

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1. Produção dos compósitos

Para a realização dos ensaios de flexão, impacto Charpy, impacto balístico e condutividade térmica foram produzidos corpos-de-prova de geometrias distintas porém através do mesmo procedimento. Entretanto, para cada tipo de compósito foi utilizada uma forma de produção. Os procedimentos de produção se dividem em 3 os quais são:

- Processo Hatschek modificado: utilizado para produção de compósitos de matriz cimentícia reforçados por fibras naturais.
- Processo Manual: utilizado para produção de argamassa reforçada por fibras curtas de sisal
- Processo de Laminação: utilizado para produção de bambu laminado.

A seguir os diferentes processos de produção são descritos.

5.1.1. Processo Hatschek modificado

Para a fabricação dos compósitos através do processo Hatschek modificado os seguintes materiais foram utilizados:

- Matriz: Cimento Portland CII-32 F.
- Reforço: Polpa de sisal, polpa de bambu, polpa de eucalipto, wollastonita NYAD 325 - Razão de aspecto (L/D) = 5:1

As frações em massa dos reforços utilizados na confecção dos corpos-de-prova foram:

- Polpa de sisal, polpa de bambu e polpa de eucalipto => 8 % e 14% em relação à massa de cimento.
- Wollastonita => 11,5% em relação à massa de cimento
- Compósitos Híbridos wollastonita + polpa de bambu => 8% de polpa de bambu + 11,5 % de wollastonita e 14% de polpa de bambu + 11,5% de wollastonita.

O procedimento de preparação dos corpos-de-prova através do processo Hatschek modificado foi feito da seguinte forma:

As fibras devidamente secas em estufa na temperatura de 50 °C durante 24h foram pesadas nas proporções acima citadas. Como estas foram recebidas em grumos (com exceção da wollastonita) foi necessária a dispersão das mesmas em água. A dispersão foi feita usando-se um misturador de hélice, conforme mostrado na figura 5.1, a 2400 rpm durante um tempo de aproximadamente 15 minutos. Após esse procedimento o cimento foi adicionado e misturado com a fibra durante 5 minutos.



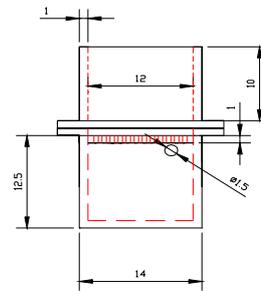
Figura 5.1 – Dispersão da polpa.

A mistura foi então colocada em uma forma de acrílico com seção transversal de 120mm x 120mm. Essa forma é dotada de furos para permitir a aplicação de vácuo. A figura 5.2 mostra o vazamento da mistura na forma e o esquema de furação para aplicação do vácuo. O volume de material calculado foi

o necessário para que se fabricasse uma placa nas dimensões da forma e com espessura de 7 mm. Após despejar a mistura, o vácuo foi acionado até que a superfície do compósito ficasse seca. Este processo foi executado em cerca de 5 minutos.



(a)



(b)

Figura 5.2 – Forma de Acrílico para confecção dos corpos-de-prova. (a) Vazamento da forma e (b) dimensões em cm.

Junto à aplicação do vácuo foi necessário regularizar a superfície do compósito através da aplicação de golpes com um soquete metálico como é mostrado na figura 5.3.



Figura 5.3 – Regularização da superfície do compósito com auxílio de soquete metálico.

Foi necessário compactar o material de forma a retirar o excesso de água ainda existente obtendo-se assim um menor fator água/cimento. Para isso os compósitos foram dispostos entre placas de aço de espessura de 2 mm e colocados na máquina de compressão. Foram colocados 6 compósitos de uma só vez e aplicada uma tensão de 3,2 MPa, que para a área usada corresponde a um carregamento de 4,6 t, conforme mostrado na figura 5.4.



(a)



(b)

Figura 5.4 – Detalhe da compressão dos corpos-de-prova. (a) prensa (b) seis corpos-de-prova sendo prensados.

A carga foi mantida por 5 minutos após atingir 4,6 t. Com esse procedimento conseguiu-se um fator água/cimento em torno de 0,3. Os corpos-de-prova foram curados em sacos plásticos fechados durante 2 semanas e então expostos ao ar durante 90 dias.

5.1.1.1. Compósitos sanduíche

Para o compósito reforçado por polpa de bambu também foram produzidos compósitos sanduíche com alumínio.

Material :

- Compósito reforçado por polpa de bambu nas proporções de 8% e 14% em massa.
- Chapa de alumínio (liga 5052 H34) com 0,8 mm de espessura (propriedades no quadro 5.1).
- Compound Adesivo Gel fornecido pela Otto Baumgart (propriedades no quadro 5.2).

Quadro 5.1 – Propriedades mecânicas do alumínio liga 5052 H34.

Limite de resistência à tração (MPa)		Limite de escoamento (MPa)	Alongamento mínimo em percentagem (50 mm) 1,6 mm de espessura	Dureza Brinell (HB)
mínimo	máximo	180	6	67
235	285	-	-	-

Para a fabricação do compósito sanduíche, duas chapas de alumínio foram coladas em ambas as faces do compósito cimentício reforçado por polpa de bambu. Para isso foi utilizado o Compound Adesivo Gel com cura a frio. Após a colagem foi aplicada uma pressão de 1 MPa durante 24 horas.

Quadro 5.2 – Propriedades mecânicas do Compound Adesivo Gel.

