

3 Procedimento experimental

3.1 Materiais utilizados

A polpa de bambu usada nesse estudo foi fornecida pela indústria de celulose e papel Itapagé, do estado do Maranhão, Brasil, obtida por processo Kraft e refinada, com aspecto de flocos de pequenas fibras (Figura 24). Para essa polpa, Rodrigues (2004) determinou um comprimento médio de fibras de 1,47 mm e um diâmetro da ordem de 20 μm , com fator de forma (l/d) de aproximadamente 73,5. O ensaio para determinação da distribuição do tamanho das fibras, pelo método Kajaani, revelou a presença de 12,71% de partículas finas (menores que 0,2 mm), quantidade considerada significativa (Rodrigues 2004). A absorção de água máxima, determinada por dos Anjos (2002), foi de 589%, valor esse que se mantém constante após cerca de três dias de imersão das fibras em água. O procedimento adotado para essa medida consistiu em submergir a polpa seca em água e determinar sua massa em intervalos estabelecidos. A polpa úmida, antes da determinação da massa, foi passada em uma peneira de abertura de malha de 0,15 mm e espalhada sobre papel absorvente para retirar o excesso de água entre as fibras.



Figura 24: Aspecto da polpa Kraft refinada de bambu

O cimento usado foi do tipo Portland com adição de filler calcário (CP II F-32), da marca Mauá, cuja finura foi medida pelo método do peneiramento descrito na norma NBR 11579 da ABNT (1991), resultando num resíduo de 4,5% na peneira número 200 (abertura da malha de 75 μm). A resistência à compressão do

cimento aos 28 dias, medida através do procedimento contido na norma NBR 7215 (ABNT 1996), resultou em 42,52 MPa.

Foi utilizada, em uma série de corpos-de-prova para medida da retração livre, polpa Kraft de sisal comercial, fornecida pelo grupo de pesquisa da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Construções Rurais e Ambiente, da Universidade de São Paulo. Essa polpa apresentava-se sob a forma de cartão. Estudo de Savastano et al. (2003) apresentou, para a polpa Kraft de sisal, valores de comprimento e largura das fibras de 1,66 mm e 13,5 μ m, respectivamente. A relação de aspecto resultou igual a 123.

A cinza de casca de arroz, utilizada em duas séries de corpos-de-prova nos ensaios de retração livre, substituindo parcialmente o cimento, foi a mesma utilizada por Rodrigues (2004), apresentando alto teor de carbono, o que lhe confere uma cor negra. A Tabela 9 apresenta a composição química dessa cinza. Foi usada água da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro, Estado do Rio de Janeiro, Brasil, em todas as misturas.

Tabela 9: Composição da cinza de casca de arroz

Constituintes	SiO ₂ total	SiO ₂ amorfa	SiO ₂ cristalina	C	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Teor (%)	73,6	51,2	22,4	22,9	0,075	0,255	0,27	0,755	0,09	1,165

Os compósitos receberam denominação composta por três letras, indicando tratar-se de compósito cimentício com polpa de bambu (CPB), ou com polpa de sisal (CPS), seguidas de um número de dois algarismos, indicando o percentual em massa de polpa em relação à massa de cimento (CPB00, CBP08, CPB10, CPB12, CPB14, CPS08). Quando foi usada cinza de casca de arroz, substituindo parcialmente o cimento, foram acrescidas ao final dessa denominação a letra “A” (cinza de casca de arroz) e um número de dois algarismos indicando o percentual de substituição de 15% ou 30% (CPB08A15, CPB08A30).

3.2 Produção dos compósitos

Para a produção dos corpos-de-prova foi adotado o processo HATSCHEK modificado, proposto por Cambell e Coutts (1980), que procura reproduzir o método utilizado para fabricar o cimento-amianto. Em todos os experimentos

desse estudo, foi aplicado vácuo a uma mistura bastante fluida de aglomerante, água e polpa, colocada num molde (câmara de vácuo), resultando numa placa de dimensões 120 mm x 120 mm, ou de dimensões 400 mm x 400 mm, que eram as dimensões das duas câmaras de moldagem a vácuo disponíveis, e espessura de cerca de 8 mm.

As placas menores foram obtidas por vácuo e, ainda úmidas, foram despedaçadas para possibilitar o preenchimento dos moldes para corpos-de-prova de diversos formatos (prismáticos, cilíndricos e anéis), já que os ensaios, em sua maioria, não poderiam ser feitos com corpos-de-prova em forma de placa fina. Os ensaios que utilizaram corpos-de-prova em forma de placas foram os de reversibilidade da retração (placas de 400 mm x 400 mm cortadas nas dimensões de 250 mm x 250 mm) e de flexão e fluência na flexão (placas de 120 mm x 120 mm, cortadas nas dimensões 40 mm x 120 mm).

Para a produção das placas, a polpa utilizada como reforço foi seca em estufa até constância de massa, em teores dados em percentagem de polpa em relação à massa de cimento. Após isso, a polpa foi deixada submersa em água, por 24 horas. A seguir, foi adicionada uma maior quantidade de água, até que se tivesse uma relação de cerca de 100 ml de água para 1,0 g de polpa seca, e foi aplicada forte agitação mecânica (2000 rpm) por 15 minutos (Figura 25). A dispersão foi filtrada, para retirar o excesso de água, foi envolta em filme plástico e colocada sob refrigeração por, pelo menos, 24 horas, tendo sido mantida com umidade em torno de 70 a 80% em relação à massa úmida. Esse processo mostrou-se apto à obtenção de um nível de homogeneidade aceitável para a dispersão, pois não eram percebidos, visualmente, grumos de fibras.



Figura 25: Dispersão da polpa em água

No momento da moldagem dos corpos-de-prova, a polpa úmida foi novamente dispersa em água, por mais 5 minutos, adicionou-se o cimento e, novamente, foi feita dispersão para a mistura final. A dispersão de polpa e cimento em água foi vertida na câmara de moldagem, foi submetida a vácuo por cerca de dois minutos, até que fosse percebido que a superfície estava seca. Na metade do tempo de aplicação do vácuo, foi feita a compactação do material através de soquete. A Figura 26 apresenta o sistema utilizado para essa moldagem.

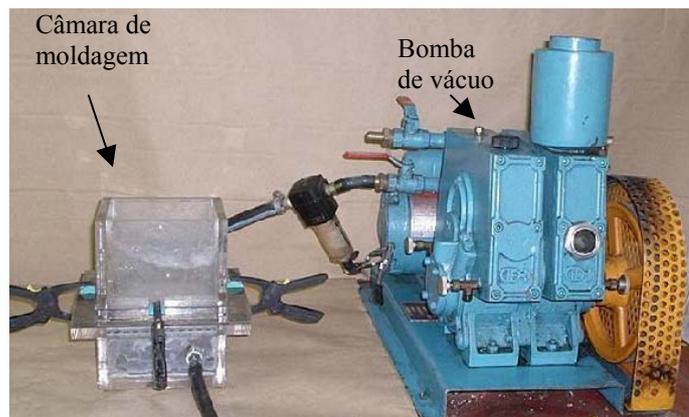


Figura 26: Sistema de aplicação de vácuo

Para a produção dos corpos-de-prova em forma de placas finas (ensaios de reversibilidade da retração, flexão e fluência na flexão), as placas foram retiradas da câmara de moldagem, colocadas entre duas placas de aço, intercaladas com papel absorvente, e empilhadas até se ter seis placas de compósito. Após isso, foi aplicada compressão de 3,2 MPa por 5 minutos para propiciar a saída do excesso de água ainda presente após a aplicação do vácuo (Figura 27). Para o ensaio de reversibilidade da retração, foram usadas placas maiores, de 400 mm x 400 mm x 6 mm, e a compressão foi aplicada em cada uma delas separadamente.

Para a produção dos corpos-de-prova com outras formas geométricas, o material produzido na câmara de moldagem foi reduzido, manualmente, a pequenos pedaços usados para preencher os moldes que deram a forma final aos elementos e, dentro dos moldes, o material foi submetido à compressão para permitir a saída do excesso de água que ainda restou após o vácuo. Os moldes eram dotados de aberturas através das quais o excesso de água era expulso. Adotou-se maior tensão de compressão na moldagem para corpos-de-prova de maior altura, como para os cilindros de altura de 100 mm, para os quais foram aplicados 5 MPa de compressão, seguindo critério adotado por dos Anjos (2002).



Figura 27: Aplicação de compressão na moldagem das placas

Como os compósitos estudados foram todos compostos de matriz de pasta de cimento, a mistura tomada como referência foi a pasta de cimento. Os corpos-de-prova da mistura de referência foram feitos com pasta de cimento de relação água/cimento igual a 0,30, tendo sido adotado o mesmo processo de adensamento, durante o preenchimento dos moldes, utilizado para os compósitos. A adoção da relação água/cimento advém do fato de que os compósitos com reforço de polpa de bambu, após a compressão na moldagem, passam a ter aproximadamente essa proporção entre água e aglomerante, conforme medido experimentalmente, considerando as massas do corpo-de-prova, após a moldagem, e dos materiais secos que compunham a mistura.

Nesse trabalho, foram feitas as determinações experimentais das relações água/cimento das misturas conforme descrito por Rodrigues (2004). O valor médio adotado para esse parâmetro está sujeito às variações inerentes a esse método.

Os teores de polpa vegetal se situaram entre 8% e 14% em relação à massa de aglomerante, pois estudo anterior (dos Anjos, 2002) mostrou que, para os compósitos, a resistência máxima à flexão foi obtida para o teor de 8% de polpa refinada de bambu, enquanto que a maior tenacidade foi obtida para o teor de polpa de 14%.

