura. Os gráficos de todos os ensaios de compressão encontram-se no Apêndice A.

Misturas	Resistência à (M	i compressão Pa)	Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)			
	Média	Desvio médio	Média	Desvio médio		
CPB00	50,15	0,18	29,50	1,80		
CPB08	24,78	0,89	8,74	0,38		
CPB14	14,46	1,33	5,74	0,60		

Tabela 13: Valores médios de resistência e módulo de elasticidade à compressão



Figura 108: Relações tensão versus deformação sob compressão para os compósitos com polpa de bambu

Houve redução da resistência à compressão dos compósitos com polpa de bambu, em relação à mistura de referência, de cerca de 50% e 71%, respectivamente, para os teores de polpa de 8% e 14%. Percebeu-se um aumento considerável da capacidade do material de sofrer deformação, com o aumento do teor de polpa adicionado, como pode ser observado na Figura 109, onde é mostrado o modo de ruptura de dois corpos-de-prova já rompidos por compressão, sendo o da esquerda feito com o compósito com 8% de polpa de bambu e o da direita, com a mistura de referência. Isso resulta em maior tenacidade, além de propiciar a que o material possa manter uma certa capacidade de resistir a cargas, mesmo após a fissuração, impedindo a ruptura frágil.



Figura 109: Corpos-de-prova de CPB08 e CPB00 rompidos sob compressão

4.2.1.2 Comportamento dos compósitos sob fluência na compressão

As características gerais observadas do comportamento dos compósitos sob deformações dependentes do tempo são mostradas nas Figuras 110 até 115, com tensão constante aplicada, correspondente a 50% da resistência à compressão do material. A idade de início do carregamento (t') foi de 28 dias. Mediu-se, em corpos-de-prova expostos à secagem e sob carregamento constante, a deformação total (que inclui a deformação elástica instantânea, a retração na secagem e a fluência total). As Figuras 116 e 117 mostram a fluência total e a fluências básica nas três misturas, respectivamente.

Nos corpos-de-prova selados, buscou-se medir a deformação total que inclui a deformação elástica instantânea, a fluência básica e a retração autógena. Para tanto, quase não deveria haver troca de umidade entre os corpos-de-prova e o ambiente. Verificou-se, porém, que a impermeabilização feita com duas demãos de selante, e posterior cobertura com filme plástico, não foram suficientes para impedir as trocas de umidade com o meio externo, o que pode ter trazido certo prejuízo ao rigor dos resultados.

Houve dificuldade em controlar as perdas de água, pois a preparação do corpo-de-prova para ensaio (capeamento e fixação dos extensômetros) envolveu riscos de exposição ao ar de determinadas partes da superfície dos elementos, não obstante os esforços empreendidos para tornar a duração dessas atividades a mais abreviada possível. A escolha do tipo de revestimento, a ser aplicado para impedir a saída da água, tinha que ser feita de modo a não provocar enrijecimento, ou qualquer outra variação de propriedades mecânicas dos corpos-de-prova. O

método mais indicado pelos autores pesquisados para evitar esse problema na medida da fluência básica seria curar e ensaiar o corpo-de-prova totalmente submerso. Mas, para esse tipo de compósito, com fibras vegetais, o processo de cura submersa tem-se mostrado danoso. A Figura 118 mostra a evolução da perda de massa observada nos corpos-de-prova selados, durante o transcorrer do ensaio. Especialmente pra o compósito CPB14, o sistema selante mostrou-se pouco eficiente, permitindo que a perda de massa atingisse uma média de 7,8% da massa inicial dos corpos-de-prova.



Figura 110: Fluência em corpo-de-prova não selado de CPB00



Figura 111: Fluência em corpo-de-prova selado de CPB00



Figura 112: Fluência em corpo-de-prova não selado de CPB08



Figura 113: Fluência em corpo-de-prova selado de CPB08



Figura 114: Fluência em corpo-de-prova não selado de CPB14



Figura 115: Fluência em corpo-de-prova selado de CPB14



Figura 116: Fluência total nas três misturas (não selado)



Figura 117: Fluência básica nas três misturas (selado)



Figura 118: Médias das perdas de massa dos corpos-de-prova selados durante ensaio de fluência na compressão

Dos resultados obtidos nesse experimento, pode-se depreender a significativa influência da presença das fibras no compósito sobre a sua capacidade de sofrer deformações ao longo do tempo, sob carregamento. Na Tabela 14, estão apresentados os valores das deformações e as proporções entre esses valores para os compósitos com polpa (CPB08 e CPB14) e para a matriz sem reforço (CPB00) em pontos típicos do ensaio.

Foi notável o aumento da capacidade de sofrer fluência, com a inserção do reforço fibroso na mistura, tendo as misturas com 8% e com 14% de polpa atingido valores de fluência básica 6,78 e 11,63 vezes maiores que os da mistura de referência, respectivamente, aos 120 dias sob carregamento. Para a fluência total, em corpos-de-prova sujeitos também à retração por secagem, esses índices foram menores e próximos um do outro, correspondendo a valores 5,77 e 6,26 vezes maiores para os compósitos (CPB08 e CPB14 respectivamente) que para a matriz.

Pode-se concluir que o efeito da adição da polpa de bambu à matriz de pasta de cimento, em relação à fluência sob compressão, foi o de tornar o material bem mais suscetível a esse tipo de deformação, não tendo sido relevante a participação das fibras como elementos impeditivos à deformação da matriz, nem mesmo na direção transversal dos elementos, onde ocorre tração.

Pontos típicos do ensaio			Deformações (µs)			Proporção em relação aos valores obtidos para CPB00		
		CPB00	CPB08	CPB14	CPB08	CPB14		
	Deformação total aos 120 dias (com carga)	2827	8699	11807	3,08	4,18		
	Deformação total aos 180 dias (após 60 dias sem carga)	2480	7186	9903	2,90	3,99		
	Def. elástica no carregamento	520	1306	1579	2,51	3,04		
Corpos-de- prova não selados	Fluência total aos 120 dias sob carga	997	5749	6246	5,77	6,26		
	Recuperação instantânea no descarregamento	321	1230	1490	3,83	4,64		
	Deformação elástica atrasada após 60 dias da retirada da carga	260	450	493	1,73	1,90		
	Fluxo	936	5375	5842	5,74	6,24		
	Retração na secagem aos 180 dias	1504	1812	4061	1,2	2,70		
Corpos-de- prova selados	Deformação total aos 120 dias (com carga)	1646	4282	8273	2,60	5,03		
	Deformação total aos 180 dias (após 60 dias sem carga)	1435	3324	6700	2,32	4,67		
	Def. elástica no carregamento	480	1163	1251	2,42	2,60		
	Fluência básica aos 120 dias sob carga	340	2305	3954	6,78	11,63		
	Recuperação instantânea no descarregamento	215	1028	1203	4,78	5,60		
	Deformação elástica atrasada após 60 dias da retirada da carga	77	312	772	4,05	10,03		
	Fluxo	528	2128	3229	4,03	6,12		
	Retração (CP's selados) aos 180 dias	907	1196	3471	1,32	3,83		