Consistência	Alta fluidez
Resistência à compressão Inicial - 6h Final - 7 dias	60 MPa 115 MPa
Resistência à tração na flexão 7 dias	45 MPa
Resistência à aderência à tração (superfície de concreto) 7 dias	2,5 MPa
Espessura por demão	700µm

5.1.2. Processo manual

Este processo foi utilizado apenas para a produção de argamassa de cimento e areia reforçada por fibras curtas de sisal.

Os seguintes materiais foram utilizados:

Matriz:

- Cimento Portland CII-32 F.
- Areia - diâmetro máximo dos grãos = 0,3 mm.

Reforço:

- Fibra de sisal cortadas em 25mm ($V_f = 3\%$).

Para a fabricação destes compósitos foi utilizada argamassa de traço 1:1:0,45 (cimento : areia : fator água/cimento). Primeiramente a areia foi seca em estufa por 24 h e posteriormente pesada conforme necessário. O cimento e a areia seca foram misturados sendo depois adicionados 70 % do total de água a ser utilizada, o que proporcionou boa trabalhabilidade à mistura. A partir deste ponto as fibras de sisal começaram a ser adicionadas e misturadas com o auxílio de uma espátula em um tacho conforme a figura 5.5.



Figura 5.5 – Mistura manual da argamassa com fibra de sisal.

A água foi então adicionada alternadamente com a adição e mistura das fibras de sisal até se obter uma mistura bem homogênea. Após esta fase a mistura foi colocada em uma forma de madeira com capacidade para seis corpos-de-

prova de dimensões de 120 mm x 120 mm x 7 mm conforme mostra a figura 5.6. O despejo da mistura na forma foi feito em 3 camadas iguais alternando com vibração em mesa vibratória para um melhor adensamento. A forma foi dotada de um filme de PVC para facilitar a desforma dos corpos-de-prova.



Figura 5.6 – Forma preenchida por argamassa reforçada por fibras de sisal.

Após dois dias na forma os corpos-de-prova foram retirados cuidadosamente e curados por 28 dias imersos em água, como mostra a figura 5.7. Depois de retirados da água, ficaram expostos ao ar até a data dos ensaios.



Figura 5.7 – Compósitos de sisal em cura na água.

5.1.3. Processo de laminação

Para este estudo foi escolhido o bambu Moso (*Phyllostachys heterocycla pubescens*) com 5 anos de idade. Para o seu tratamento, foi utilizada água fervida para a eliminação de pragas que poderiam atacar os mesmos. Esta técnica foi preferida em detrimento ao uso de algum inseticida, por se tratar de um produto natural para construção sustentável, sendo contraditório o uso de algum produto químico.

Como não existem máquinas apropriadas para a produção de laminados de bambu no Brasil foram feitas várias tentativas até que se chegasse a uma técnica de extração de laminados com maior facilidade e menor tempo. Pode-se dividir esta fase de testes de produção em 3 etapas:

1 – Produção manual: nesta fase foi feita uma tentativa de cortar os laminados de forma manual utilizando-se para isto apenas um facão, uma serra manual e um martelo. Esta é a forma mais artesanal de todas, demandando mais tempo e paciência porém é a que consome menos energia. O procedimento pode ser explicado e dividido nas seguintes fases:

- Corte do Bambu em tiras de 30 a 40 mm de largura como pode ser apreciado nas figuras 5.8.a e 5.8.b, perfazendo um total de 6 tiras para este tipo de bambu com diâmetro de aproximadamente 100 mm.
- No processo manual não é possível fazer lâminas de grandes comprimentos, por isso o bambu foi cortado em dimensões ligeiramente superiores àquela necessária para os ensaios, conforme pode ser verificado na figura 5.8.c.
- A partir das tiras tornou-se necessário cortar a lâmina. Para isso foi preciso cortar com o auxílio de facão e martelo até que as tiras ficassem com uma geometria retangular na medida desejada. Este processo pode ser melhor compreendido visualizando a figura 5.8.d.

- Finalmente obteve-se o produto final conforme é visualizado na figura 5.8.e

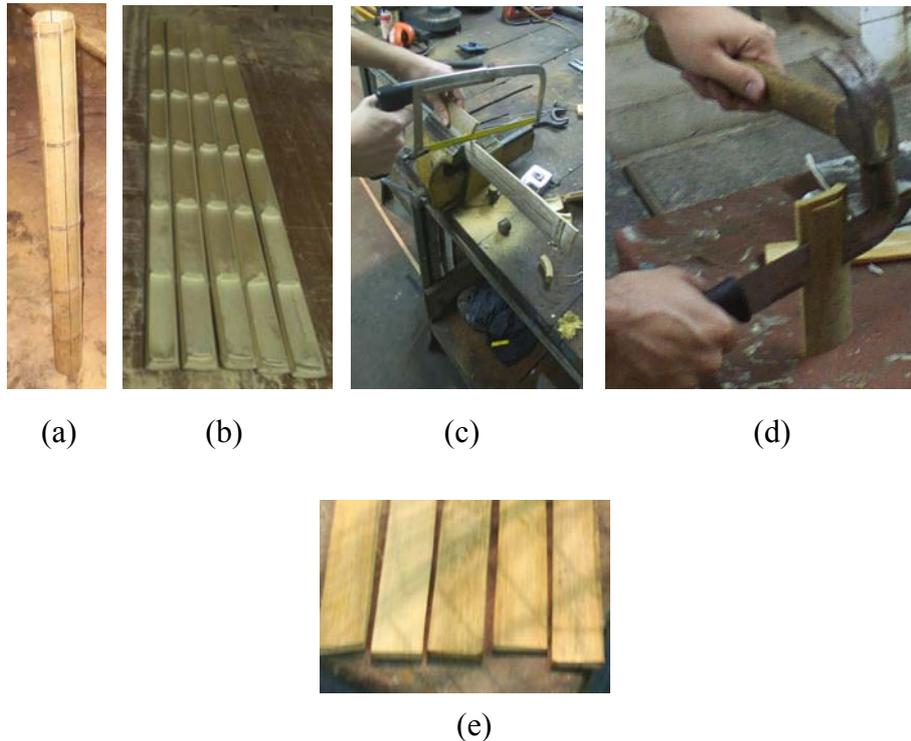


Figura 5.8 – Processo manual de fabricação de lâminas de bambu.