3.2.1 Fração volumétrica das fibras no compósito

Há dificuldades em expressar as composições desses compósitos em termos de fração volumétrica das fibras, que é a forma mais usual. Primeiramente, pela

pouca precisão que se tem da quantidade de água que restou no material, com o método de vácuo e compressão adotado para a moldagem. Essa quantidade de água influencia na proporção de matriz presente no compósito, já que se trata de uma mistura de cimento Portland e água.

Outra dificuldade vem da própria natureza cimentícia dos compósitos. A fração volumétrica das fibras é dada pela relação entre o volume das fibras e o volume do compósito. Ocorre que o volume do compósito cimentício é variável desde o estado fresco, devido aos diferentes tipos de retração a que está sujeito.

Poderia ser estabelecido que a fração volumétrica de fibras é referida ao material no estado fresco, logo após moldagem. Assim, supondo que a quantidade de água que resta no compósito, após a moldagem, corresponde a 30% da massa de cimento e desprezando o teor de vazios na mistura, poderiam, grosseiramente, ser determinadas as frações volumétricas das fibras para as misturas. Nesse estudo, foi feito um ensaio para medida da massa específica real da polpa de bambu, utilizando-se um frasco de Chapmam, tendo sido obtido um valor de aproximadamente $1,60 \text{ g/cm}^3$. Pela eq. (34), é possível fazer a composição do volume do compósito, em termos de volumes reais (volumes de “cheios”) dos componentes, supondo que a água preenchesse todos os vazios entre os grãos de cimento e que a pasta de cimento preenchesse os vazios das fibras.

$$V_c = V_{cim}^r + V_f^r + V_a \quad (34)$$

onde:

V_{cim}^r é o volume real do cimento;

V_f^r é o volume real de fibras;

V_a é o volume de água.

Exemplificando o cálculo para a mistura CPB08 e tomando a massa específica real do cimento igual a $3,10 \text{ g/cm}^3$, tem-se que, para a massa de 120 g de cimento usada para produzir cada placa quadrada de 120 mm de lado, o volume real de cimento é de $38,71 \text{ cm}^3$ e o volume real das fibras é de $6,00 \text{ cm}^3$. O volume de água corresponde a $36,00 \text{ cm}^3$. O volume do compósito resultaria em $80,71 \text{ cm}^3$. Portanto, a fração volumétrica das fibras seria de 7,43%. Para a mistura CPB14, a fração volumétrica das fibras assim calculada resultaria em 12,32%.

3.3 Ensaio de retração

3.3.1 Retração plástica

3.3.1.1 Caracterização da pega do compósito – evolução do calor de hidratação

Devido às características reológicas peculiares, apresentadas pelo compósito de pasta de cimento reforçada com polpa de bambu, moldado conforme já descrito, tornou-se inviável a caracterização dos tempos de início e fim de pega por métodos como o da penetração da agulha de Vicat (ABNT 2003). A consistência bastante seca, após aplicação do vácuo e compressão na moldagem, dificulta a aplicação de métodos usuais de medida da alteração da consistência, usada como parâmetro indicador dos pontos característicos da evolução das reações de hidratação.

Foi adotada uma adaptação das recomendações contidas na norma NBR 12006 (ABNT, 1990), que apresenta um procedimento para determinação do calor de hidratação em argamassas, pelo método da garrafa de Langavant. Nesse ensaio, mede-se continuamente o calor de hidratação do material ao longo dos primeiros sete dias. O calorímetro semi-adiabático (garrafa de Langavant), utilizado no ensaio, consiste de uma ampola de vidro de parede dupla espelhada e com forte vácuo entre as paredes, com dimensões interiores de 92 ± 2 mm de diâmetro e 280 mm de altura. A Figura 28 apresenta um desses calorímetros e o aparato em funcionamento, com sistema de aquisição automática de dados.

O compósito, produzido por aplicação de vácuo e compressão, foi colocado em recipiente cilíndrico metálico de paredes de $0,20 \pm 0,02$ mm de espessura, cuja tampa possuía um orifício central para a passagem de um termopar. Como o recipiente tinha que ser estanque, não havia possibilidade de aplicar a compressão na moldagem com o material dentro do recipiente. Assim, o material foi conformado por compressão, sob a forma de placas de 120 mm x 120 mm x 6 mm, que foram despedaçadas e cujos pedaços foram usados para preencher o

recipiente, em três camadas, adensadas vigorosamente com 60 do soquete padrão NBR 7215.

Foi inserido no material um tubo de ensaio de diâmetro 10 mm e 100 mm de comprimento, contendo de 2 a 3 ml de óleo, no qual foi introduzida a extremidade do termopar. O recipiente foi introduzido na garrafa de Langavant, que foi imediatamente fechada. Anotou-se o tempo transcorrido desde o contato da água de amassamento com o cimento do compósito e a leitura inicial, feita logo após o fechamento da garrafa.

O ensaio foi feito para a mistura de referência e para o compósito com 8% de polpa de bambu. As quantidades utilizadas desses materiais foram tais que o teor de cimento permanecesse constante em todas as amostras. A mistura de referência foi composta por pasta de cimento com fator água/cimento igual a 0,30.

Foi utilizada, simultaneamente, uma segunda garrafa contendo uma mistura com idade mínima de 60 dias, do mesmo material analisado, compósito ou pasta de cimento, designada por garrafa testemunho. As temperaturas foram medidas em ambas as garrafas, simultaneamente, para cada mistura, sendo o aquecimento, no instante t , registrado como a diferença entre as temperaturas no material de ensaio (θ_1) e as temperaturas na mistura com idade mínima de 60 dias (θ_2). Foi utilizado aparelho de aquisição automática de dados para coleta dos dados de temperatura medidos pelos termopares em intervalos de 15 minutos. Os ensaios tiveram duração de 7 dias. Foram traçadas as curvas da temperatura de aquecimento, $f_1(t)$, dada pela eq. (35); do calor dissipado, $f_2(t)$, dado pela eq. (36), sendo α o coeficiente de perda calorífica do calorímetro, em $J.h^{-1}.^{\circ}C^{-1}$; e do calor de hidratação, $Q(t)$, a cada tempo t , dado pelas eqs. (37) e (38), nas quais, M é a capacidade calorífica total do calorímetro e da amostra, c é a massa de cimento contida na mistura, ar é a massa de areia, a é a massa de água, r é a massa do conjunto do recipiente metálico mais a tampa e μ é a capacidade térmica do calorímetro. Foram determinados os tempos de início e final de pega para a pasta de cimento e para o compósito com polpa de bambu.

$$f_1(t) = \theta(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t) \quad (35)$$

$$f_2(t) = \alpha.\theta(t) \quad (36)$$

$$Q(t) = \frac{M}{c} \cdot \theta(t) + \frac{1}{c} \int_0^t \alpha \cdot \theta(t) \cdot dt \quad (37)$$

$$M = 0,75(c + ar) + 3,76 \cdot a + 0,50 \cdot r + \mu \quad (38)$$

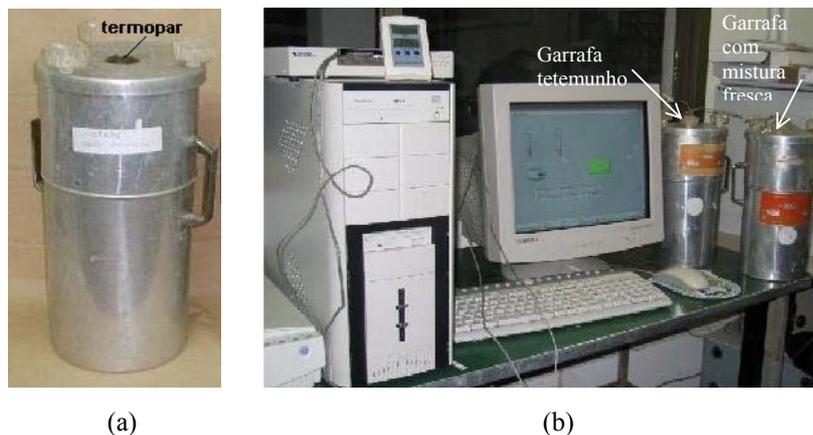


Figura 28: Garrafa de Langavant (a). Sistema de aquisição de dados em ensaio de calor de hidratação (b)

3.3.1.2 Ensaio de retração plástica

Foi caracterizado o comportamento quanto à retração plástica dos compósitos com diferentes teores de polpa de bambu, variando entre 8% e 14% em massa em relação à massa de cimento, dispersas em matriz de pasta de cimento. Buscou-se comparar o desempenho desses compósitos entre si e com a matriz sem reforço. A geração de dados acerca do comportamento dessas misturas sob retração plástica pode vir a contribuir na seleção da composição adequada, sob condições em que a retração plástica seja considerada como fator relevante, como quando há grande área do componente, ainda fresco, exposta a atmosfera de secagem ou remoção precoce dos moldes.

Muitos são os métodos utilizados para medir retração plástica em misturas à base de cimento (Ravina e Shalon 1968, Sanjuán e Moragues 1994, ASTM, 1987, Slowik et al. 2003), não havendo, aparentemente, correlação entre os resultados obtidos. Segundo Brüll et al. (1980), o fato da retração do material no estado plástico não ser tão investigada quanto no estado endurecido se deve às dificuldades encontradas em realizar as medidas. O método aplicado nesse

trabalho (ASTM, 1987) possibilita a determinação das variações de altura, desde a moldagem até o endurecimento, de corpos-de-prova cilíndricos de misturas cimentícias, incluindo retração ou expansão devidas à hidratação, assentamento, evaporação da água e outros efeitos físicos e químicos.

3.3.1.2.1

Misturas utilizadas

Foram empregadas cinco misturas, incluindo a mistura de referência composta apenas por pasta de cimento com relação água/cimento 0,30. As outras quatro misturas foram compostas por pasta de cimento reforçada com polpa refinada de bambu, com teores de polpa de 8%, 10%, 12% e 14% em relação à massa do cimento.