Tabela 14: Índices que relacionam parâmetros do ensaio de fluência na compressão dos compósitos com os da matriz sem reforço

O efeito da secagem sobre a fluência fica evidenciado pela diferença entre as fluências total (sob secagem) e básica de cada mistura. Para a pasta pura (CPB00), aos 120 dias de carregamento, a fluência sob ação concomitante da secagem (fluência total) foi 2,93 vezes maior que a fluência básica. Para os compósitos com polpa, essas proporções entre as fluências sob condições diferenciadas de exposição foram de 2,49 e 1,58 vezes, respectivamente, para CPB08 e CPB14, mostrando a suscetibilidade das misturas à ação da retração na secagem como agravante da fluência, que foi ainda maior para a matriz sem reforço.

Pode-se perceber, pelas Figuras 116 e 117, que a diferença entre as fluências básicas dos dois compósitos com polpa (71,5% maior no CPB14 do que no CPB08) foi mais acentuada do que na condição de carregamento com secagem simultânea (fluência total do CPB14 foi 8,6% maior que a do CPB08). Observou-

se que, havendo secagem simultânea, a fluência foi aumentada em larga escala, em relação à fluência da pasta, não tendo sido muito relevante a diferença de teor de polpa no compósito, entre 8% e 14%. No entanto, para a fluência medida em corpos-de-prova selados, ou seja, que receberam aplicação de substância seladora, apesar das dificuldades em garantir uma selagem perfeita, ficou bem marcada a influência da diferença entre os conteúdos de fibra nos compósitos. Após 120 dias de carregamento, os valores de fluência básica cresceram linearmente com o aumento do teor de polpa de bambu no compósito.

Os compósitos com polpa de bambu apresentaram muito 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-deprova selados, e 62%, para os não selados, esses percentuais, para o compósito CPB08, foram de 88% e 94% e, para o compósito CPB14, foram de 96% e 94%. Isso implica em que, para os compósitos com polpa de bambu, há recuperação quase total da deformação elástica inicial, logo no momento da retirada da carga. Observa-se nisso um reflexo da menor rigidez dos compósitos em relação à matriz sem reforço, possivelmente provocada pela maior porosidade e pelo fato das fibras de baixo módulo de elasticidade não terem capacidade de atuação como elementos de reforço, e até emularem falhas na estrutura do material, sob esforço de compressão. Mesmo as possíveis restrições às deformações transversais que as fibras poderiam exercer, não pareceram importantes, sob o nível de esforços de compressão simples aplicado.

Os valores obtidos para a relação entre a deformação elástica atrasada e a parcela de deformação recuperada instantaneamente mostraram que a recuperação de longo prazo tendeu a ser menor que a recuperação imediata nas misturas estudadas. Apenas para a mistura de referência, na condição de secagem, essa relação alcançou um valor mais alto, ficando em torno de 80%. Nos corpos-de-prova selados, essa relação foi de 0,36 para CPB00, de 0,30 para CPB08 e de 0,64 para CPB14. Nos corpos-de-prova não selados, esses percentuais foram de 0,37 para CPB08 e 0,33 para CPB14.

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. Embora, nos estudos com concretos, seja observado que a fluência é diretamente proporcional ao teor de pasta na mistura, com a introdução do reforço com polpa de bambu, apesar da redução da concentração de pasta, houve incremento considerável da fluência sob compressão dos compósitos em relação à matriz. Por seu baixo módulo de elasticidade e comprimento muito pequeno, as fibras não se mostraram eficientes para conter o desenvolvimento da fluência. Houve aumento do montante de deformação permanente da fluência principalmente para os compósitos com polpa de bambu expostos à secagem. Isso poderia ser explicado pelo fato de que o fenômeno do surgimento de deformação progressiva no material, como consequência da manutenção de carregamento constante, encontrou, nos compósitos com alta concentração de fibras vegetais, e conseqüente porosidade, significativa quantidade de falhas estruturais onde as deformações podem se acumular. Para os compósitos submetidos a ambiente de secagem, a porosidade é ainda mais intensificada.

A Figura 119 apresenta, para cada mistura estudada e para cada condição de exposição, as proporções entre as parcelas em que se divide a deformação média presente nos corpos-de-prova antes da retirada do carregamento, que corresponde à soma da deformação elástica com a fluência. Esse parcelamento foi tomado quando completados os 60 dias de observação da recuperação das deformações, configurando-se as proporções correspondentes à recuperação instantânea, deformação elástica atrasada e fluxo, podendo representar uma previsão do estado de deformação de cada material, após a retirada da carga, quando completada a recuperação das deformações. Nessa figura, pode-se notar o comportamento distinto dos compósitos com fibras, quando expostos à secagem, quanto ao acúmulo de deformação plástica por fluência.



Figura 119: Fracionamento do total da deformação elástica e fluência sob compressão, após completada a recuperação das deformações

4.2.1.3 Comportamento dos compósitos após recuperação da fluência

Após 60 dias da retirada do carregamento, os corpos-de-prova foram rompidos sob compressão, sendo determinadas as resistências máximas e os módulos de elasticidade, para cada mistura. Os resultados desses ensaios constam da Tabela 15.

	Após ensaio de	fluência básica	Após ensaio de fluência sob secagem			
Mistura	Resistência à	Módulo de	Resistência à	Módulo de		
	compressão	elasticidade	compressão	elasticidade		
	(MPa)	(GPa)	(MPa)	(GPa)		
CPB00	53,25	30,34	58,46	29,33		
CPB08	30,33	14,20	37,59	14,28		
CPB14	16,69	5,60	17,74	4,95		

Comparando-se os valores da Tabela 15 com aqueles constantes da Tabela 13, que mostra os índices mecânicos que tinham os compósitos antes do ensaio de fluência, pode-se perceber que não houve significativo efeito sobre o desempenho mecânico, pelo fato dos corpos-de-prova terem sido submetidos a 120 dias de carregamento e posterior descarregamento. O incremento da resistência mecânica e do módulo elástico das misturas pode ser devido, simplesmente, à evolução do endurecimento da pasta de cimento ao longo do tempo. Os compósitos com fibras,

L

que têm na alta porosidade um dos fatores de rebaixamento dos índices mecânicos, podem ter sido beneficiados pela prolongada ação da carga de compressão, que contribui para uma maior compacidade.