2 – Produção manual - mecânico 1: Neste processo utilizou-se a mesma metodologia do processo anterior, porém com auxílio de uma serra circular. Com este procedimento foi possível cortar laminados de qualquer tamanho em um menor tempo quando comparado ao primeiro processo. Este processo pode ser exemplificado pelas seguintes etapas:

- Da mesma forma que o processo anterior, a partir de um bambu em sua forma natural foram extraídas deste tiras de 30 a 40 mm de largura, porém desta vez foi utilizada uma serra circular conforme pode ser visto na figura 5.9.a.
- Uma vez cortadas, as tiras de bambu foram desbastadas na serra circular até obter-se uma geometria retangular conforme figura 5.9.b e 5.9.c.
- A forma final do laminado obtido por esse método pode ser apreciada na figura 5.9.d.

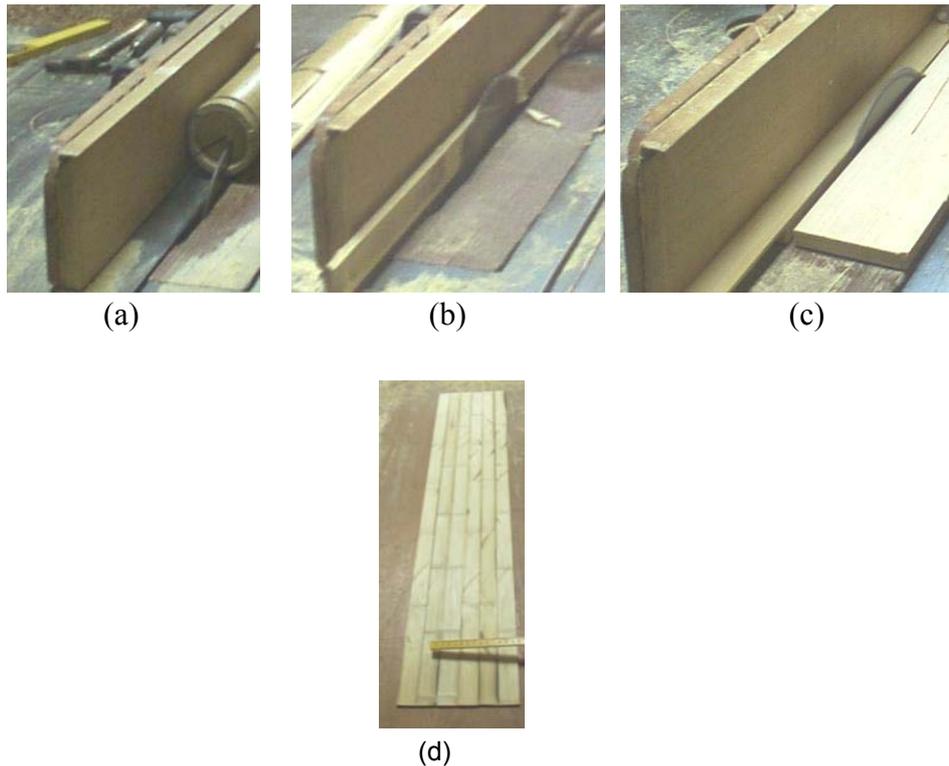


Figura 5.9 – Método de fabricação de laminas através do processo manual-mecânico 1.

3 – Produção manual - mecânico 2: Este tipo de produção foi a mais rápida tendo sido utilizada neste trabalho. A diferença em relação ao método manual - mecânico 1 deve-se ao fato da utilização do desengrosso para desbastar o bambu conseguindo assim a geometria desejada. Sua única desvantagem deve-se ao fato de ser mais indicado para bambus de parede mais espessas (gêneros *Dendrocalamus* e *Guadua*, por exemplo), não muito adequado para a espécie objeto do presente experimento. Vários laminados foram perdidos pelo fato do bambu utilizado ter parede pouco espessa e não ser possível desbastar a mesma no desengrosso. O processo de produção foi o seguinte:

- Da mesma forma que no processo anterior as tiras de bambu foram extraídas utilizando-se uma serra circular como pode ser visto na figura 5.10.a.

- Em seguida a parte interna dos nós do bambu foi retirada fazendo uso de uma serra de fita conforme figura 5.10.b. O bambu foi então inserido no desengrosso (figura 5.10.c) previamente ajustado para alcançar a espessura desejada. Obtém-se então o produto final: o laminado de bambu.



(a)

(b)

(c)

Figura 5.10 – Processo de fabricação de lâminas de bambu através do processo manual – mecânico 2.

5.1.3.1.