Os ensaios de retração plástica foram feitos em corpos-de-prova moldados em formas cilíndricas, com altura de 100 mm e seção transversal circular de diâmetro 50 mm, com o material ainda fresco mantido dentro dos moldes. Para moldagem, foi utilizado o método proposto por dos Anjos (2002). As placas, produzidas conforme 3.2, foram despedaçadas manualmente e esse material foi colocado no molde cilíndrico metálico em quatro camadas, sendo cada uma delas adensadas com 60 golpes com o soquete padrão NBR 7215. Num equipamento de aplicação de carga, o material foi submetido a uma pressão de 5 MPa durante 5 minutos, permitindo a saída do excesso de água através da abertura na geratriz do cilindro metálico e na região de contato entre o molde e a placa metálica que serve de base.

Para os ensaios de retração plástica, foram utilizados dois corpos-de-prova para cada tipo de mistura. As operações para produção dos corpos-de-prova com materiais compósitos demandavam um período de tempo de cerca de 30 minutos, após a junção do cimento com a dispersão aquosa de polpa, tendo sido esse o tempo padrão adotado para início das medidas em todos os testes. Durante a realização dos testes, foram monitoradas as condições de temperatura e umidade relativa ambientais, cujos valores de médias e desvios médios são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Médias e desvios médios de temperaturas e umidades relativas ambientais

Material	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)	
	Média	Desvio médio	Média	Desvio médio
Matriz sem reforço	26,80	0,319	71,31	1,043
Compósito com 8% de polpa	26,97	0,049	63,97	0,605
Compósito com 10% de polpa	26,05	0,446	65,00	0,438
Compósito com 12% de polpa	26,23	0,064	72,34	1,035
Compósito com 14% de polpa	26,15	0,169	72,59	1,050

3.3.1.2.2

Descrição do aparato e procedimento utilizado

O aparato descrito no método ASTM C 827-87 (ASTM 1987) permite medir os deslocamentos verticais do material no estado plástico, através de medidas dos deslocamentos da sombra provocada pela incidência de um feixe de luz contra uma pequena esfera indicadora colocada sobre a superfície superior do material moldado. A sombra da esfera tem suas dimensões aumentadas de 90 a 110 vezes pela passagem do feixe de luz por um sistema com duas lentes de aumento, sendo uma de projeção e outra de retransmissão, embutidas em um tubo fechado. Na Figura 29 pode ser visto um desenho esquemático desse aparato, com dois sistemas de lentes, permitindo medidas simultâneas da variação da altura em dois corpos-de-prova.

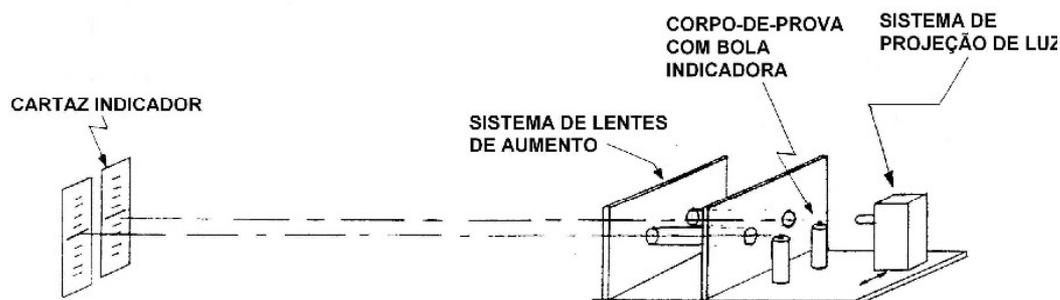


Figura 29: Esquema do aparato para medida da variação da altura. Fonte: ASTM (1987)

A sombra da esfera é projetada num cartaz branco contendo uma escala graduada com subdivisões de 2 mm, localizado a cinco metros do sistema de lentes. A esfera utilizada como indicador dos deslocamentos apresentou diâmetro de 12 mm e densidade de $0,91 \text{ g/cm}^3$. A Figura 30 mostra o aparato, preparado conforme recomendações contidas no método citado e utilizado nesses ensaios.



Figura 30: Aparato montado conforme ASTM C 827

O material permanece confinado no molde cilíndrico, não estando completamente livre de restrições. Além disso, o grau de restrição a que o corpo-de-prova está submetido varia com a viscosidade e grau de endurecimento da mistura (ASTM 1987). Portanto esse método é mais apropriado para propósitos comparativos, tais como os almejados nessa investigação, do que para chegar a valores absolutos dessa propriedade.

Antes de proceder às medidas, os dois sistemas de lentes foram calibrados, utilizando-se corpos-de-prova simuladores já endurecidos, para determinação da magnificação das sombras promovidas pelos sistemas, para uma determinada localização dos corpos-de-prova.

Os deslocamentos da sombra de cada esfera indicadora começaram a ser medidos 30 minutos após o cimento ser posto em contato com a água da dispersão das fibras e foram registrados em intervalos regulares de tempo, de acordo com as recomendações da ASTM C 827–87, até a medida final tomada após 290 minutos do início. Dada a possibilidade de retardo das reações de endurecimento provocada pela presença das fibras vegetais no compósito, foram feitas medidas após 24 horas do início do ensaio, para permitir a verificação da tendência à retração plástica em períodos maiores que o previsto na norma adotada para o ensaio. As variações das alturas dos corpos-de-prova foram calculadas pela eq. (39).

$$\Delta H = \left[\frac{I}{M \cdot H} \right] \cdot 100 \quad (39)$$

onde:

ΔH é a variação da altura expressa em porcentagem, positiva para expansão e negativa para contração;

I é a leitura no cartaz indicador em milímetros, positiva para expansão e negativa para contração;

H é a altura inicial do corpo-de-prova, em milímetros;

M é a magnificação do sistema de lentes.

3.3.2

Retração na secagem

Foram feitos ensaios de medida da retração livre, usando corpos-de-prova prismáticos, e de retração restringida com corpos-de-prova do tipo “anel”. As escolhas dos tipos de ensaio adotados se basearam nas experiências encontradas na literatura técnica, levando-se em conta as peculiaridades do compósito moldado por vácuo e compressão.

3.3.2.1

Retração livre

A retração livre dos compósitos foi determinada através de procedimento que permitiu a medida da variação do comprimento em corpos-de-prova prismáticos, de seção transversal quadrada de lado igual a 25 mm e comprimento de 285 mm. Buscou-se seguir as recomendações da norma NBR 8490 (ABNT 1984) para argamassas, com algumas adaptações que se fizeram necessárias, devido ao método de moldagem usado para confecção dos corpos-de-prova de compósitos com polpa, que difere grandemente dos métodos de mistura usuais para argamassas.

3.3.2.1.1

Materiais

Foram utilizadas como reforço as polpas de bambu e de sisal, como aglomerante, o cimento Portland e como adição, a cinza de casca de arroz, todos materiais já descritos em 3.1.

3.3.2.1.2 Métodos

Como os corpos-de-prova tinham forma prismática, as placas de compósito produzidas foram despedaçadas em pequenos fragmentos usados para preencher os moldes de madeira, numa adaptação do método proposto por Dos Anjos (2002) para moldagem de corpos-de-prova cilíndricos. Os moldes tiveram suas superfícies recobertas com filme plástico, evitando o uso de desmoldante, que poderia interferir no processo de secagem do material. O preenchimento se deu em três camadas, adensadas com 60 golpes de uma haste de aço de 15 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. A seguir, os moldes preenchidos foram levados a um equipamento de prensagem, onde o material foi submetido a uma compressão de 3,2 MPa durante 5 minutos, propiciando a retirada do excesso de água. Devido à necessidade de prensagem na moldagem, não foi possível usar pinos inseridos no corpo-de-prova, como recomenda a norma NBR 8490 (ABNT 1984), como pontos de medida das deformações. Esses pinos seriam deslocados de suas posições durante a aplicação da compressão. A Figura 31 apresenta o molde contendo o material já prensado.

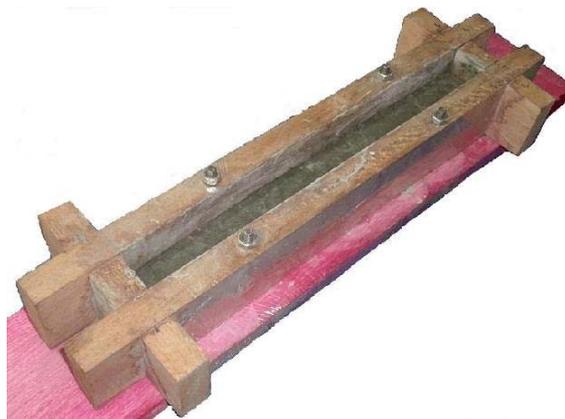


Figura 31: Molde com corpo-de-prova de retração livre

Foram produzidos três corpos-de-prova para cada um dos tipos de mistura constantes da Tabela 11. Os corpos-de-prova foram desmoldados após oito horas, pois as tentativas com prazos mais curtos não tiveram êxito, pelo retardo em adquirir uma rigidez mínima necessária à desmoldagem, observado nos compósitos. Imediatamente após a desmoldagem, foram fixadas em suas extremidades pequenas pastilhas de aço inoxidável, com orifício central, usadas

como pontos de medida das variações de comprimento dos corpos-de-prova. As medidas foram realizadas em um retratômetro, munido de relógio comparador analógico, com precisão de 1 μm . Após a leitura inicial, os corpos-de-prova foram mantidos sob condições controladas de temperatura (25° C) e umidade relativa (50%), em câmara climática.