4.2.1.4 Modelos para fluência sob compressão

Para estudar a deformação dos compósitos cimentícios, sob efeito do tempo de manutenção de carregamento constante, foi usado, primeiramente, um modelo baseado na teoria da visco-elasticidade linear. Adotou-se um modelo físico, constituído por elementos simples, do tipo mola elástica e amortecedor. O modelo do sólido linear padrão, ou modelo de Zener, foi o escolhido, por ser o mais simples que descreve corretamente todas as características esperadas do comportamento sob fluência e sob relaxação, observadas experimentalmente em materiais linear-elásticos, apesar de não ser completamente adequado (Gibson 1993).

Além do modelo reológico citado, foi aplicado o modelo B3 (Bazant e Baweja, 1995), relativo à fluência básica, por ser essa medida tomada como propriedade constitutiva do material. Para a adequação desse modelo aos compósitos estudados, fez-se necessário utilizar dados de fluência básica obtidos por ensaios desses materiais, o que assim foi feito, apesar das perdas de água registradas durante os ensaios de corpos-de-prova selados, conforme descrito em 4.2.1.2.

A deformação total, presente num elemento de compósito à base de cimento, sob tensão uniaxial constante, pode corresponder à eq. (81) (Bazant e Baweja 1995).

$$\varepsilon(t) = J(t, t') \sigma + \varepsilon_{sh}(t, t_0) + \alpha \Delta T(t)$$
(81)

Nessa equação, σ é a tensão uniaxial, $\varepsilon(t)$ é a deformação no tempo t, $\Delta T(t)$ é a variação de temperatura em relação à temperatura de referência no tempo t, e α é o coeficiente de expansão térmica. Não havendo variação de temperatura, o último termo é desprezado.

A retração no tempo *t* de um elemento que foi posto a secar na idade t_0 , $\varepsilon_{sh}(t,t_0)$, pode ser determinada por medidas em corpos-de-prova semelhantes, sem carregamento, e seus valores podem ser descontados da deformação total, para se obter a soma da fluência com a deformação elástica imediata, adotando-se a simplificação de que os efeitos da fluência e da retração são aditivos. Assim, pode-se caracterizar o comportamento do material sob fluência através da determinação de sua função de compliância (*creep compliance*), J(t,t'), definida como a deformação (de fluência mais elástica imediata) no tempo *t-t'*, causada por uma tensão unitária uniaxial constante, σ , aplicada na idade *t'*. A função de compliância pode ser decomposta conforme a eq. (82).

$$J(t,t') = q_1 + C_0(t,t') + C_d(t,t',t_0)$$
(82)

Nessa equação, q_1 é a deformação imediata devido à tensão unitária, $C_0(t,t')$ é a função de compliância para a fluência básica (fluência sob teor de umidade constante, sem troca de umidade entre o material e o meio externo), e $C_d(t,t',t_0)$ é a função de compliância adicional devido à secagem simultânea.

4.2.1.4.1 Modelo da teoria da Visco-elasticidade linear (modelo de Zener)

O modelo do sólido linear padrão, ou modelo de Zener é um modelo melhorado, em relação aos modelos básicos (de Maxwell e de Kelvin-Voigt), baseados em mola elástica e amortecedor. O modelo de Zener consta de um modelo Maxwell em paralelo com uma mola, conforme mostrado na Figura 120. A equação diferencial que descreve o comportamento desse modelo é dada pela eq. (83). A função de compliância, J(t,t'), para o modelo de Zener, obtida por integração da eq. (83), é dada pela eq. (84).



Figura 120: Modelo de Zener

$$\sigma + \frac{\mu_1}{k_1} \frac{d\sigma}{dt} = k_0 \varepsilon + \frac{\mu_1}{k_1} (k_0 + k_1) \frac{d\varepsilon}{dt}$$
(83)

$$J(t) = \frac{1}{k_0} \left[1 - \frac{k_1}{k_0 + k_1} e^{-(t-t')/\rho_1} \right]$$
(84)

onde ρ_l , dado pela eq. (85), é o tempo de retardo.

$$\rho_1 = \frac{\mu_1}{k_0 \cdot k_1} (k_0 + k_1) \tag{85}$$

Os parâmetros k_0 e k_1 , correspondentes aos módulos elásticos das duas molas, e μ_1 , correspondente ao coeficiente de viscosidade do amortecedor, foram obtidos através de regressão não-linear dos dados experimentais, oriundos das curvas de deformação total dos corpos-de-prova selados, descontadas, somente, as deformações por retração. Portanto, as curvas experimentais utilizadas corresponderam à soma das deformações por fluência básica com a deformação elástica no momento do carregamento, como previsto no modelo de Zener. Como no modelo B3, já aplicado para a retração e, a seguir, aplicado para fluência, a formulação é dada com os valores dos parâmetros em unidades do sistema inglês, assim foi feito também na aplicação desse modelo reológico para os compósitos, para fins de comparação.

Os valores obtidos para as constantes, relativas ao compósito CPB08, foram iguais a 0,355 psi e 1,159 psi, para k_0 e k_1 , respectivamente, e 36,593 psi.s (x10⁶) para μ_1 . Assim, a expressão para a função de compliância no tempo, para essa mistura, pode ser dada pela eq. (86). Para o compósito CPB14, as constantes resultaram iguais a 0,196 psi e 0,623 psi, para k_0 e k_1 , respectivamente, e 3,616 psi.s (x10⁶) para μ_1 , e a eq. (87) expressa sua função de compliância, J(t,t').

$$J(t,t')_{CPB08} = 2,81525 - 2,15488.e^{-0,00743.(t-t')}$$
(86)

$$J(t,t')_{CPB14} = 5,08994 - 3,87013.e^{-0.04131.(t-t')}$$
(87)

As Figuras 121 e 122 mostram as comparações entre os dados obtidos experimentalmente e os obtidos através do modelo, respectivamente, para as misturas CPB08 e CPB14. A Figura 123 traz a previsão da evolução dessas medidas para um período de tempo de 1000 dias. Houve boa concordância entre os valores obtidos experimentalmente e aqueles obtidos pelo modelo, em ambos os compósitos estudados. Pôde ser percebido que, por esse modelo adotado, a deformação por fluência básica somada à deformação elástica do compósito com 14% de polpa tende a se estabilizar num patamar bastante próximo do valor da deformação medido experimentalmente após 120 dias de carregamento. Ao contrário, o compósito com 8% de polpa de bambu, apresenta ainda tendência a crescimento. Apesar da fluência no compósito CPB14 ser bem superior, nos 120 dias de carregamento, à deformação do compósito CPB08, o modelo de Zener prevê que a estabilização do valor da deformação, para o primeiro, se dê bem mais rapidamente que para o segundo.