Laminado colado e sanduíche bambu-alumínio

Para a fabricação dos laminados colados, as lâminas, originalmente com 30 mm de largura e aproximadamente 1500 mm de comprimento, foram cortadas em lâminas menores com 120 mm x 30 mm. Estas então foram coladas lado a lado formando placas de 120 mm x 120 mm, com 3 camadas dispostas ortogonalmente entre si atingindo uma espessura final de aproximadamente 17 mm. Foi utilizado Resorcinol formol como material adesivo (nome comercial Cascophen RS) aplicando-se uma pressão de 1 MPa durante 24 horas.

Já estão sendo estudados no Brasil adesivos à base de mamona, que seriam mais ecologicamente corretos no uso com o bambu. Entretanto, devido à falta de disponibilidade deste adesivo durante a pesquisa fez-se necessário o uso de um adesivo de origem química com risco a saúde grau 1.

Para a fabricação dos compósitos sanduíche bambu-alumínio foi utilizado o alumínio liga 5052 H34 com 0,8 mm de espessura e cujas propriedades constam no quadro 5.1. O compósito sanduíche foi feito utilizando-se o laminado colado citado no parágrafo anterior, colando-se duas chapas do alumínio em

ambas as faces do laminado colado. Este ficou com dimensões nominais de 120 mm x 120 mm x 17 mm e foi somente ensaiado no teste de impacto balístico.

5.2. Testes mecânicos

5.2.1. Impacto Charpy

Para o teste de impacto Charpy, corpos-de-prova na dimensão nominal de 120 mm x 15 mm x 7 mm foram cortados das placas de 120 mm x 120 mm previamente fabricadas. As dimensões dos corpos-de-prova foram adaptadas do Rilem Draft Recommendations (1984). Os ensaios de impacto foram feitos em uma máquina de impacto Charpy Ceast-Resil Impactor modelo 6967, como mostrado na figura 5.11, tendo sido ensaiados 18 corpos-de-prova de cada compósito. O martelo utilizado para o ensaio dos compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais possui energia de 2 J. Já o martelo utilizado para o teste de impacto do compósito sanduíche produzido por cimento reforçado por fibras naturais e alumínio possui energia de 4 J. E finalmente para o laminado de bambu foi utilizado o martelo com 5,5 J. A razão para a utilização do teste de impacto Charpy foi devido à facilidade na sua utilização e ao fato de que este pode ser instrumentado permitindo assim a obtenção de informações referentes ao processo de absorção e dissipação de energia. O equipamento utilizado neste estudo é dotado de instrumentação na cabeça do martelo o qual mede a força exercida sobre o corpo-de-prova. A velocidade de impacto, deflexão do corpo-de-prova, tempo de impacto, energia absorvida e tenacidade, assim como gráfico força x tempo, também foram obtidos através de instrumentação e processados pelo programa de aquisição de dados. Este tipo de teste apresenta algumas desvantagens como o fato da curva força x tempo sempre conter oscilações harmônicas de alta frequência, resultado da resposta natural do impactador (Cantwell et al., 1991). Entretanto, estes efeitos podem ser filtrados uma vez que as frequências harmônicas sejam determinadas.

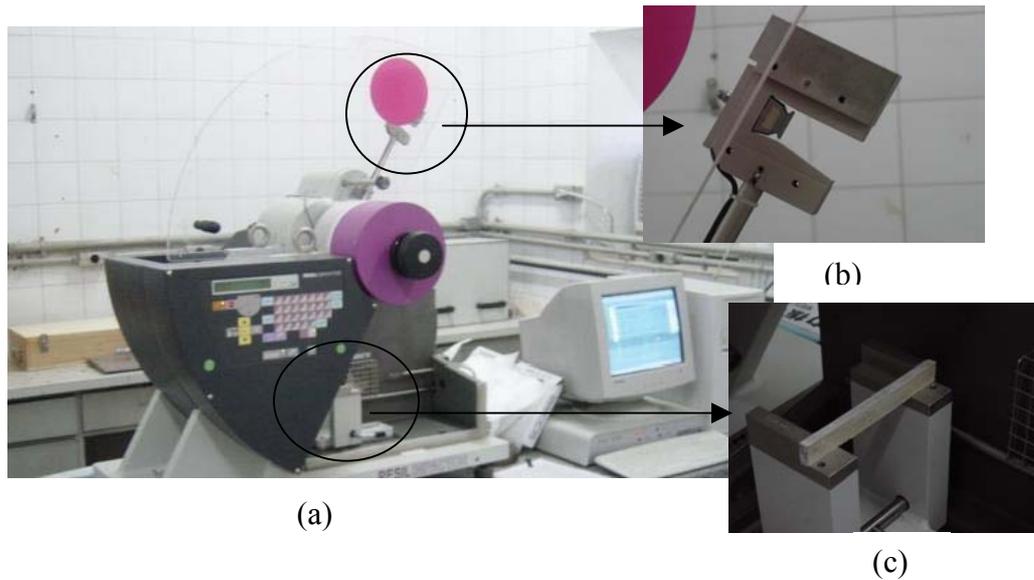


Figura 5.11 – Aparato de ensaio de impacto Charpy. (a) vista geral da Ceast Resil Impactor (b) Detalhe do martelo (c) Detalhe do apoio.

