

3

Procedimento Experimental

3.1

Fabricação dos compósitos

Neste trabalho, foi utilizado, para fabricação dos compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu, o método Hatschek modificado, em escala laboratorial. Através desse método foram obtidas placas de pequena espessura, utilizadas ainda úmidas na fabricação dos corpos de prova.

3.1.1

Dispersão da polpa seca

Utilizou-se polpa de bambu, sob a forma de microfibras obtidas pelo processo Kraft (Phillip, 1998), fornecida pela indústria de papel e celulose Itapajé. Esta polpa foi utilizada na condição de não refinada como reforço para a obtenção dos compósitos de matrizes cimentícias, seguindo recomendações de trabalhos anteriores (Brescansin 2003, Salles 2006). A dispersão da polpa foi realizada em água (Fig 3.1), uma vez que seu transporte desde a fábrica até o laboratório havia promovido a sua aglutinação. Utilizou-se aproximadamente 700 ml de água para a dispersão da mesma, promovendo agitação durante 10 minutos por meio de um agitador mecânico (Figura 3.2), que operava com velocidade constante de 2000 rpm. Após a dispersão, a mistura (polpa + água) era colocada em peneira, o excesso de água retirado, sendo posteriormente acondicionada em sacos plásticos e armazenada em geladeira até a sua utilização.



Fig 3.1 – Polpa de bambu



Fig 3.2 – Dispersão da polpa

3.1.2. Moldagem das placas de fibrocimento

Para a fabricação de placas de fibrocimento, utilizou-se como matérias primas cimento CP2F-32 da marca Mauá, polpa de bambu e água. A resistência à compressão do cimento utilizado foi determinada após 28 dias de acordo com a norma NBR 7215, tendo-se obtido o valor de aproximadamente 43,54 MPa. A fabricação das placas foi feita utilizando-se 120 g de cimento, polpa de bambu nos teores de 6 e 14% em relação a massa de cimento e 700 ml de água.

As fibras da polpa ainda úmidas eram retiradas da geladeira, colocadas no dispersor, juntamente com o cimento e a água e a dispersão da mistura então realizada por 5 min, obtendo-se um licor que continha em torno de 16% de material sólido (cimento + polpa). Após a dispersão, a mistura era imediatamente transferida para a câmara de

moldagem, de dimensões 120 x 120 x 100 mm, que estava conectada a uma bomba de vácuo (Fig 3.3). Com o acionamento da bomba, o vácuo na face inferior da câmara de moldagem permitia a sucção do excesso de água da mistura (cimento + polpa + água), resultando em uma placa de dimensões 120 x 120 mm e espessura aproximada de 7 mm (Fig 3.4), com as fibras dispersas homogeneamente em seu interior. Toda a água retirada ficava armazenada em um recipiente conectado à bomba de vácuo.



Fig 3.3 – Bomba de vácuo e câmara de moldagem



Fig 3.4 – Placa de fibrocimento

3.1.3. Moldagem dos corpos de prova cilíndricos

Os corpos de prova cilíndricos (Fig 3.5) utilizados nos ensaios de compressão foram fabricados a partir das placas produzidas, conforme descrito anteriormente. As placas eram quebradas, colocadas em um molde cilíndrico de dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, aproximadamente em quatro camadas, adensadas com 60 golpes para homogeneização do material. Posteriormente era aplicada uma pressão de 3 MPa durante 5 min, utilizando-se um punção, segundo recomendação feita por Dos Anjos, (2002) e descrito por Brescansin (2003), para garantir que o excesso de água fosse removido e obtido um material mais compacto, com menos vazios.



Figura 3.5 – Molde cilíndrico

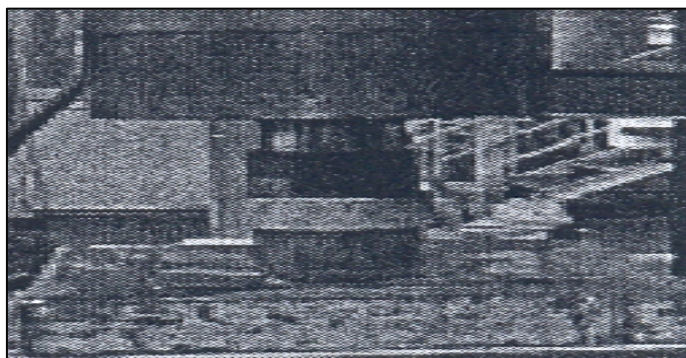


Figura 3.6 – Prensagem do compósito

Posteriormente os corpos de prova ainda nos moldes eram colocados em sacos plásticos, feita a desforma dos mesmos após 24 h e a cura ao ar livre por 27 dias. Antes da realização dos ensaios de compressão era feita uma verificação das dimensões dos corpos de prova. Após lixar os corpos de prova para a retirada das rebarbas, as superfícies superior e inferior dos mesmos eram lixadas e então niveladas utilizando uma cola adesiva de secagem rápida.