Figura 121: Modelo de Zener para o compósito CPB08



Figura 122: Modelo de Zener para o compósito CPB14



Figura 123: Predição para fluência básica mais deformação elástica para compósitos CPB08 e CPB14 pelo modelo de Zener

Por interpolação, foi obtida a eq. (88) para a previsão da função de compliância nos corpos-de-prova selados, tendo a fração em massa das fibras, em relação ao aglomerante, como variável, para teores entre 8% e 14%. A Figura 124 mostra as curvas obtidas desse modelo para diferentes frações volumétricas.

$$J(t,t',V_f) = 0,37912.V_f - 0,21767 - 0,64502.e^{-0,04131(t-t')}.V_f + 5,16017.e^{-0,04131(t-t')} - 5,02805.e^{-0,00743(t-t')} + 0,35915.e^{-0,00743(t-t')}.V_f$$
(88)



Figura 124: Predição para fluência básica mais deformação elástica para diferentes teores de polpa de bambu pelo modelo de Zener

4.2.1.4.2 Modelo B3 para fluência

Segundo Bazant e Baweja (1995), a fluência básica, uma propriedade constitutiva do material, é mais convenientemente definida por sua taxa de crescimento ao longo do tempo, que é dada pela eq. (89), onde $\dot{C}_0(t,t')$ é a derivada parcial de $C_o(t,t')$ em relação a $t \in q_2$, $q_3 \in q_4$ são parâmetros constitutivos empíricos. Por integração, é obtida a função de compliância básica, conforme a eq. (90), na qual Q(t,t') é uma integral binomial que não pode ser expressa analiticamente, mas são dados seus valores tabelados, em função dos valores de $log(t') \in log(t-t')$ em Bazant e Baweja (1995).

$$\overset{\bullet}{C}_{0}(t,t') = \frac{n(q_{2}t^{-m} + q_{3})}{(t-t') + (t-t')^{1-n}} + \frac{q_{4}}{t}, \text{ com } m = 0,5 \text{ e } n = 0,1$$
(89)

$$C_0(t,t') = q_2 Q(t,t') + q_3 \ln\left[1 + (t-t')^n\right] + q_4 \ln\left(\frac{t}{t'}\right)$$
(90)

Os termos da eq. (90) que contêm q_2 , q_3 e q_4 , representam a compliância visco-elástica por envelhecimento, a compliância visco-elástica sem envelhecimento, e a compliância do fluxo, respectivamente, como deduzido da teoria da solidificação (Bazant e Prasannan 1989 *apud* Bazant e Baweja 1995).

O modelo B3, para estruturas de concreto, propõe que a predição da fluência seja feita com base na composição da mistura e resistência média do material a compressão aos 28 dias de idade. Essa predição constitui-se num problema de solução extremamente difícil, para o qual nenhuma teoria adequada foi ainda desenvolvida (Bazant e Baweja 1995). Esse modelo apresenta fórmulas que são parcialmente empíricas e parcialmente refletem tendências deduzidas do conhecimento teórico de mecanismos físicos, calibradas por análise estatística de dados que envolveu cerca de cerca de 100 séries de testes. Essas fórmulas para determinação dos parâmetros da eq. (90) estão descritas nas eqs. (91), (92) e (93), nas quais *c* é o consumo de cimento da mistura, em *lb/ft³*, *f_c'* é média da resistência à compressão aos 28 dias de idade, *w/c* é a relação água/cimento em massa e *a/c* é a relação agregado/cimento em massa.

$$q_2 = 451, 1.c^{0.5}.(f_c^{'})^{-0.9}$$
(91)

$$q_3 = 0.29 \cdot (\frac{W_c}{c})^4 \cdot q_2 \tag{92}$$

$$q_4 = 0,14. \binom{a_c}{c}^{-0,7} \tag{93}$$

Baseando em dados de ensaios de curta duração, foi adotada a estimativa melhorada da fluência básica contida em Bazant e Baweja (1995), para tornar o modelo, que foi concebido para o concreto convencional, aplicável a misturas com adições variadas. Considera-se que a função de compliância é adaptada ao material para o qual foi obtida experimentalmente a curva da fluência básica ao longo do tempo. São determinados dois parâmetros, p_1 e p_2 , para correlacionar linearmente a função $C_o(t,t')$, obtida de acordo com o modelo B3 (através das fórmulas que envolvem os parâmetros de composição e resistência à compressão do material) e a função $C'_o(t,t')$, obtida experimentalmente, conforme a eq. (94). Se os dados experimentais concordassem exatamente com a forma do modelo B3, o gráfico de $C'_o(t,t')$ versus $C_o(t,t')$ teria que ser uma linha reta. Os desvios verticais dos pontos dos dados, em relação a essa linha reta, representam erros que podem ser considerados como aleatórios e podem ser minimizados por regressão pelo método dos mínimos quadrados.

$$C'_{0}(t,t') = p_{1} + p_{2}.C_{0}(t,t')$$
(94)

A eq. (93) é uma linha de regressão, na qual a inclinação e o valor de $C'_0(t,t')$ em que a reta intercepta o eixo das ordenadas dão os valores de p_1 e p_2 , que são os valores ótimos do método dos mínimos quadrados. As eqs. (95) e (96) são as equações normais do método dos mínimos quadrados e são usadas para determinar os valores de p_2 e p_1 , respectivamente.

$$p_{2} = \frac{n\Sigma(C_{0i}.C_{0i}) - (\Sigma C_{0i})(\Sigma C_{0i})}{n\Sigma(C_{0i}^{2}) - [\Sigma C_{0i}^{'2}]}$$
(95)

$$p_1 = \bar{C_0} - p_2 \cdot \bar{C_0} \tag{96}$$

Na eq. (95), $\bar{C_0} \in \bar{C_0}$ são as médias de todos os valores das respectivas funções. Os valores ajustados para a função de compliância da fluência básica, $C_0''(t,t')$, pelo modelo B3 adaptado para misturas especiais, pode ser dado pela eq. (97).

$$C_0^{"}(t,t') = p_1 + p_2 C_0(t,t')$$
(97)

Os procedimentos para obtenção das curvas de predição melhoradas, segundo o modelo B3, foram aplicados aos compósitos CPB08 e CPB14, resultando nas curvas constantes das Figuras 125 e 126, respectivamente. Para o compósito CPB08, pode-se considerar que essa predição teve razoável concordância com os dados experimentais, sendo que o modelo B3 original prevê uma fluência básica bastante superior que a observada na curva experimental. Ao contrário, para o compósito CPB14, o modelo original prevê menores valores de fluência básica que os observados experimentalmente. O modelo adaptado, para o CPB14, não teve muito boa concordância com a curva experimental, que, por sua

vez, apresentou uma forma pouco regular, de modo a tornar difícil a obtenção de expressão matemática que a representasse a contento.