A Figura 32 apresenta o retratômetro e alguns corpos-de-prova armazenados na câmara climática. Foram feitas medidas nas idades de 2, 4, 6, 8, 10, 12 horas e 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 14, 21, 28, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 dias. Para cada corpo-de-prova de cada mistura, foram realizadas três medidas, sempre na mesma posição no retratômetro, tomando-se a menor delas. A retração, para cada corpo-de-prova, foi calculada a partir desse menor valor de leitura e do comprimento total do corpo-de-prova, pela eq. (40). O comprimento total do corpo-de-prova foi tomado como o menor valor entre três medidas tomadas no início do ensaio. A retração foi determinada, para cada idade, como a média das retrações dos três corpos-de-prova. Antes de cada medida, os corpos-de-prova tiveram suas massas determinadas, com precisão de 0,01 g, calculando-se as perdas de massa ao longo do ensaio. Para cada mistura, foi calculada a média aritmética das perdas dos três exemplares, em cada idade.

$$\varepsilon_{rl} = \frac{(L_i^{\min} - L_0^{\min})}{L_T} \cdot 1000000 \quad (40)$$

onde:

ε_{rl} é a deformação por retração livre, dada em μs ;

L_i^{\min} é a menor das três leituras no retratômetro, para cada corpo-de-prova, em mm;

L_0^{\min} é a menor das três leituras iniciais no retratômetro, para cada corpo-de-prova, em mm;

L_T é o comprimento inicial total do corpo-de-prova, em mm.

Tabela 11: Misturas usadas para estudo da retração livre

Denomi- nação	Matriz	Tipo de fibra	Relação em massa fibras/(aglom.+ adição) (%)
CPB00	Pasta de cimento com fator água/cimento de 0,30	---	--
CPB08	Pasta de cimento	Polpa de bambu	8
CPB10	Pasta de cimento	Polpa de bambu	10
CPB12	Pasta de cimento	Polpa de bambu	12
CPB14	Pasta de cimento	Polpa de bambu	14
CPB08A15	Pasta de cimento, com substituição de 15% da massa de cimento por cinza de casca de arroz	Polpa de bambu	8
CPB08A30	Pasta de cimento, com substituição de 30% da massa de cimento por de cinza de casca de arroz	Polpa de bambu	8
CPS08	Pasta de cimento	Polpa de sisal	8



Figura 32: Retratômetro com relógio comparador (a). Corpos-de-prova na câmara climática (b)

3.3.2. 2 Retração restringida – ensaio do anel

3.3.2.2.1 Materiais

Foram utilizadas três misturas, sendo uma delas a mistura de referência (CPB00) composta apenas por pasta de cimento, e as outras duas tiveram inclusão de 8% (CPB08) e 14% (CPB14) de polpa de bambu. O cimento e a polpa de bambu utilizados foram descritos em 3.1.

3.3.2.2.2 Métodos

Foi utilizado o corpo-de-prova do tipo anel para avaliação da tendência à fissuração do compósito reforçado com polpa de bambu. Na moldagem dos

corpos-de-prova de compósito, o material, após ser submetido a vácuo, foi despedaçado e seus pedaços foram usados para preencher o espaço entre dois anéis de concêntricos, obtidos do corte de dois tubos de aço com diâmetros diferentes, apoiados sobre uma placa metálica. Após o preenchimento, o conjunto de anéis metálicos e material foi levado a um equipamento para aplicação de uma tensão de compressão de 5,0 MPa (Figura 33). Esse valor foi estabelecido pela maior altura que o anel de compósito apresenta (cerca de 45 mm) em relação às placas finas (cerca de 6 mm). Para os anéis com a mistura de referência, havia apenas o preenchimento dos moldes com o material e o adensamento com 20 golpes de uma haste de aço com 5 mm de diâmetro e 20 cm de comprimento.



Figura 33: Moldagem do anel de compósito. Molde preenchido com material e contra-molde (a). Compressão do anel (b)

O material foi deixado no molde por 24 horas e, após isso, foi retirado o anel externo. O conjunto, anel de compósito e anel interno metálico, esse último promovendo a restrição à retração do primeiro, foi levado para a câmara climática, sob condições constantes de secagem, à temperatura de 25° C e umidade relativa de 50%, onde permaneceu até o final do experimento (pelo menos 45 dias). Foram medidas as deformações, através de três extensômetros elétricos (*strain gages*) colados na linha central da superfície e igualmente espaçados, no corpo-de-prova, em ângulos de 120° (Figura 34). Esses extensômetros foram dotados de pinos, na extremidade do fio, que permitiam as leituras periódicas das deformações, usando uma leitora portátil, do tipo Vishay. As aberturas das fissuras foram medidas por meio de fissurômetro com precisão de 0,1 mm (Figura 35). No primeiro dia, as medidas foram feitas de 2 em 2 horas, por 8 horas, e após isso foram feitas medidas diárias. Quando as deformações se estabilizaram, as medidas passaram a ser feitas em dias alternados.

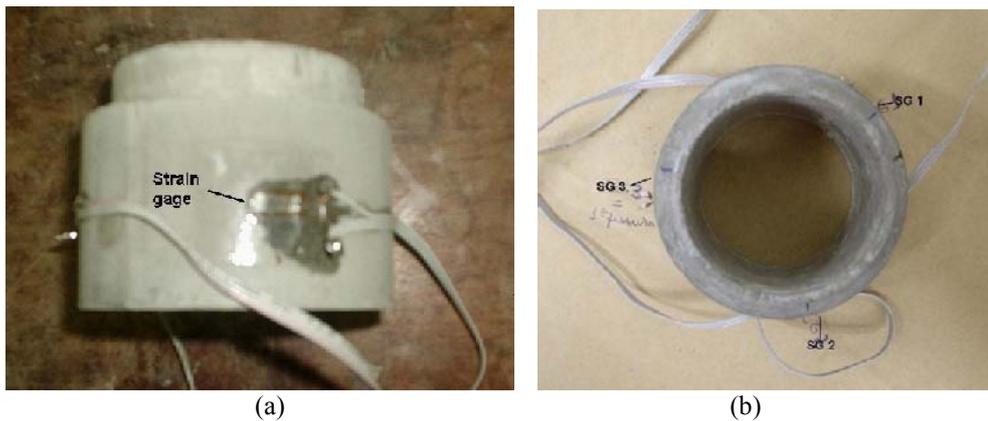


Figura 34: Localização dos extensômetros no corpo-de-prova. Linha central (a). Posições no perímetro da circunferência (b)

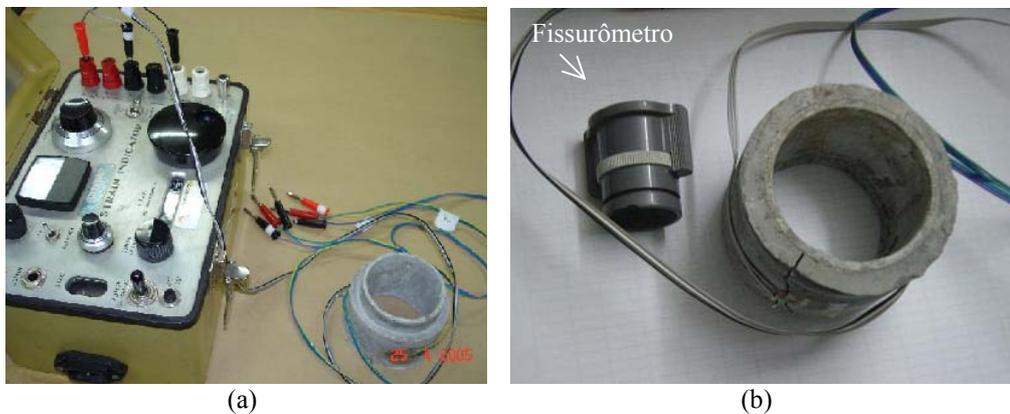


Figura 35: Medidas de retração restringida. Deformações por leitora portátil (a). Anel restringido, com fissuras e fissurômetro (b)

Para cada mistura foram moldados três anéis para medida da retração restringida. Também foram moldados outros três corpos-de-prova para cada mistura para medida da retração livre e, nesse caso, na desmoldagem, foram retirados o anel interno e o externo (Figura 36). A superfície interna desses anéis foi selada com aplicação de duas camadas do selante VEDAPREN da Otto Baumgart, para permitir a secagem apenas nas mesmas faces livres do anel sujeito à restrição. Embora, nesse trabalho, seja usada a expressão “anel livre” para designar o corpo-de-prova do qual foi retirada a restrição do anel metálico interno, sabe-se que a aplicação de selante na superfície interna pode conferir certa restrição, devido ao gradiente de umidade provocado pelo impedimento à saída da água. Assim, a expressão “anel livre” denotou o corpo-de-prova livre do anel metálico interno. Em cada anel livre foi fixado um extensômetro elétrico, para observação das deformações livres que sofreriam os compósitos moldados sob a forma de anel.

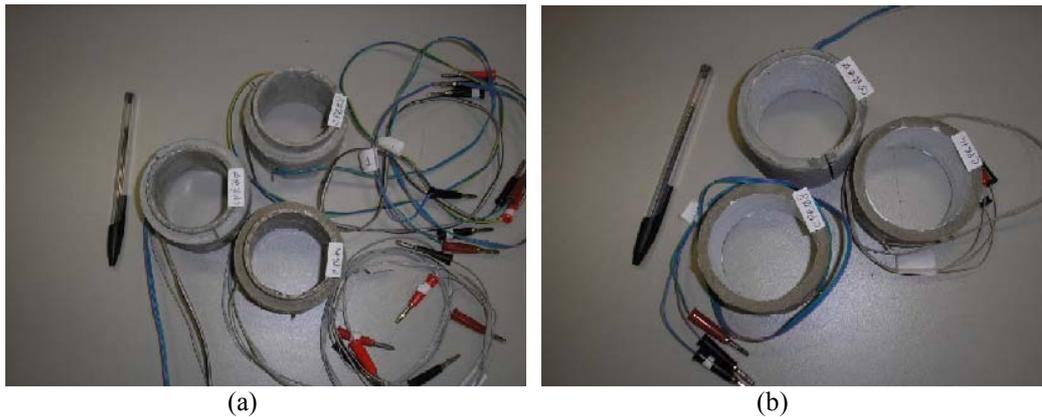


Figura 36: Anéis restringidos (a). Anéis livres (b).