3.1.4.

Moldagem dos corpos de prova para ensaios de flexão

Para a determinação das características à flexão dos compósitos, foram fabricados corpos de prova prismáticos entalhados e não entalhados, em moldes de madeira (Fig 3.7), de dimensões de 300 x 50 x 50 mm. O procedimento de moldagem das placas para os corpos de prova de flexão foi o mesmo que o utilizado na fabricação dos corpos de prova de compressão, assim como os procedimentos de cura e armazenagem. Assim a fabricação dos corpos de prova de flexão se procedeu em aproximadamente oito camadas, adensadas manualmente. Posteriormente, ainda nos moldes, eram levados para a prensa e através do punção (Fig 3.8) era aplicada uma pressão de 3 MPa durante 5 min. Foram obtidos corpos de prova de dimensões de 300 mm de comprimento, 45 mm de espessura (B) e 50 mm de altura (W), como pode ser visto na Fig 3.9. Para os corpos de prova entalhados, adotou-se a razão $a/W = 1/2$ onde a é a profundidade do entalhe. O entalhe escolhido foi do tipo reto com raio de curvatura na ponta de 0.5 mm, inserido no corpo de prova mediante a utilização de macho, antes da moldagem.

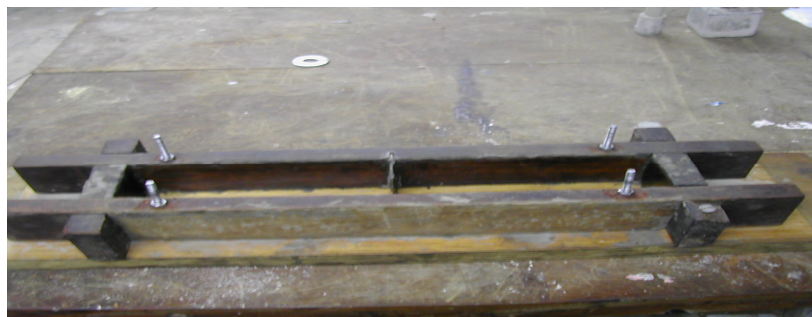


Figura 3.7 – Molde para a fabricação dos corpos de prova entalhados



Figura 3.8 – Punção utilizado na compactação dos corpos de prova

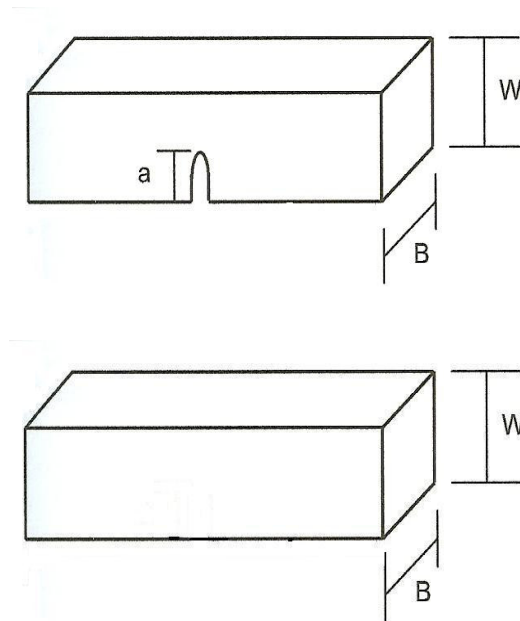


Figura 3.9 – Esquema dos corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão.

3.2. Ensaio mecânicos – Compressão

Foram realizados ensaios de compressão em compósitos de 6 e 14% de polpa não refinada, tendo sido ensaiados cinco corpos de prova para cada teor de polpa, utilizando-se strain gages tipo L para determinação das curvas tensão x deformação (axial, lateral e volumétrica), onde as deformações axial (ϵ_a) e lateral (ϵ_l) eram lidas diretamente nos extensômetros e a deformação volumétrica (ϵ_v), o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo

de elasticidade (E) em compressão obtidos através das seguintes equações, referentes ao comportamento linear elástico dos mesmos.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_l \quad (3.1)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_a} \quad (3.2)$$

$$E = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \quad (3.3)$$

$$\sigma_a = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_a + 2\nu\varepsilon_l] \quad (3.4)$$

3.2.1

Ensaio de Flexão em corpos de prova não entalhados

Com o objetivo de determinar o comportamento em flexão dos compósitos de 6 e 14% de polpa foram realizados ensaios de flexão em três pontos (Fig 3.10), para levantar as curvas de carga, P , versus deslocamento δ possibilitando, assim, a determinação da carga limite de proporcionalidade dentro do regime linear elástico bem como a carga última P_u e o cálculo do módulo de elasticidade. Para atingir tais objetivos, utilizou-se uma máquina servo-hidráulica Instron 5500R, adotando-se velocidade de deslocamento do travessão de 0.5 mm/min. O valor do módulo de elasticidade E pôde ser calculado a partir da relação a seguir (Dos Anjos, 2002; Brescansin, 2003; Fujiyama, 1999)

$$E = \frac{mL^3}{4BW^3} \quad (3.5)$$

onde m é a inclinação da linha reta correspondente a curva P - δ , já corrigida.