Figura 125: Predição para fluência básica para o compósito CPB08 pelo modelo B3



Figura 126: Predição para fluência básica para o compósito CPB14 pelo modelo B3

4.2.2 Fluência sob flexão

4.2.2.1 Caracterização da resistência à flexão

A Tabela 16 apresenta os resultados, em termos de médias e coeficientes de variação, dos testes de flexão em quatro pontos dos corpos-de-prova das misturas CPB00, CPB08 e CPB14. As Figuras 127, 128 e 129 mostram as curvas obtidas desses ensaios, para os seis corpos-de-prova de cada mistura. Os valores obtidos para o módulo de ruptura à flexão (*MOR*) de cada mistura foram utilizados para o

cálculo das cargas a serem aplicadas nos corpos-de-prova que seriam submetidos ao ensaio de fluência na flexão, tendo sido fixado que o carregamento corresponderia a 30% do *MOR*.

Material	Limite de proporcionalidade			Ponto máximo da curva					Energia Esp.			
	P _{LP}		v		P _{max}		v		MOR		$EE (kJ/m^2)$	
	Média	Coef.	Média	Coef.	Média	Coef	Média	Coef	Média	Coef	Média	Coef.
	(N)	var.	(mm)	var.	(N)	. var.	(mm)	. var.	(MPa)	. var.	(kJ/m^2)	var.
	()	(%)	()	(%)	()		()	(%)	((%)	(110,111)	(%)
CPB00	81	19	0,15	26	81	19	0,15	26	5,25	15	0,03	29
CPB08	129	12	0,54	27	148	13	0,90	13	8,71	9	0,69	9
CPB14	58	8	0,65	24	78	19	1,77	28	4,72	20	1,00	21
CPB14	58	8	0,65	24	78	19	1,77	28	4,72	20	1,00	21

Tabela 16: Parâmetros dos ensaios de flexão para cada mistura



Figura 127: Curvas carga-deslocamento do ensaio de flexão de CPB00



Figura 128: Curvas carga-deslocamento do ensaio de flexão de CPB08


Figura 129: Curvas carga-deslocamento do ensaio de flexão de CPB14

4.2.2.2 Comportamento dos compósitos sob fluência na flexão

Os resultados dos testes de fluência sob flexão para as três misturas estudadas (CPB00, CPB08 e CPB14) estão apresentados nas Figuras 130 a 132, onde estão registradas as evoluções das deformações de compressão e de tração na flexão ao longo do tempo, sob carregamento constante, descontada a retração na secagem. São apresentadas, também, as curvas de fluência total, descontada a deformação elástica instantânea, no momento do carregamento. A Figura 133 apresenta as curvas de retração na secagem, medida em corpos-de-prova idênticos aos usados nos ensaios de fluência, mantidos sob mesmas condições de temperatura e umidade relativa do ar.



Figura 130: Comportamento sob fluência na flexão da mistura de referência (CPB00)



Figura 131: Comportamento sob fluência na flexão do compósito com 8% de polpa de bambu (CPB08)



Figura 132: Comportamento sob fluência na flexão do compósito com 14% de polpa de bambu (CPB14)



Figura 133: Retração na secagem em corpos-de-prova de 120 mm x 40 mm x 6 mm para as três misturas observadas

Pode-se perceber que, para a condição de carregamento correspondente a 30% da tensão de ruptura de cada material, houve uma pequena diminuição da fluência sob tração na flexão do compósito com o aumento do teor de polpa, para as composições observadas. Em relação à fluência sob compressão na flexão, a presença do reforço fibroso levou a considerável aumento, que foi maior para o teor de 8% de polpa de bambu. A Tabela 17 apresenta os valores de deformações em pontos representativos dos ensaios (deformação elástica, fluência total, recuperação de deformações, fluxo e retração na secagem) para as três misturas estudadas, obtidas das médias das medidas nos lados comprimido e tracionado dos corpos-de-prova.

	Deformações (µs) – em módulo									
Parâmetros do ensaio	CPB	800	CPE	808	CPB14					
	Lado comprimido	Lado tracionado	Lado comprimido	Lado tracionado	Lado comprimido	Lado tracionado				
Deformação elástica no carregamento	74	77	207	148	151	144				
Fluência total aos 120 dias sob carga	295	670	645	624	604	472				
Recuperação instantânea	70	32	149	146	138	111				
Deformação elástica atrasada após 60 dias da retirada da carga	109	47	164	129	113	93				
Fluxo	190	668	539	497	504	412				
Retração na secagem aos 180 dias	1157		207	74	2853					

Tabela 17: Deformações em pontos típicos do ensaio de fluência na flexão

Os resultados mostram ter havido aumento da fluência total sob compressão na flexão para os compósitos em relação à matriz sem reforço e, semelhante ao observado no ensaio de fluência na compressão (item 4.2.1.2), a variação do teor de polpa, de 8% para 14%, não influenciou consideravelmente no montante desse aumento de fluência sob compressão, na condição de secagem simultânea. Os compósitos com polpa tiveram fluência total, sob compressão na flexão, de cerca de duas vezes a fluência da mistura de referência. Pode-se supor que, com a presença de elevados teores de polpa de bambu, tais como os usados nesses compósitos, a secagem potencializa a fluência sob compressão, de uma maneira que a variação do teor de polpa, de 8% para 14%, não influencia grandemente no resultado final.

Em relação à fluência sob tração na flexão, no entanto, houve redução da fluência total com a inserção da polpa de bambu na mistura, e essa redução foi maior para maiores teores de reforço fibroso. Esse tipo de fluência foi 7% menor para a mistura CPB08 e 30% menor para a mistura CPB14, em relação à matriz sem reforço. Pode-se creditar essa diminuição da fluência dos compósitos à ação das fibras no sentido de restringir as deformações de tração na flexão, para o baixo nível de tensão aplicado, já que, por seu pequeno comprimento, a fibra da polpa de bambu apenas atuaria para conter pequenas deformações e ligar faces de micro-fissuras. Para efeito de comparação dos desempenhos sob fluência na flexão desses materiais, as curvas de evolução das deformações são apresentadas na Figura 134, para as condições de tração e de compressão na flexão.