5.2.2. Flexão em 3 pontos

O ensaio de flexão foi realizado para possibilitar o cálculo da tenacidade do material através de um ensaio estático. Naturalmente o ensaio foi útil para a obtenção da tensão de flexão e módulo de elasticidade dos materiais, dados estes que são de grande importância para caracterização mecânica de qualquer material. Para tal foram utilizados corpos-de-prova com dimensões nominais de 120 mm x 38 mm x 7 mm (comprimento x largura x espessura) para os compósitos cimentícios, 120 x 30 x 6 para os laminados de bambu e 120 x 38 x 6 para os laminados colados. Foram ensaiados 9 corpos-de-prova de cada tipo. O ensaio de flexão em 3 pontos foi escolhido por possuir geometria semelhante ao ensaio de impacto Charpy. Para este ensaio utilizou-se uma máquina de ensaios Instron 5500 R, como pode ser visto na Figura 5.12, com velocidade de deslocamento do travessão de 0,5 mm/min e vão de 100 mm.

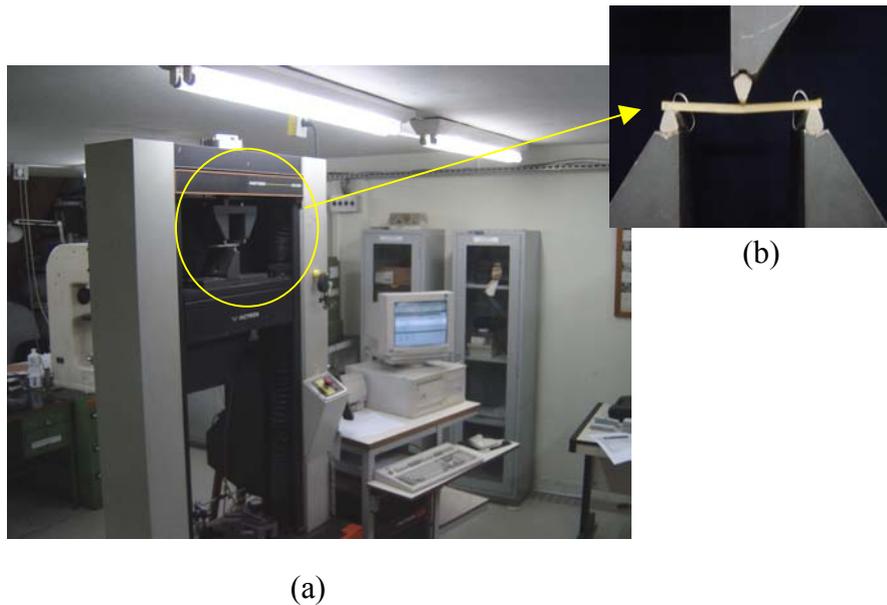


Figura 5.12 – Aparato do ensaio de flexão. (a) vista geral da Instron 5500R. (b) Detalhe do apoio.

O módulo de ruptura foi calculado de acordo com a equação 5.1 mostrada a seguir:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (5.1)$$

onde, b = largura, d = espessura, P = carga e L = vão

A tenacidade foi calculada como a área sob a curva carga x deslocamento até um decréscimo de 40 % da carga máxima, com exceção dos corpos-de-prova de bambu cuja tenacidade que foi calculada apenas até a carga máxima. Isto ocorreu porque a velocidade de deslocamento do travessão utilizada para os laminados de bambu não foi adequada. Sendo este, um material muito flexível o equipamento de aquisição de dados não possuía capacidade de armazenar os dados até que se chegasse a 40% da carga máxima.

O módulo de elasticidade na flexão foi calculado através da equação 5.2:

$$MEF = \frac{mL^3}{4bd^3} \quad (5.2)$$

onde,

MEF = módulo de elasticidade em flexão

m = inclinação da curva carga x deflexão

L = Vão

b = largura do corpo-de-prova

d = espessura do corpo-de-prova

5.2.3. Impacto balístico

Para este ensaio foram utilizados apenas corpos-de-prova feitos de bambu laminado colado em sanduíche com alumínio. Suas dimensões nominais de 120 mm x 120 mm x 17 mm. Não foi possível a realização do ensaio de impacto Charpy nestes corpos-de-prova devido ao fato dos mesmos necessitarem de energia de impacto superior a 5.5 J (Energia de impacto máximo do equipamento disponível). Pensou-se em fazer ensaios de impacto por queda de peso, porém não foi encontrada a tempo uma instituição que pudesse disponibilizar para esta pesquisa o equipamento supra citado. Achou-se válido então a utilização do ensaio de impacto balístico para a caracterização ao impacto deste material, por ser este um teste em que se pode controlar a velocidade e a massa do impactador.

Este teste foi realizado no campo de provas do Exército, localizado na Restinga de Marambaia (RJ), seguindo a norma NIJ 0101.04 (2001). Foi utilizado para este ensaio uma arma de pressão a gás AVL e instrumentação, a qual foi feita por duas barras ópticas ligadas a um cronógrafo AVL B212, para se medir a velocidade de impacto, conforme figura 5.13. A distância entre a arma e o corpo-de-prova foi de 5 m. Primeiro foi feita uma tentativa utilizando-se munição e velocidade de impacto previstos no nível de resistência tipo IIA da norma referida. Este nível prevê munição 9 mm com massa nominal de 8,0 gramas e velocidade de impacto mínima de 332 m/s.