Figura 3.10 – Ensaio de flexão em corpo de prova não entalhado

Para o cálculo da tensão máxima σ atuante no corpo de prova, correspondente a uma carga P , aplicada dentro do regime linear elástico, utilizou-se a relação

$$\sigma = \frac{3PL}{2BW^2} \quad (3.6)$$

onde P é a carga máxima atingida e L a distância entre os apoios.

3.2.2.

Ensaio de flexão em corpos de prova entalhados

O objetivo principal deste ensaio (Fig 3.11 e 3.12), foi levantar a curva $P-\delta$, determinando assim o limite de proporcionalidade, bem como a capacidade portante para os compósitos de 6 e 14% de polpa. A avaliação do comportamento monotônico em flexão representa uma etapa necessária para a realização dos ensaios de fadiga tanto para os corpos de prova entalhados como para os não entalhados, pois só através do levantamento das curvas $P-\delta$ é que foi possível determinar os níveis de carregamento que foram adotados nos ensaios de fadiga.

O ensaio de flexão também permite estimar a tenacidade à fratura dos compósitos entalhados, calculando-se a área sob a curva de carga-deflexão até o nível de carregamento

correspondente a eventos específicos, tais como (início de fissuração, alcance da carga última.).

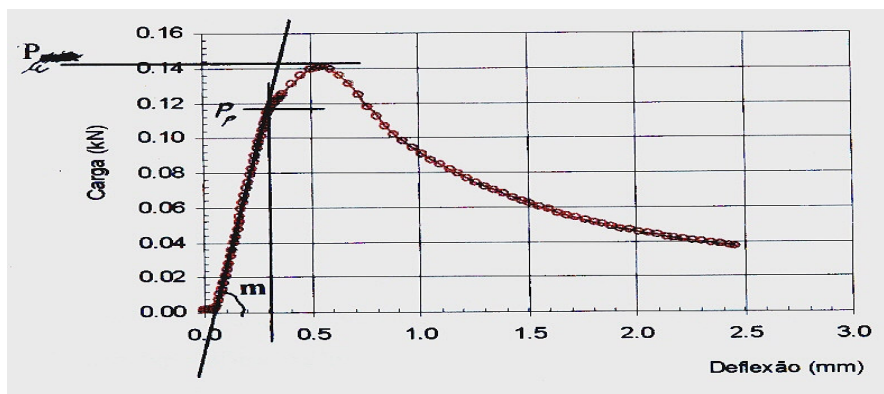


Figura 3.11 – Exemplo para determinação do módulo de elasticidade em flexão (Dos Anjos, 2002).

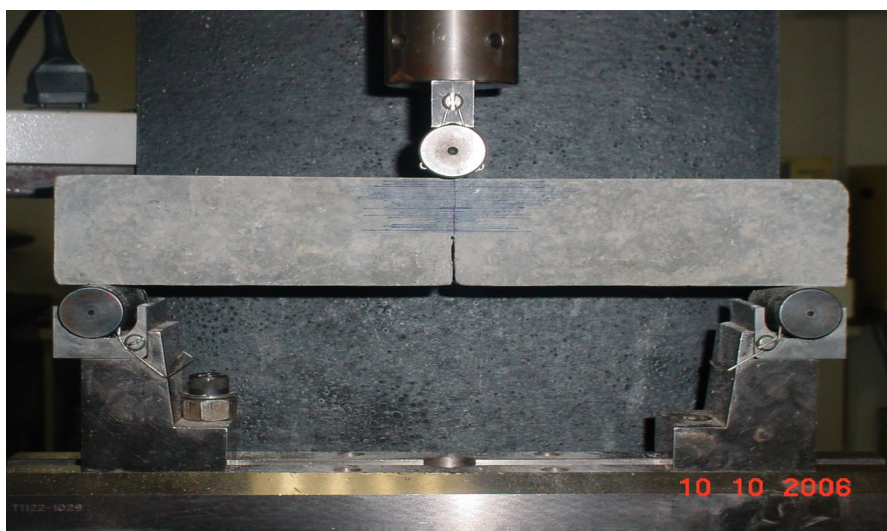


Figura 3.12 – Ensaio de flexão em corpo de prova com entalhe

3.2.3. Ensaio de Fadiga

Para determinar o comportamento em fadiga dos corpos de prova de 6% de polpa não refinada, foram levantadas as curvas de vida-fadiga (S-N) para corpos de prova sem e com entalhe e avaliadas a influência do nível de tensão aplicado na vida fadiga para essa microestrutura. Foram ensaiados 25 corpos de prova sem entalhe e 20 com entalhe.