3.3.2.2.3

Escolha das dimensões do corpo-de-prova

A escolha do diâmetro que deveria ter o anel formado pelo compósito baseou-se no trabalho de Grzybowski e Shah (1990), que utilizou esse tipo de ensaio para medir a retração restringida em concreto reforçado com fibras de polipropileno e aço. Foi considerado que deveria ser promovido no corpo-de-prova um estado de tensões que mais se aproximasse de um teste de tração uniaxial, para que os resultados pudessem ser considerados como uma propriedade do material. Sendo difícil observar a evolução da fissuração em corpos-de-prova lineares, buscaram-se dimensões para o anel que mais se aproximasse do estado uniaxial de tração.

Quando o anel de concreto tenta se retrair, fica submetido a uma pressão interna uniforme, resultante da restrição promovida pelo anel de aço. O anel de compósito fica, então, submetido a uma tensão de tração tangencial, variável ao longo do raio, e uma tensão compressiva radial. Através da escolha adequada dos diâmetros interno e externo do corpo-de-prova, pode ser reduzida a diferença entre a tensão tangencial máxima (na superfície interna, em contato com o anel metálico) e a tensão tangencial mínima (superfície externa do material), bem como a tensão radial.

Para determinação das medidas adequadas ao corpo-de-prova, admitiu-se a simplificação de que o material tem comportamento elástico, portanto pode ser usada equação da teoria da elasticidade, particularmente a solução devida a Lamé

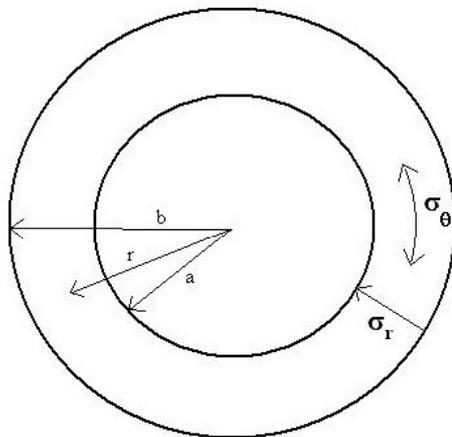
para distribuição simétrica de tensões em relação ao eixo (axi-simétrica) (Timoshenko e Goodier 1951).

Conforme mostrado na Figura 38, tem-se, no compósito sob a forma de anel restringido, uma tensão tangencial que, quando a pressão externa é igual a zero, é dada pela eq. (41).

$$\sigma_{\theta} := \frac{a^2 p_i \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)}{b^2 - a^2} \quad (41)$$

Tem-se, também, uma tensão radial que, quando a pressão externa é igual a zero, é dada pela eq. (42).

$$\sigma_r := \frac{a^2 p_i \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right)}{b^2 - a^2} \quad (42)$$



onde:

σ_{θ} - tensão tangencial

σ_r - tensão radial

a - raio interno

b - raio externo

r - posição ao longo do raio

p_i - pressão interna

Figura 37: Esquema do anel do teste de retração restringida

Nesse estudo foi adotado o valor de 64 mm para o diâmetro interno ($a = 32,0$ mm) e 77 mm para o diâmetro externo ($b = 38,5$ mm) do corpo-de-prova em forma de anel. A tensão tangencial mínima (na superfície externa) foi calculada como 82% da tensão tangencial máxima (na superfície interna) e o valor máximo da tensão radial (na superfície interna) foi de 18% da tensão tangencial máxima.

Grzybowski e Shah (1990) obtiveram a diferença entre as tensões tangenciais, máxima e mínima, igual a 10% e o valor máximo da tensão radial foi

de 20% da tensão tangencial. Nessas condições, foi assumido que o material estava sob tensão de tração uniforme e axial.

3.3.2.3 Reversibilidade da retração

3.3.2.3.1 Materiais

Analisaram-se as deformações por movimentação da umidade em placas curadas de fibro-cimento em das três misturas. Uma delas foi tomada como mistura de referência (CPB00) composta apenas por pasta de cimento, e as outras duas tiveram inclusão de 8% (CPB08) e 14% (CPB14) de polpa de bambu. O cimento e a polpa de bambu utilizados foram descritos em 3.1.

3.3.2.3.2 Métodos

O ensaio foi baseado nas recomendações do RILEM Technical Committee 49 (RILEM, 1984b) para medida das variações dimensionais do compósito, sob a ação de ciclos alternados de molhamento e secagem. Foram realizados dois tipos de ensaio, sendo que num deles os ciclos alternados se iniciavam com a secagem dos corpos-de-prova, e no outro, se iniciavam pela saturação. O objetivo foi determinar os valores de deformação de expansão máxima (desde o estado totalmente seco até o estado saturado) e de contração máxima (desde o estado saturado até o estado totalmente seco), e as deformações cíclicas reversíveis em ambas as situações. Esse valor de deformação cíclica é determinado quando se atinge um valor constante de deformação, de um estado a outro, após vários ciclos de molhamento e secagem. Os corpos-de-prova se constituíram de placas de cerca de 6 mm de espessura, na forma de um quadrado de lado igual a 250 mm, cortado de uma placa plana maior, de lado 400 mm. Utilizaram-se três corpos-de-prova de cada mistura, para cada tipo de ensaio.

As placas originais de compósito com polpa foram produzidas pelo processo descrito em 3.2, utilizando uma câmara de vácuo que permitia a moldagem de placas de 400 mm x 400 mm de área. Cada placa, após a aplicação do vácuo na moldagem, foi colocada entre duas placas de aço, intercaladas em ambas as faces por folhas de papel absorvente. O conjunto, placa de compósito e placas metálicas

foi levado a uma equipamento para aplicação de 3,2 MPa de compressão durante 5 minutos, para retirar o excesso de água ainda presente na mistura. A placa adquiriu, assim, uma espessura de cerca de 6 mm.

Após a moldagem, as placas foram deixadas envoltas em saco plástico por sete dias, ainda entre as placas metálicas, para minimizar empenamentos. Os corpos-de-prova da mistura de referência foram feitos com pasta de cimento de relação água/cimento de 0,30, lançada sobre forma de madeira com dimensões 400 mm x 400 mm x 10 mm, havendo marcas na altura de 6 mm que serviam como guias, para que o preenchimento produzisse uma placa com essa espessura. Em seguida, foi feito o adensamento em mesa vibratória, por tempo suficiente para o espalhamento, nivelamento e expulsão do excesso de ar contido na mistura. Depois desse período inicial de cura, as placas de compósito e de mistura de referência foram colocadas em câmara climática, a 25°C de temperatura e umidade relativa de 50%. Aos 28 dias de idade, as placas de 400 mm de lado foram cortadas com uma serra elétrica manual, do tipo usado para cortar mármore, produzindo-se placas menores de dimensões próximas a 250 mm x 250 mm x 6 mm. Foram medidas as espessuras em quatro posições, em cada corpo de prova, com precisão de 0,1 mm, para comprovar que não houve variação de $\pm 10\%$ ou ± 1 mm.

Após 28 dias de idade e tendo passado 21 dias em ambiente de secagem na câmara climática, os corpos-de-prova estavam suficientemente secos para permitir a colagem, em ambos os lados de cada placa, de quatro pequenas pastilhas de aço inoxidável de 8 mm de diâmetro, com um minúsculo orifício no centro, que serviram como pontos de localização das medidas. Desse modo, em cada face de cada corpo-de-prova (denominadas por lados L1 e L2), duas medidas de deformação eram determinadas, para direções perpendiculares previamente demarcadas (A e B), localizadas no meio de cada lado, dividindo a face da placa em quatro quadrados. Foi utilizado um extensômetro mecânico, do tipo DEMEC, com comprimento de medida de 200 mm e escala com 100 divisões, correspondendo cada divisão a uma deformação de $8,0 \times 10^{-6}$ (Figura 38). As medidas foram sempre tomadas com o extensômetro na mesma posição. Para cada determinação de deformação do segmento demarcado entre as pastilhas, em cada direção, foram feitas três leituras, determinando-se uma média entre as mesmas.