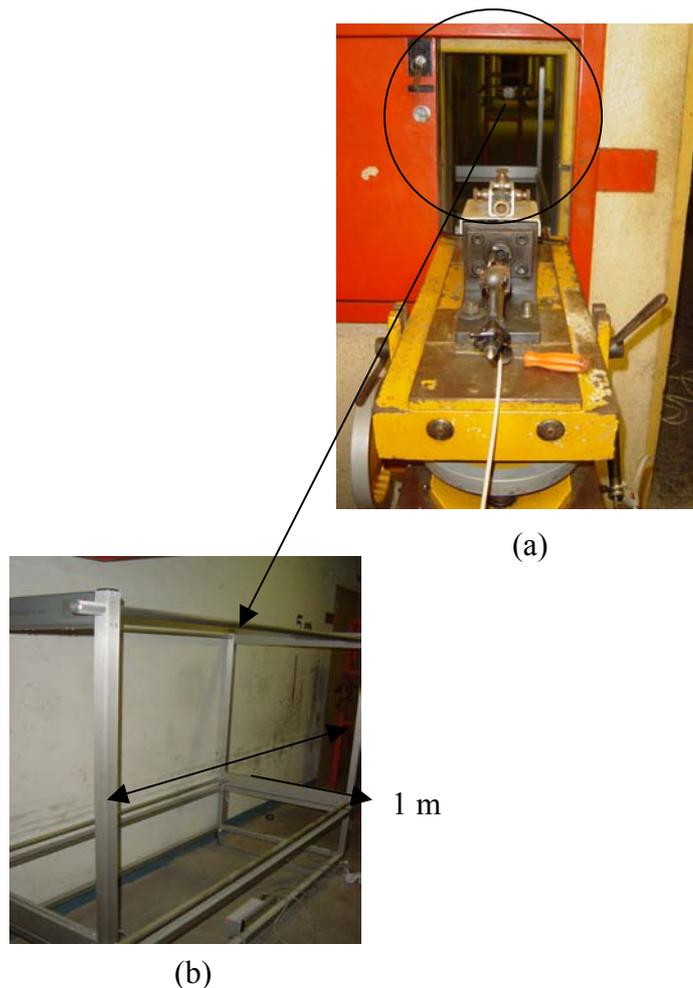


Figura 5.13 – Detalhes do ensaio de impacto balístico.(a) Provete sobre suporte com regulagem. (b) Barras ópticas AVL B470.

O teste foi feito em dois corpos-de-prova sendo que em ambos o projétil perfurou o corpo-de-prova. Decidiu-se então passar para um nível mais baixo: o tipo I no qual prevê munição 0.380 com massa de 6,2 gramas e velocidade de impacto mínima de 312 m/s. Como esta munição não estava disponível decidiu-se por utilizar apenas a velocidade do tipo I com munição do tipo II A. O teste foi realizado em dois corpos-de-prova e mais uma vez este foi perfurado pelo projétil. Como só dispunha-se de mais dois corpos-de-prova, foi decidido encerrar o teste para em uma outra ocasião utilizar os mesmos com uma munição de menor massa. As condições de contorno (engaste nos quatro lados) e os corpos-de-prova perfurados podem ser vistos na figura 5.14. Apesar deste ser um laboratório do Exército, único capaz de realizar este tipo de ensaio, foi verificada falha na

simulação das condições de contorno. Não era possível o controle da pressão exercida nos quatro engastes como pode ser visto na figura 5.14.

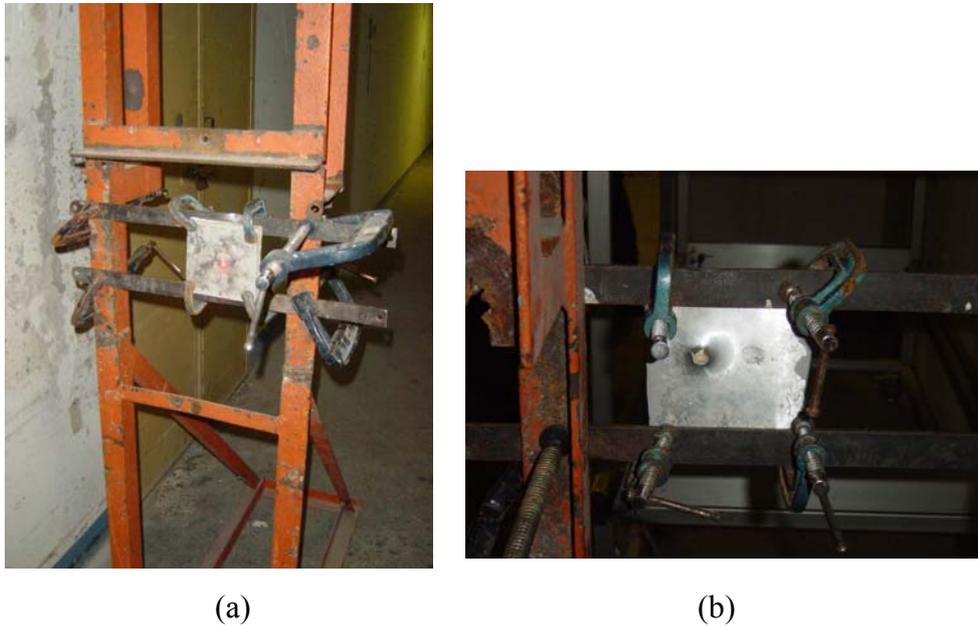


Figura 5.14 – Detalhe das condições de contorno dos corpos-de-prova. (a) Corpo antes de ser impactado e (b) após o impacto.

5.3. Dureza

O teste de dureza foi realizado no alumínio utilizado na fabricação do bambu laminado sanduíche e na munição 9 mm utilizada no ensaio balístico. A motivação para a realização deste ensaio foi a de se comparar a dureza superficial do alumínio com a da munição 9 mm podendo então se justificar em parte a perfuração total do material, caso a dureza do projétil seja muito superior a do alumínio.