Os níveis de tensões adotados configuram um carregamento que simula ensaios de fadiga de alto ciclo, uma vez que esses níveis foram mantidos abaixo do limite elástico dos compósitos em questão.

Através das curvas P - δ obtidas do ensaio monotônico dos corpos de prova obteve-se a carga correspondente ao limite de proporcionalidade, P_p . Foram escolhidos cinco níveis de carga máxima ($P_{\text{máx}}$) e carga mínima ($P_{\text{mín}}$), com valores inferiores a P_p .

A carga média, P_m , definida pela média aritmética entre $P_{\text{máx}}$ e $P_{\text{mín}}$, foi mantida constante. Assim sendo, os corpos de prova foram carregados ciclicamente entre uma carga máxima e uma carga mínima de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 3.1 – Cargas utilizadas no ensaio cíclico

$$P_m = 0.5 P_p$$

$P_{\text{máx}}$ (kN)	$P_{\text{mín}}$ (kN)
0.99 P_p	0.01 P_p
0.94 P_p	0.06 P_p
0.89 P_p	0.11 P_p
0.84 P_p	0.16 P_p
0.79 P_p	0.21 P_p

A vida fadiga para as condições de carregamento indicada na tabela 3.1 foi então determinada levantando o número de ciclos, N, até a falha dos corpos de prova, adotando-se uma frequência de carregamento de 30 Hz.

3.2.4.

Ensaio de crescimento de trinca

Para determinação da cinética de crescimento de trincas para os compósitos, é necessário a obtenção das curvas de tamanho da trinca (a) em função do número de ciclos de carregamento (N). Para atingir tais objetivos foram ensaiados 2 corpos de prova para cada microestrutura, utilizando-se uma máquina servo-hidráulica Instron série 851 Plus, com célula de carga de 10 t e carregamento do tipo tração-tração. Com um tempo de cura de 180 dias os compósitos tiveram suas superfícies lixadas, sendo posteriormente uma de suas superfícies riscada a cada 0,5 mm, com o objetivo de acompanhar a propagação da trinca.

3.3.

Determinação das curvas da/dN versus ΔK

Neste trabalho foram obtidas as curvas da taxa de crescimento de trincas de fadiga no Estágio II em função da faixa do fator de intensidade de tensões ΔK . Este intervalo pode ser calculado a partir da expressão:

$$\Delta K = K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}} = \frac{\Delta P}{BW^{1/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.7)$$

$$\Delta P = P_{\text{máx}} - P_{\text{mín}} \quad (3.8)$$

onde, ΔP se refere a faixa de variação da carga aplicada, f é uma função de a/W.

Nesse estágio a cinética de crescimento da trinca é expressa, matematicamente em função de ΔK de acordo com a lei de Paris.

Para a determinação das curvas a versus N , os corpos de prova foram submetidos a um carregamento cíclico com razão de tensão constante, onde as cargas máxima e mínima utilizadas foram definidas baseando-se nos resultados de ensaios monotônicos, com o objetivo de criar pré-trincas de fadiga de comprimento 1,0 mm à frente do entalhe de acordo com a norma ASTM E647-99.

Uma vez pré-trincados, os corpos de prova de 6% e 14% de polpa não refinada foram novamente submetidos a carregamento cíclico para observação do crescimento da trinca de fadiga. Foi utilizada uma lupa colada ao corpo de prova com aumento de 30 vezes. Cada vez que a trinca avançava 0,5 mm, o carregamento era interrompido para determinação do número de ciclos relativo ao seu crescimento. De posse da curva a versus N , foi possível determinar a taxa de crescimento de trinca através da inclinação da reta tangente para cada comprimento da trinca (a) e também a variação do fator de intensidade de tensões para cada valor de a , de acordo com a equação 3.7.

3.4. Análise Fractográfica e microestrutural

A análise microestrutural dos compósitos foi realizada através da utilização de um microscópio de varredura eletrônico (MEV), no Laboratório de Microscopia de Engenharia Metalúrgica da UFRJ. Através da utilização de lupa estereográfica foi possível visualizar a superfície de fratura dos compósitos, que foram fotografados, sem a necessidade prévia de preparação. As amostras utilizadas no MEV, foram obtidas e preparadas a partir dos corpos de prova ensaiados em flexão. Para a análise fractográfica, cortaram-se amostras de (1,5 x 2) cm, que tiveram uma fina camada de ouro depositadas em suas superfícies antes de serem examinadas.