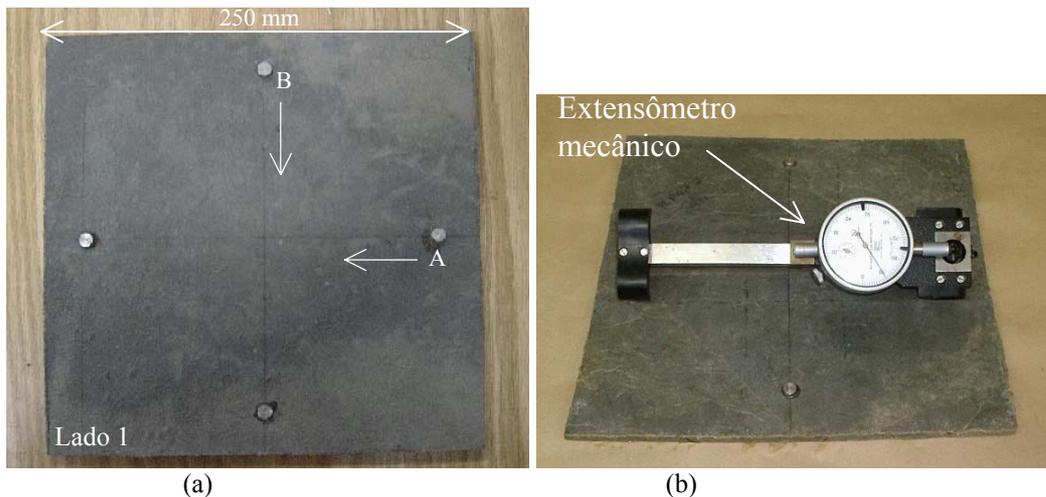


Figura 38: Medida das variações dimensionais por variação de umidade. Placa com pastilhas (a). Extensômetro mecânico tipo DEMEC (b)

Foram tomadas as leituras iniciais, imediatamente após retirar as placas da câmara climática. No primeiro tipo de ensaio, após as medidas iniciais, os ciclos de alternância de secagem e umedecimento tiveram início com a colocação das placas em estufa, até a completa secagem quando era constatada a constância de massa. Apesar da recomendação do RILEM Technical Committee 49 TFR (RILEM, 1984b), quanto às condições de secagem, indicar a exposição à temperatura de 95°C ($\pm 15^{\circ}\text{C}$), os corpos-de-prova foram colocados em estufa a 70°C , buscando minimizar os danos à fibra vegetal presente no compósito. Os corpos-de-prova foram, então, removidos da estufa e deixados resfriar até atingir 30°C e foram feitas leituras das deformações na condição seca. A seguir, as placas foram colocadas submersas em água até atingir a constância de peso. Foram tiradas da água, tiveram o excesso de água removido com uma toalha e foram feitas as leituras nas posições indicadas pelas pastilhas, na condição saturada. Esse processo foi repetido até que fossem completados 25 ciclos, tendo-se percebido que, após essa sucessão de ciclos, era alcançada determinada constância do valor da diferença entre as deformações dos estados seco e saturado. Foram calculadas as médias das deformações registradas nas três placas de cada mistura, bem como a média geral, representativa de cada mistura.

No segundo tipo de ensaio, após as leituras iniciais, as placas foram imersas em água, até constância de masa, procedendo-se da mesma forma que anteriormente, no transcorrer dos ciclos.

Foram obtidos dados sobre o comportamento dos materiais sob alternância de saturação e secagem, condições frequentemente presentes em aplicações práticas, por determinação dos parâmetros:

- Máxima deformação de expansão;
- Máxima deformação de contração;
- Deformação cíclica reversível, nos dois tipos de ensaio;

3.4

Ensaio de fluência

3.4.1

Fluência sob compressão

3.4.1.1

Resistência à compressão dos compósitos

O estudo da fluência na compressão teve como variável o teor de fibras dos compósitos. Três misturas foram usadas, sendo uma delas a pasta pura (CPB00), como mistura de referência, e dois compósitos com 8% e 14% de polpa de bambu em massa, em relação à massa de cimento (respectivamente, CPB08 e CPB14). Para a determinação do carregamento a ser empregado no ensaio de fluência, foram moldados corpos-de-prova com essas misturas, com as mesmas dimensões dos que seriam usados no ensaio de longa duração, e submetidos a testes de resistência à compressão.

A produção dos corpos-de-prova de compósitos obedeceu ao descrito em 3.2, até a retirada da placa da câmara de vácuo. Cada placa foi, então, despedaçada e esses pedaços foram usados para preencher o molde cilíndrico, em quatro camadas, adensadas com 60 golpes de soquete padrão (ABNT, 1996). Dentro do molde, o material recebeu a compressão de 5,0 MPa, para retirada do excesso de água ainda presente, após aplicação do vácuo. O molde foi feito com tubo de PVC, com diâmetro nominal de 50 mm (diâmetro interno em torno de 47,9 mm) e com altura de cerca de 160 mm. Foram feitos diversos pequenos furos, distribuídos regularmente pela superfície do tubo, para permitir a saída uniforme da água, durante a compressão na moldagem (Figura 39). Foi usado desmoldante à base de água, para não haver interferência no processo de troca de umidade com o ambiente, importante no estudo da fluência na secagem. Após a

compressão na moldagem, os corpos-de-prova de compósito adquiriram uma altura de cerca de 110 mm.

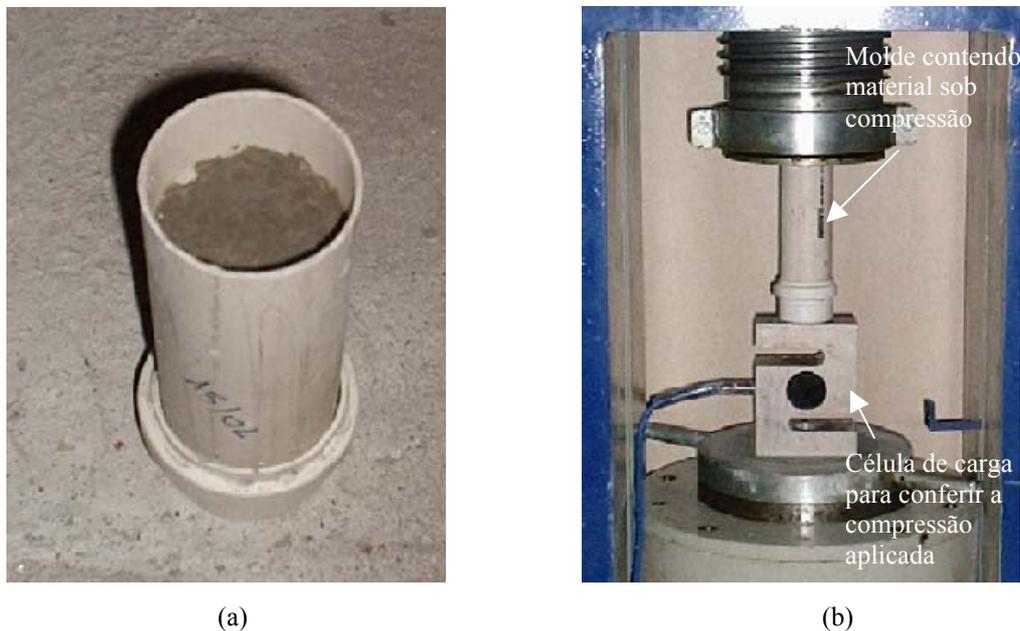


Figura 39: Moldagem dos corpos-de-prova para ensaio de compressão. Molde preenchido (a). Aplicação da compressão na moldagem (b)

Para a mistura de referência, os moldes de tubos de PVC foram feitos com altura de 110 mm, sem furos nas paredes. A pasta de cimento teve fator água/cimento fixado em 0,30. A retirada dos moldes se deu após 48 horas da moldagem e, logo após a retirada dos moldes, os corpos-de-prova foram envolvidos individualmente em filme plástico de PVC e colocados em sacos plásticos fechados, reproduzindo as condições de cura que seriam aplicadas nos corpos-de-prova do ensaio de fluência na compressão. Essa condição de cura foi mantida por 28 dias, até o momento do ensaio de compressão (Figura 40).

Os corpos-de-prova receberam capeamento com massa plástica, para evitar concentrações de tensão e foram fixados *strain-gages* bi-direcionais para medida das deformações longitudinal e transversal. Foram testados quatro corpos-de-prova para cada mistura. Foram determinados os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, para cada mistura.



Figura 40: Ensaio de compressão

3.4.1.2 Ensaio de fluência sob compressão

A moldagem e cura dos corpos-de-prova cilíndricos para ensaio de fluência na compressão foram realizadas seguindo-se o mesmo procedimento já descrito no item anterior. Foram produzidos oito corpos-de-prova para cada mistura (CPB00, CPB08 e CPB14), sendo quatro deles para receberem o carregamento. Desses quatro, dois permaneceram selados durante todo o ensaio, para medida da fluência básica, e os outros dois foram expostos ao ar, no interior da câmara climática ($T=25^{\circ}\text{C}$ e $UR=50\%$), mas somente a partir do momento da aplicação do carregamento, para medida da fluência na secagem. Os outros quatro corpos-de-prova foram usados para medida concomitante das retrações, sendo dois espécimes selados, para medida da retração autógena, e dois expostos ao ar, na câmara climática, somente a partir do momento da aplicação do carregamento nos corpos-de-prova de fluência.

Na idade de carregamento (28 dias), os corpos-de-prova tiveram seus topos capeados com massa plástica (inclusive aqueles que foram usados para medir a retração) e foram fixados dois extensômetros elétricos (*strain gages*) unidirecionais, em cada um deles, para medida das deformações. Em cada corpo-de-prova, os *strain gages* foram fixados em posições diametralmente opostas. Essas operações foram feitas tomando-se o máximo cuidado para não expor os corpos-de-prova à secagem, mantendo-os envoltos em filme de PVC. Os corpos-de-prova para medida da retração autógena e da fluência básica receberam duas demãos do selante VEDAPREN da Otto Baumgart, e foram novamente envoltos em filme de PVD, fixado por meio de fita plástica adesiva, assim permanecendo durante todo o ensaio.

No momento da aplicação do carregamento, os corpos-de-prova de fluência foram colocados em equipamentos preparados para manter dois corpos-de-prova simultaneamente sob carga de compressão (Figura 41). Em cada um desses pórticos, foram colocados um corpo-de-prova selado e um não selado da mesma mistura.



Figura 41: Pórtico para ensaio de fluência

Foram colocadas, em série com os corpos-de-prova, células de carga com capacidade de 5 tf, para controle do carregamento e rótulas (Figura 42). Depois de aplicar o carregamento em cada conjunto, as porcas enroscadas nas quatro barras foram apertadas. Foram aplicadas tensões correspondentes a 50% da resistência à compressão de cada mistura, determinada conforme o item 3.4.1.1.