Foi realizado um ensaio de microdureza Vickers em um equipamento Shimadzu HVM-2000 devido à pouca espessura dos materiais. Para isso os corpos-de-prova tiveram que ser embutidos em baquelite e devidamente lixados e polidos com pasta de diamante de $4\mu\text{m}$. A representação do ensaio e os corpos-de-prova embutidos estão mostrados na figura 5.15.

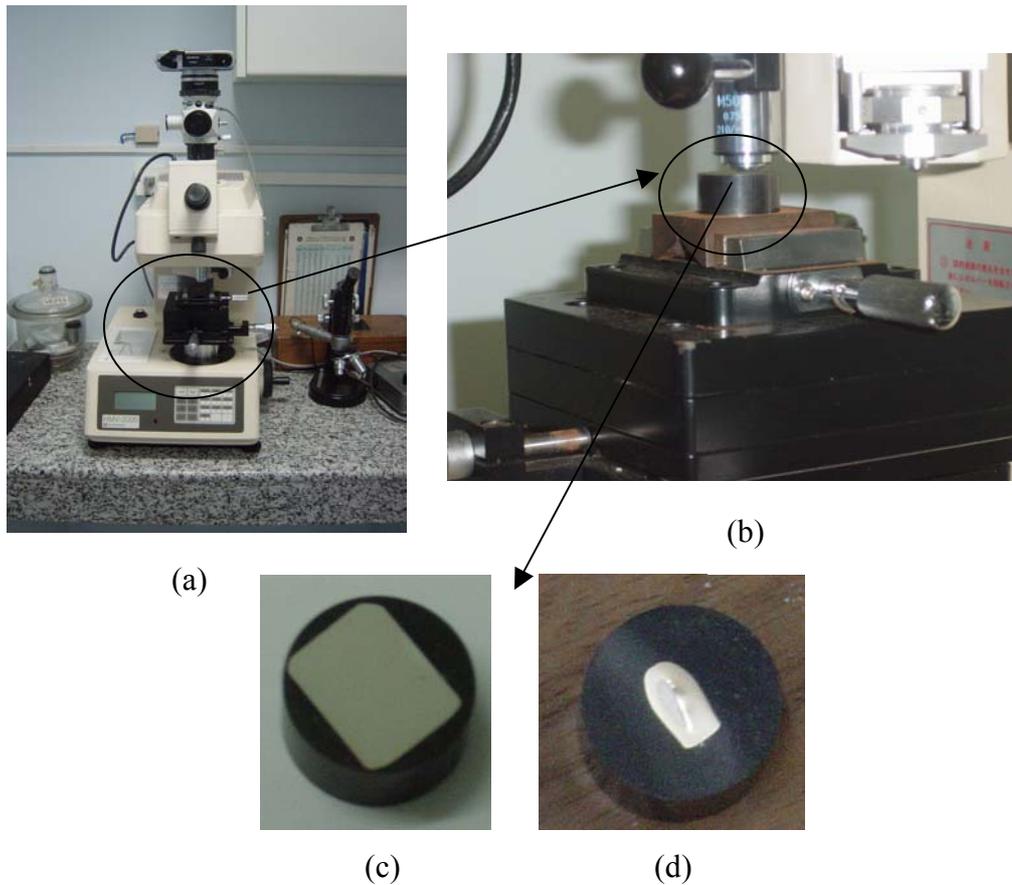


Figura 5.15 - Equipamento para ensaio de microdureza. (a) vista do microdurômetro, (b) detalhe do ensaio, (c) alumínio embutido e (d) munição calibre 9 mm embutida.

Para o cálculo da dureza Vickers “HV” foi aplicada uma força “F” de 100 gramas em ambos os materiais. O valor da Vickers é o quociente da carga (em kg) aplicada pela área de impressão “A” (em mm²) deixada no corpo-de-prova:

$$HV = \frac{F}{A} \tag{5.3}$$

A máquina que faz o ensaio não fornece o valor da área de impressão, que no caso da dureza Vickers tem a forma geométrica de uma pirâmide. Dessa forma se faz necessário a medida das diagonais formadas pelos vértices opostos dessa

pirâmide através de um microscópio ótico acoplado ao microdurômetro. Assim calcula-se a área através da fórmula :

$$A = \frac{d^2}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{136}{2}\right)} \quad (5.4)$$

Substituindo a equação 5.4 em 5.3 temos:

$$HV = \frac{F}{\frac{d^2}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{136}{2}\right)}} \Rightarrow HV = \frac{1,8544F}{d^2} \quad (5.5)$$

Sendo, $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ (mm)

A representação da dureza Vickers é feita pelo valor da dureza, seguido do símbolo HV e da carga aplicada em kg.

5.4. Condutividade térmica

Como uma complementação da análise do comportamento dos compósitos achou-se válido determinar se o material é um bom isolante térmico, uma propriedade muito importante para materiais utilizados em vedações e coberturas. Para isso teve-se como projeto inicial a determinação da condutividade térmica de todos os materiais analisados utilizando-se para isso três tipos de ensaios diferentes. O primeiro ensaio seria o da placa protegida grande (“Guarded Hot Plate”), o segundo o da placa protegida pequena e o terceiro o Nano-Flash. Por problemas diversos só foi possível a determinação da condutividade térmica em apenas um material, o compósito cimentício reforçado por polpa de bambu na proporção de 8% e em apenas um tipo de ensaio, o da placa protegida grande.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia e Transmissão de Calor (LTTC) do Departamento de Engenharia Mecânica da Coppe/UFRJ. Para tal foi utilizado o método da placa protegida grande como pode ser visto na figura 5.16 com corpo-de-prova de dimensões de 200 mm x 200 mm x 7 mm.