Figura 134: Curvas de fluência total para as três misturas, sob tração na flexão e sob compressão na flexão

Como foi estabelecido que a tensão aplicada aos corpos-de-prova seria correspondente a 30% da tensão de ruptura de cada mistura, estando, portanto, esse percentual abaixo do limite até o qual a fluência é considerada proporcional à tensão, foi possível calcular a fluência específica para esses materiais. A Tabela 18 apresenta os valores de fluência específica aos 120 dias sob carregamento, permitindo uma comparação entre os desempenhos desses materiais em termos do montante de deformação por unidade de tensão aplicada.

Misturas	Fluência específica (µs/MPa)						
	Compressão na flexão	Tração na flexão					
CPB00	184	419					
CPB08	248	240					
CPB14	431	337					

Tabela 18: Fluência específica sob flexão após 120 dias de carregamento

Pelos resultados mostrados na Tabela 18, percebe-se que o efeito do aumento do teor de polpa na mistura foi o de provocar aumento da fluência específica sob compressão na flexão, com a mistura CPB08 apresentando menor taxa de fluência por unidade de tensão que o CPB14. 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. Isso significa que, ignorando-se as diferenças de valores de resistência mecânica à flexão entre os compósitos e submetendo-os a tensão de mesmo valor, dentro do limite em que há proporcionalidade entre fluência e tensão, haverá tendência a que o compósito com maior teor de polpa apresente maior fluência, tanto na região comprimida quanto na região sob tração, quando comparado ao compósito com menor teor de fibras.

Quanto à recuperação das deformações, os resultados mostraram uma tendência à recuperação imediata, na retirada da carga, de montantes de deformação próximos dos valores da deformação no carregamento, exceto pela face sujeita à tração na flexão nos corpos-de-prova da mistura de referência, cuja recuperação correspondeu a menos da metade da deformação elástica inicial. Uma representação média da decomposição da deformação presente nos corpos-de-prova de cada mistura aos 120 dias de carregamento, pode ser vista na Figura 135,

onde essa deformação, formada pela soma da fluência com a deformação elástica inicial, é subdividida nas parcelas em que se converteram, após a recuperação parcial das deformações, passados 60 dias sem carregamento. Pode-se perceber que, para os compósitos com polpa, a distribuição das parcelas de deformação, recuperáveis e permanente, foi muito semelhante, para os teores de 8% e 14% de polpa, e mesmo para as faces tracionadas ou comprimidas dos corpos-de-prova.

Já para a mistura de referência (CPB00), a distribuição dos tipos de deformação foi muito diversa, para a fluência sob tração na flexão e compressão na flexão. Sob esforço de tração, prevaleceu a deformação permanente (fluxo), com 89% da deformação total, ficando a recuperação imediata e a deformação elástica atrasada consideravelmente diminuídas. Sob compressão na flexão, o comportamento é bem diferente, com o fluxo representando cerca de 51% da deformação total (fluência e deformação elástica inicial). Pode-se supor que, sob esforço de tração, a matriz sem reforço, que é frágil, sofre maiores danos que sob esforço de compressão, e que esses danos se acumulem permanentemente em suas falhas internas, fazendo crescer a parcela de fluxo. Sabe-se que, sob compressão, as falhas têm menor poder concentrador de tensões, conseqüentemente com menores danos à estrutura do material.



Figura 135: Fracionamento da soma da deformação elástica e fluência sob flexão, após completada a recuperação das deformações

4.3 Fratura

4.3.1 Caracterização do comportamento à fratura

Curvas carga-deslocamento de cada mistura ensaiada, obtidas dos ensaios de flexão em quatro pontos de vigotas sem entalhe e com entalhe, são mostradas nas Figuras 136 e 137, respectivamente. Para os corpos-de-prova entalhados, foram medidas as cargas e os deslocamentos de abertura da boca da trinca (*crack mouth open displacement* – CMOD), a cada instante do ensaio, enquanto que, para os elementos sem entalhe, foram medidas as cargas e os deslocamentos nos pontos de aplicação da carga (terços médios). As curvas dos ensaios individuais de cada corpo-de-prova constam do Apêndice B. Os resultados estão mostrados nas Tabelas 19 e 20, respectivamente, para as condições sem entalhe e com entalhe.



Figura 136: Curvas *P-deslocamento* para CPB00, CPB08 e CPB14 dos ensaios de flexão de vigotas sem entalhe



Figura 137: Curvas *P-CMOD* para CPB00, CPB08 e CPB14 dos ensaios de flexão de vigotas com entalhe

Para os ensaios com corpos-de-prova entalhados, na ausência de padrões adequados para compósitos, foi usado nesse trabalho o procedimento recomendado pela ASTM, descrito por Konish (1972), para encontrar o ponto de carga P_Q nos gráficos *P-CMOD*, correspondente ao início do crescimento estável da trinca. Os gráficos individuais de cada corpo-de-prova entalhado ensaiado, com a aplicação desse método gráfico, constam do Apêndice B, no item B.2. Esse valor de carga, P_Q , foi utilizado para o cálculo do fator de intensidade de tensões do *Modo I*, K_Q , tomado como um valor parcial da tenacidade na fratura, correspondente ao início do crescimento da trinca, que se baseia comprimento inicial do entalhe (a_0), conforme a eq. (98).

$$K_{Q} = \frac{P_{Q}L}{BW^{2}} \sqrt{\pi a_{0}} \cdot F\left(\frac{a_{0}}{W}\right)$$
(98)

onde,

 a_0 – comprimento inicial da trinca;

- L comprimento do vão livre;
- B largura da viga com entalhe;
- W altura da viga com entalhe;

 $F\left(\frac{a_0}{W}\right)$ - função da geometria da peça. Para flexão pura, essa função é dada conforme a eq. (99) (Dally e Riley, 1991).

$$F\left(\frac{a_0}{W}\right) = 1,122 - 1,40 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right) + 7,33 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 - 13,08 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^3 + 14,0 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^4$$
(99)