Foram feitas leituras das deformações elásticas instantâneas, em cada pórtico, tendo-se o cuidado de tomá-las em até 10 minutos após o início do carregamento. A manutenção dos corpos-de-prova no interior da câmara climática, sob condições constantes de temperatura e umidade relativa do ar, teve

o intuito de evitar os efeitos da variação da temperatura sobre os valores das deformações a serem medidas. As leituras seguintes das deformações foram tomadas com 1 hora, 2 horas, 4 horas, 6 horas, e depois a cada dia. O carregamento foi ajustado, por aperto das porcas, sempre que a célula de carga acusava uma perda de mais que 2% em relação ao carregamento estabelecido.

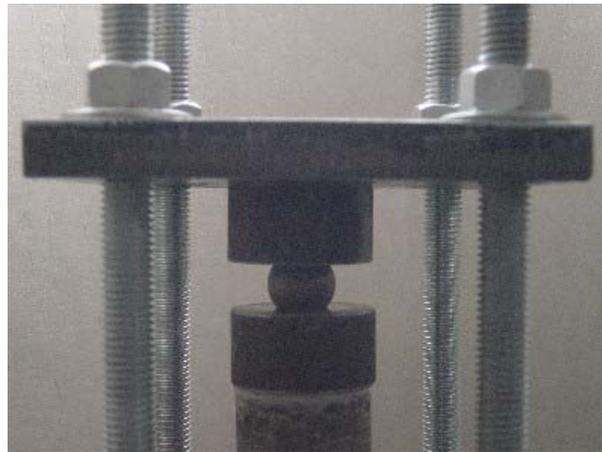


Figura 42: Rótula do pórtico de fluência sob compressão

Os corpos-de-prova foram mantidos sob carregamento constante por 180 dias, quando foram, então, descarregados. A partir da retirada da carga, passou a ser medida a recuperação da fluência, durante 60 dias. Foram calculadas as fluências totais (corpos-de-prova não selados) e básicas (corpos-de-prova selado), pela diferenças entre a deformação total e a retração, medidas para cada condição de exposição. Após completado o ensaio de fluência, os corpos-de-prova, que estiveram sob carga, foram ensaiados à compressão. Foram determinadas as resistências e módulos de elasticidade, para cada mistura, visando obter os efeitos da solicitação mecânica prolongada, seguida de recuperação da deformação, sobre o comportamento do material.

3.4.2 Fluência sob flexão

3.4.2.1 Resistência à flexão dos compósitos

Para a obtenção dos parâmetros do comportamento à flexão dos compósitos estudados, com vistas à realização do ensaio de fluência sob flexão, foram

preparados nove corpos-de-prova de cada uma das misturas, CPB00 (referência), CPB08 e CPB14. Foram executados testes de flexão, com carga aplicada nos terços médios do vão livre dos corpos-de-prova (*third point loading test*), conforme a recomendação do RILEM Technical Committee 49 TFR (RILEM, 1984b), pois essa condição de carregamento promove um valor constante de momento fletor na zona central, com vantagens sobre o teste com carga aplicada no ponto central, onde as tensões máximas são concentradas num único ponto, no centro do vão livre. Além disso, é eliminado, na zona central, o esforço cortante.

Placas de compósitos, medindo 120 mm x 120 mm e espessuras em torno de 6 mm, foram produzidas conforme descrito em 3.2, com aplicação de 3,2 MPa de compressão na moldagem durante 5 minutos. Os corpos-de-prova para ensaio de flexão foram obtidos do corte dessas placas, apresentando dimensões próximas de 120 mm x 40 mm x 6 mm, e foram curados envoltos em filme de PVC. Essas placas recobertas foram, ainda, inseridas em sacos plásticos, para evitar a secagem e a conseqüente retração. Aos 28 dias de idade, os corpos-de-prova tiveram suas dimensões determinadas pela média de três medidas em cada dimensão e foram submetidos à flexão em máquina INSTRON 5500, com velocidade de deslocamento de 1 mm/min. O vão livre foi fixado em 90 mm, deixando-se 15 mm de balanço em ambos os lados. Foram calculados os valores das tensões e deslocamento nos pontos de aplicação da carga no limite de proporcionalidade (*LP*), através da eq. (43). Por simplificação, os valores das resistências à flexão, ou módulos de ruptura (*MOR*), foram calculados pela eq. (44), embora seja reconhecido que tal método não é inteiramente válido, devido à natureza não-linear das curvas, notadamente para os compósitos com fibras. O cálculo da absorção de energia na flexão foi feito considerando a área sob a curva carga-deslocamento até o ponto, após a carga máxima, em que a carga atingiu 40% da carga máxima (RILEM, 1984b).

$$LP = \frac{F_p L}{bh^2} \quad (43)$$

$$MOR = \frac{F_r L}{bh^2} \quad (44)$$

onde:

P_{LP} é a carga para a qual a curva carga-deslocamento se desvia da linearidade, em newtons

P_{max} é a carga máxima, em newtons

L é o comprimento do vão livre, em milímetros

b é a largura do corpo-de-prova, em milímetros

h é a altura do corpo-de-prova, em milímetros

Dos nove corpos-de-prova ensaiados, foram selecionados os seis que propiciassem a menor variação do módulo de ruptura, tendo sido esses resultados usados para o cálculo da resistência à flexão de cada mistura, tomada como base para determinação do carregamento constante a ser aplicado durante o ensaio de fluência sob flexão.

3.4.2.2

Ensaio de fluência sob flexão

Observa-se que, na maioria das aplicações práticas, o fibrocimento é utilizado sob a forma de placas finas, sujeitas à flexão (coberturas, reservatórios). Mesmo em elementos que não tenham a função estrutural, a capacidade de acomodação de deformações ao longo do tempo torna-se fator de considerável significância, visto que podem ocorrer transferências de tensões para cada elemento como consequência de movimentações da estrutura como um todo. O ensaio de fluência sob flexão pretendeu caracterizar o comportamento dos compósitos com polpa de bambu sob deformações dependentes do tempo para esse tipo de solitação. Esse ensaio foi realizado usando aparatos bastante simples, constando, cada um deles, de um suporte de aço, com dois eixos que serviam de apoio para os corpos-de-prova, e uma base superior para o carregamento, aplicado sob a forma de peso morto, como pode ser visto na Figura 43.

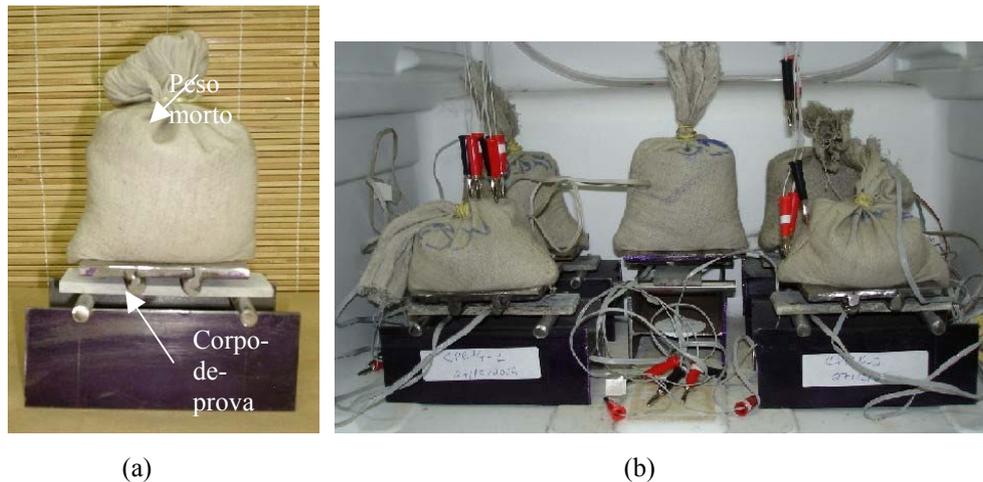


Figura 43: Aparato para ensaio de fluência sob flexão (a). Alguns corpos-de-prova carregados no interior da câmara (b)

Da mesma forma que para os corpos-de-prova usados para caracterizar o desempenho à flexão, os destinados ao ensaio de fluência sob flexão também foram envoltos em filme plástico e mantidos em sacos plásticos, desde a produção até o momento do carregamento. Foram utilizados três corpos-de-prova para cada mistura (CPB00, CPB08 e CPB14) para observação da evolução das deformações sob carregamento constante.

Aos 28 dias de idade, foram aplicadas cargas correspondentes a 30% da resistência média à ruptura sob flexão determinada para cada mistura. Esse percentual do carregamento de ruptura adotado, mais baixo que o fixado no ensaio de fluência na compressão, fez-se necessário pela limitação da aplicação da carga através de peso morto. A carga foi aplicada, empregando-se sacos contendo pequenas esferas de chumbo. Para percentuais de carga de ruptura maiores, o volume desses sacos tornava-se excessivamente grande, prejudicando a estabilidade do conjunto. Para cada corpo-de-prova escolhido para medida da fluência sob flexão, foram determinadas as dimensões da seção transversal e, a partir dessas e do valor correspondente a 30% da resistência à ruptura da mistura, foram determinados os pesos que deveriam ser apoiados sobre cada elemento.

Os corpos-de-prova carregados foram mantidos em câmara climática sob condições controladas de temperatura (25° C) e umidade relativa do ar (50%). Em cada um deles, foram fixados dois extensômetros elétricos (*strain gages*) unidirecionais, sendo um deles na metade do vão livre da face inferior, sujeita à tração na flexão, e o outro na parte superior, registrando a deformação sob compressão (Figura 44). As deformações de flexão foram registradas ao longo do

tempo, por 120 dias, observando-se em seguida a recuperação da fluência, por 60 dias. Para cada mistura, dois corpos-de-prova de controle foram igualmente instrumentados e colocados na câmara climática, para medida simultânea da retração na secagem.