Material	Limite	e de prop	porciona	lidade	Ponto máximo da curva						Energia Esp.	
	$P_{LP}(N)$		v (mm)		P _{max} (N)		v (mm)		MOR (MPa)		EE (kJ/m ²)	
	Mádia	Desv.	Mádia	Desv.	Mádia	Desv.	Mádia	Desv.	Mádia	Desv.	Mádia	Desv.
	Media	médio	Media	médio	Media	médio	Media	médio	Media	médio	wiedła	médio
CPB00	1908	124	0,339	0,034	1908	124	0,339	0,034	4,96	0,36	0,27	0,06
CPB08	2622	47	0,552	0,038	2758	95	0,601	0,024	7,50	0,26	0,78	0,04
CPB14	1552	184	0,797	0,019	1630	146	0,895	0,063	4,43	0,40	0,96	0,09

Tabela 19: Propriedades mecânicas à flexão dos compósitos em ensaios com corpos-de-prova prismáticos sem entalhe

Tabela 20: Propriedades mecânicas à flexão dos compósitos em ensaios com corpos-de-prova prismáticos com entalhe

Material	Condições na carga correspondente ao						Condições no ponto de carga máxima					
	início do crescimento da trinca							(carga crítica)				
	$P_Q(N)$		CMOD _Q		K _Q		$P_{c}(N)$		CMODc			
			(mm)		(Mpa.m ^{1/2})				(mm)		FSE	
	Média	Desv.	Média	Desv.	Média	Desv.	Mádia	Desv.	Média Desv. médio	Desv.		
		médio		médio		médio	wicula	médio		médio		
CPB00	460	66	0,015	0,003	0,34	0,05	500	63	0,019	0,002	0,26	
CPB08	1050	82	0,064	0,010	0,77	0,06	1279	90	0,153	0,019	0,46	
CPB14	1021	184	0,095	0,022	0,75	0,14	1238	212	0,219	0,074	0,76	

Nos corpos-de-prova sem entalhe, a inserção do teor de 8% de polpa de bambu em relação à massa de cimento levou a uma melhoria considerável da resistência à flexão, chegando a 51% de aumento, comparando-se com a matriz sem reforço. Porém, para o teor de 14% de polpa, não houve benefício para essa propriedade mecânica, levando à suposição de que a dificuldade em garantir a homogeneidade do material e a maior porosidade, resultantes da presença massiva de fibras, responderam pela introdução de falhas, em maior escala, no interior do material, prejudicando seu desempenho mecânico. A capacidade de deformação e a tenacidade, porém, foram sempre crescentes com o aumento do teor de polpa de bambu.

Como esperado, os valores do módulo de ruptura determinados nesses ensaios foram inferiores aos obtidos, para esses mesmos compósitos, em trabalhos anteriores, por Dos Anjos(2002), Brescansin (2003) e Rodrigues (2004), nos quais o tipo de ensaio adotado foi o de flexão em três pontos. Além disso, as geometrias e dimensões dos corpos-de-prova foram bastante diferentes das usadas no presente estudo. Sabe-se que os valores de módulos de ruptura são fortemente influenciados pelas condições de ensaio. Os valores obtidos nos citados trabalhos podem ser vistos na Tabela 21. Pelos efeitos combinados das diferenças nas formas de carregamento, seção transversal e dimensões do elemento, houve dificuldade em conduzir uma análise que pudesse concluir se os resultados de *MOR* obtidos nesse trabalho estão proporcionalmente condizentes com os de trabalhos anteriores, com as mesmas misturas.

	Teor de polpa	Condição de	Corpo-de-prova (dimensões er	MOR	
Referência	do compósito	carregamento	Seção transversal (alturaxlargura)	Vão livre	médias (MPa)
Dos Anjos	8%	3 pontos	6,0 x 36,5	100	14,80
(2002)	14%	3 pontos	6,0 x 36,5	100	8,40
Brescansin	8%	3 pontos	50,0 x 45,0	270	13,90
(2003)	14%	3 pontos	50,0 x 45,0	270	8,10
Rodrigues (2004)	8%	3 pontos	6,0 x 38,0	100	15,53
Esse	8%	4 pontos	50,0 x 25,0	170	7,50
trabalho	14%	4 pontos	50,0 x 25,0	170	4,43

Tabela 21: Valores de MOR de compósitos cimentícios com polpa de bambu e variáveis de ensaio

Segundo Young e Budynas (2002), é usual que se utilize a fórmula para tensões elásticas no cálculo da tensão de ruptura em uma viga. Mesmo não sendo o resultado (módulo de ruptura) uma tensão verdadeira, pode-se utilizá-lo para prever a resistência de uma viga similar de mesmo material. Porém, se outra viga de mesmo material, mas de seção transversal, relação vão livre/altura e modo de carregamento diferente, for testada, o módulo de ruptura encontrado será diferente. Quando o momento máximo à flexão ocorre em somente uma seção, como no caso de carregamento concentrado em um ponto, o módulo de ruptura é maior do que quando o momento máximo se estende por uma parte considerável do vão livre.

Como exemplo, o módulo de ruptura de vigas curtas de material frágil é cerca de 20% superior, quando determinado por carregamento concentrado no centro do vão, em relação à condição de carregamento nos terços médios. Essa diferença diminui com o aumento da relação entre o vão e a altura da viga. Vigas de grande relação largura/altura, tais como faixas de chapas finas metálicas, devido ao grau de impedimento da deformação lateral que normalmente acompanharia as tensões na flexão, são mais rígidas do que as fórmulas para tensões elásticas indicam (op. cit.).

Encontra-se, ainda, no trabalho de Jenq e Shah (1986) uma menção de que tem sido observado que o módulo de ruptura (*MOR*), calculado da carga máxima observada num ensaio com vigas e usando a teoria da elasticidade, é maior que a resistência à tração uniaxial e diminui como aumento da altura da viga.

Nos ensaios com corpos-de-prova com entalhe, nota-se, a princípio, uma melhoria considerável no comportamento à flexão dos compósitos com polpa de bambu em relação à matriz sem reforço, evidenciada pelo acréscimo nos valores de carga correspondentes aos pontos de limite de proporcionalidade e máximo das curvas. Entretanto, entre os teores de 8% e 14% de polpa, não houve variação significativa em termos de resistência à flexão. Em conseqüência disso, o mesmo se deu em relação ao fator de intensidade de tensões no início do crescimento da trinca, K_Q . Com a adição do reforço fibroso, esse valor mais do que dobrou, comparado ao da matriz sem reforço, mas entre os dois compósitos de teores de polpa diferentes, quase não houve variação.

Com relação ao deslocamento de abertura da boca da trinca, com aumento do teor de polpa no compósito, houve considerável incremento. Os compósitos com 8% e com 14% de polpa tiveram esse deslocamento, correspondente à carga máxima, 8 vezes e 11,5 vezes maior que aquele da mistura de referência, respectivamente. A influência do teor de fibras sobre o fator de sensibilidade ao entalhe, *FSE*, foi marcante, como mostra a Figura 138. 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, sendo o *FSE* da pasta de cimento de quase um terço do apresentado pelo compósito. O aumento do teor de polpa, de 8% para 14%, proporcionou significativa moderação do efeito do entalhe.



Figura 138: Influência do teor de polpa de bambu sobre a sensibilidade do compósito à presença do entalhe

Foi observado que, para esses compósitos, a ruptura devido à propagação da trinca é precedida por um considerável amolecimento (*softening*). Para obter a evolução de parâmetros de fratura com o crescimento da trinca, e não somente o valor da tenacidade na carga de pico, foram traçadas as curvas de resistência (curvas-R) para cada corpo-de-prova de cada mistura, por se tratar e um método simples, baseado na MFLE, capaz de representar, em grande extensão, o comportamento dos materiais. As curvas *P-CMOD* obtidas experimentalmente foram usadas para determinar as curvas-R. A partir desses dados, foram calculados os parâmetros de fratura, usando procedimento semelhante ao aplicado por Ferreira et al. (2002) para o estudo do comportamento à fratura em rochas, conforme descrito no item 2.3.2.3.

Para cada mistura, são apresentadas, nas Figuras 139 a 144, dois gráficos, relativos a um dos corpos-de-prova. O primeiro gráfico de cada mistura mostra, simultaneamente, a relação *P-CMOD* e a relação entre os valores dos fatores de intensidade de tensões da curva-R (K_{IR}) com os correspondentes deslocamentos de abertura da boca da trinca (*CMOD*), buscando a identificação dos valores de K_{IR} em pontos típicos da curva *P-CMOD*. O segundo mostra a curva que relaciona a evolução do fator de intensidade de tensões, K_{IR} , com o aumento da razão α , entre o comprimento da trinca, a, e a altura do corpo-de-prova W. Os gráficos dos demais corpos-de-prova encontram-se no Apêndice C.



Figura 139: Curva-R e curva P-CMOD para CPB00



Figura 140: Curva-R em função da razão *a/W* para CPB00



Figura 141: Curva-R e curva P-CMOD para CPB08



Figura 142: Curva-R em função da razão *a/W* para CPB08



Figura 143: Curva-R e curva P-CMOD para CPB14



Figura 144: Curva-R em função da razão a/W para CPB14

Na matriz sem reforço (CPB00), 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 sendo possível obter um valor para esse parâmetro que se mantivesse constante. Para os compósitos com fibras, foi observado comportamento bastante diverso do apresentado pela matriz. Os valores de K_{IR} foram determinados até o ponto da porção descendente da curva *P-CMOD* que correspondesse à cerca de 40% da carga máxima. Os valores de K_{IR} aumentaram com o aumento da carga, na fase anterior à carga de pico, e seguiram aumentando na primeira fase do regime pós-pico, alcançando então um valor relativamente constante, para um certo intervalo de extensão do comprimento da trinca, durante o amolecimento. As médias desses valores de K_{IR} no platô da curva, para os dois compósitos com fibras, CBP08 e CPB14, ficaram bem próximos, tendo sido de 1,88 MPa.m^{1/2} e 1,84 MPa.m^{1/2}, respectivamente. Após esse intervalo do platô, havendo crescimento exacerbado do comprimento da trinca, o valor de K_{IR} sofre certo decréscimo. A presença das fibras tornou possível registrar resistência a cargas por parte dos corpos-de-prova de compósitos, mesmo quando a trinca teve seu comprimento bastante aumentado, a ponto de quase romper toda a seção do ligamento (*W-a*).

A aparência das superfícies de fratura dos corpos-de-prova sugere que, para a matriz sem reforço, o mecanismo de fratura foi mais intensamente dominado pela presença do entalhe inicial do que para os compósitos. Na Figura 145, observa-se que o caminho seguido pela trinca durante o crescimento, na matriz sem reforço, foi aproximadamente coplanar com o entalhe inicial, diferentemente do compósito com 8% de polpa, cuja trinca seguiu caminho bastante tortuoso. A Figura 146 apresenta o perfil tortuoso do caminho percorrido pela abertura da trinca num corpo-de-prova de CPB14.



Figura 145: Superfícies de fratura para CPB08 e CPB00



Figura 146: Perfil de fratura em CPB14

4.3.2 Análise da fratura por microscopia eletrônica

Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostras das faces de fratura de corpos-de-prova das três misturas (CPB00, CPB08 e CPB14), rompidos sob flexão, são mostradas nas Figuras 147(a-b) a 149(a-b). Analogamente ao que foi assinalado por Rodrigues (2004), percebeu-se que o alto teor de fibras nos compósitos acarretou dificuldades e limitações à observação das imagens ao microscópio, tornando custosa a tarefa de buscar pontos de tomada de imagens que pudessem levar a uma análise, com maior embasamento, do processo de fratura desses materiais.



(a) (b) Figura 147(a-b): Superfície de fratura da mistura de referência - CPB00

As imagens das Figuras 147a e 147b, da superfície de fratura de um corpode-prova de pasta de cimento evidenciam o aspecto rugoso e presença de poros.



Figura 148(a-b): Superfície de fratura do compósito com 8% de polpa de bambu - CPB08

A Figura 148a, da superficie de fratura de um corpo-de-prova de CPB08 mostra a ocorrência de arrancamento (*pull out*) de fibras, com fragmentos de matriz aderidos à trechos de fibras soltos e dependurados, assim como a presença de marcas das posições ocupadas anteriormente pelas fibras na matriz. Há, também, a presença de fibras quebradas. O processo de arrancamento contribui fortemente para o incremento da tenacidade à fratura do material. Na Figura 148b, podem ser vistos poros de tamanho muitas vezes maior que o diâmetro das fibras. O incremento da porosidade é uma conseqüência da inserção de altos teores de fibra na mistura, como nos compósitos estudados.



Figura 149(a-b): Superfície de fratura do compósito com 14% de polpa de bambu – CPB14

A alta concentração de fibras no compósito com 14% de polpa de bambu pode ser percebida nas Figuras 149a e 149b. São vistas fibras arrancadas, quebradas e descoladas lateralmente, sendo que esse último processo não contribui para a resistência e tenacidade. A presença de resíduos da matriz aderidos à superfície das fibras pode ser indicadora de boa aderência entre fibras e matriz. Não foi percebido, até então, sinal de degradação das fibras vegetais na matriz cimentícia.