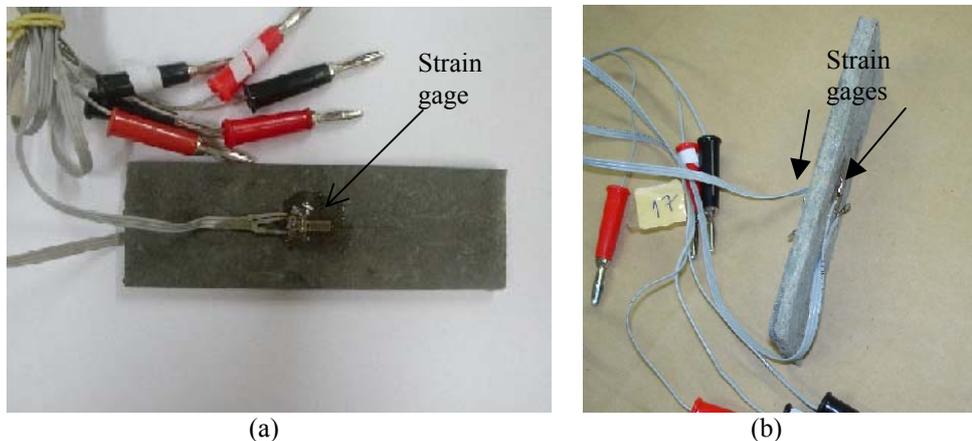


Figura 44: Esquema de fixação dos *strain gages* para ensaio de fluência na flexão. Vista superior (a). Vista lateral (b)

As deformações de tração e de compressão nos corpos-de-prova carregados sob flexão, bem como as deformações de retração, foram medidas através de leitora portátil, do tipo Vishay. A medida inicial foi tomada logo após a colocação da carga sobre os elementos, correspondendo à deformação imediata. As medidas posteriores foram feitas nos seguintes intervalos de tempo após o carregamento: 1 hora, 5 horas, 1 dia, 2, 4, 7, 14, 28, 60 e 120 dias. Aos 120 dias de carregamento, foi retirada a carga e passou-se a medir a recuperação das deformações. Nessa segunda fase, a primeira medida foi tomada imediatamente após a retirada da carga, correspondendo à recuperação instantânea da deformação, e as medidas posteriores foram feitas com 1 hora, 5 horas, 1 dia, 2, 4, 7, 14, 28 e 60 dias.

Para cada mistura, foram calculadas as médias das deformações para cada período de tempo. Para determinação da fluência total de cada mistura, subtraíram-se os valores médios de retração e de deformação elástica inicial dos valores médios das deformações de tração e de compressão medidos nos corpos-de-prova sujeitos a carregamento e secagem simultâneos.

Como o percentual de carga aplicada correspondeu a 30% da resistência máxima de cada material e, para esse nível de tensão, a fluência pode ser considerada proporcional à tensão aplicada, pôde ser calculada a fluência

específica para cada mistura, dividindo-se o valor da deformação pela tensão aplicada.

3.5

Ensaio de fratura

3.5.1

Ensaio com corpos-de-prova com entalhe

Para caracterizar o comportamento de fratura dos compósitos com polpa de bambu, foram moldados quatro corpos-de-prova para cada mistura (CPB00, CPB08 e CPB14), com dimensões 25 mm x 50 mm x 200 mm, com um entalhe no centro do vão, de profundidade igual a $\frac{1}{3}$ da altura (cerca de 17 mm). O raio de curvatura do entalhe (ρ) foi de 0,5 mm. Essas vigotas foram produzidas conforme descrito em 3.2, até a obtenção das placas submetidas a vácuo. As placas foram despedaçadas e os pedaços usados para preencher o molde de madeira, revestido internamente com filme plástico. O entalhe foi feito com fixação no molde, internamente, de uma fina lâmina metálica, com borda bastante afilada voltada para a ponta da trinca. O preenchimento se deu em 3 camadas, adensadas com 60 golpes de soquete padrão NBR 7215. Após o preenchimento, o conjunto, molde e material, foi levado a uma prensa hidráulica, onde o material foi submetido a 5,0 MPa por 5 minutos, havendo a saída da água em excesso pelas aberturas entre as partes encaixáveis que formavam os moldes. Os corpos-de-prova com a mistura de referência foram feitos por preenchimento dos moldes, com aberturas vedadas, com pasta de cimento de relação água/cimento igual a 0,3 e adensamento com soquete.

A retirada dos moldes se deu com 48 horas. Foi feita cura em sacos plásticos por sete dias e, em seguida, os corpos-de-prova foram colocados em câmara climática, a 25° C e 50% de umidade relativa do ar. O ensaio de flexão foi realizado aos 28 dias de idade dos corpos-de-prova, com aplicação do carregamento em quatro pontos, com a carga aplicada nos terços médios do vão livre da peça (*third point loading test*), em uma máquina INSTRON 5500 (Figura 45), com velocidade de deslocamento do travessão de 1 mm/min.

A condição de aplicação da carga em quatro pontos foi escolhida de modo a eliminar o efeito do cisalhamento no terço médio do vão, promovendo a flexão

pura. O vão livre adotado foi de 170 mm, com 15 mm de balanço em ambos os lados. Foi medida a evolução da abertura da boca trinca (*CMOD*), através de *clip-gage* fixado em ambos os lados do entalhe por meio de pequenas placas metálicas, com 2 mm de espessura. Segundo Sarigaphuti et al. (1993), a medida do *CMOD* está menos sujeita a erros que as medidas de deflexão. A partir dos valores de carga e *CMOD* obtidos experimentalmente, foi possível caracterizar o comportamento à fratura dos compósitos.

Foram identificados os pontos, nas curvas *P-CMOD*, que corresponderam à iniciação do crescimento da trinca e à carga máxima. Foram traçadas as curvas de resistência dos compósitos, que relacionam o fator de intensidade de tensões com a extensão do comprimento da trinca.

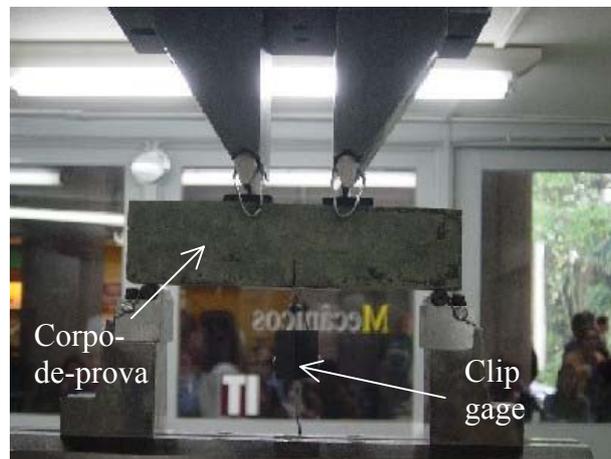


Figura 45: Ensaio de flexão em vigota com entalhe

3.5.2 Ensaio com corpos-de-prova sem entalhe

Foi também moldada igual quantidade corpos-de-prova sem entalhe, para cada mistura, com mesma geometria e dimensões que os anteriores, igualmente testados sob flexão em quatro pontos, tendo sido medidas as cargas, *P*, e os deslocamentos do travessão da máquina de aplicação do carregamento, correspondentes às deflexões dos pontos localizados nos terços médios do vão livre das vigotas.

Tendo sido adotado que os deslocamentos nesses corpos-de-prova sem entalhe corresponderiam aos deslocamentos do travessão da máquina, executou-se o procedimento recomendado na norma ASTM C-1018 (ASTM 1992) para

corrigir os valores registrados nesses ensaios, expurgando os efeitos espúrios, tais como os devidos a deformação localizada nos pontos de aplicação das cargas, ou assentamento do material sobre os suportes. Uma concavidade ascendente na porção inicial da curva $P-v$ é indicativa desses efeitos espúrios. A correção deve ser feita assumindo que a porção inicial da curva é linear. É determinado o ponto de primeira fissura, traçando-se uma linha reta coincidente com a porção da curva que seja essencialmente linear e identificando o ponto no qual a curvatura se inicia, evidenciado pela variação da inclinação da curva. Essa linha reta é estendida até cruzar com o eixo das abscissas, determinado um novo ponto de origem.

Com os pares de valores $P-v$, foi possível o traçado das curvas demonstrativas dessa relação. Foi identificado o ponto de carga máxima suportada, tendo sido calculado o módulo de ruptura, MOR , pela eq. (44). Foi determinada a energia absorvida sob flexão estática, de acordo com a recomendação do RILEM (1984), como sendo a área sob a curva $P-v$ até o ponto em que a carga, no ramo descendente da curva, se iguala a 40% da carga máxima obtida no ensaio, considerando a correção dos deslocamentos espúrios. A energia específica, EE , foi calculada, dividindo-se esse valor obtido de energia pela área da seção transversal do corpo-de-prova.

As medidas das cargas máximas suportadas pelos corpos-de-prova com e sem entalhe permitiram a determinação do fator de sensibilidade de cada material à presença do entalhe (FSE), definido como a relação entre as cargas máximas suportadas pelo corpo-de-prova entalhado e pelo corpo-de-prova sem entalhe, de um mesmo material (Banthia e Sheng 1996).

3.5.3

Observação das faces de fratura por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Amostras das superfícies de fratura dos compósitos foram observadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca JEOL, modelo JSM 5800 LV, no laboratório de microscopia do Instituto Militar de Engenharia, depois de transcorridos quinze dias do ensaio de ruptura. Essas amostras tinham, portanto, 43 dias de idade, quando as imagens foram registradas. A preparação das amostras

se deu por deposição de carbono e as imagens foram obtidas por elétrons secundários.

Foram observadas imagens de amostras colhidas de corpos-de-prova já fraturados das três misturas estudadas (CPB00, CPB08 e CPB14). Buscou-se mostrar a superfície fraturada, de modo a obter informações quanto aos tipos de mecanismo de tenacidade presentes no processo de fratura dessas materiais.