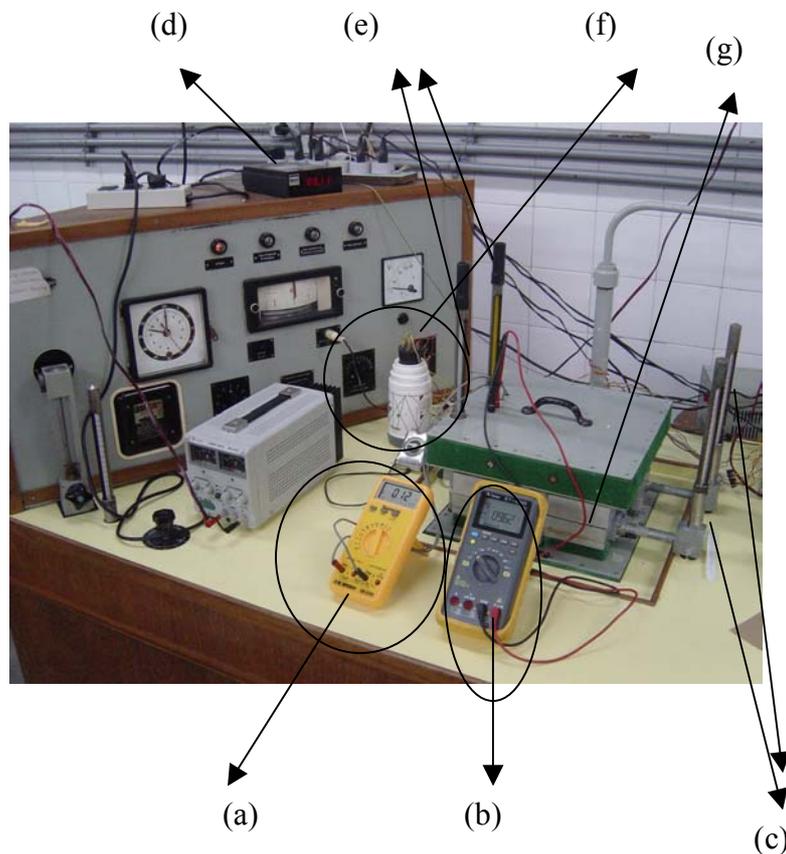


Figura 5.16 – Aparato para medição da condutividade térmica.

Este equipamento montado pelo LTTC da UFRJ é dividido em 4 partes: duas placas protegidas (g), sistema de aquecimento e refrigeração, painel de controle e o sistema de aquisição de dados. Neste caso o painel de controle foi substituído por componentes mais modernos : volímetro (a), amperímetro (b), termopilha (d) e termopares (f) ligados ao termômetro e a uma placa de aquisição de dados em um computador.

Na técnica da placa protegida o corpo-de-prova é mantido entre duas placas com temperaturas diferentes, uma fria e outra quente. A placa quente localizada na parte superior é mantida assim através da circulação de água proveniente de um calorímetro. No interior desta placa situa-se um chapa metálica

de aquecimento elétrico fornecendo um fluxo de calor constante para a amostra. A temperatura da placa inferior (placa fria) é mantida constante através da circulação de água fria. O objetivo de se manter a placa protetora na mesma temperatura da placa interna é o de se evitar perdas de calor laterais e superior da placa de aquecimento, de forma que no estado estacionário a potência elétrica que alimenta a placa de aquecimento é proporcional ao fluxo de calor através do material a ser ensaiado. O ensaio está assim de acordo com a lei de Fourier.

Existem dois termômetros que medem a temperatura de entrada e saída da placa quente (e) e dois que medem a temperatura de entrada e saída da placa fria (c). Por meio destes é determinada a temperatura média do trocador de calor existente na placa de refrigeração e na placa protetora do aquecimento, resultando num gradiente térmico existente na amostra. A potência elétrica fornecida pela chapa de aquecimento elétrico é calculada a partir da determinação, através de um voltímetro (a) e de um amperímetro (b), da voltagem (em volts) e da corrente elétrica em mA (miliamperes). Utiliza-se uma termopilha (d) para medir a diferença de temperatura entre as placas.

O ensaio termina quando a diferença de temperatura entre as placas é zero. O procedimento de cálculo é o seguinte:

TEF = Temperatura de entrada da placa fria.

TSF = Temperatura de saída da placa fria.

TEQ = Temperatura de entrada da placa quente.

TSQ = Temperatura de saída da placa quente.

A = Corrente (miliamperes)

V = Tensão (volts)

a = área superficial (m²)

e = espessura

$$TFM = \frac{TEF + TSF}{2} \quad (\text{temperatura média da placa fria}) \quad (5.6)$$

$$TQM = \frac{TEQ + TSQ}{2} \quad (\text{temperatura média da placa quente}) \quad (5.7)$$

$$DTA = TQM - TFM \quad (\text{gradiente térmico}) \quad (5.8)$$

$$q'' = \frac{VA}{a} = \frac{W}{m^2} = \text{Fluxo de calor} \quad (5.9)$$

$$k = \frac{q'' \cdot e}{DTA} = \frac{W}{m \cdot K} = \text{Condutividade térmica} \quad (5.10)$$

5.5. Termogravimetria (TGA)

Sabe-se que as fibras vegetais resistem apenas a temperaturas moderadas. Para estabelecer-se a que temperatura a resistência mecânica destas fibras é comprometida fez-se uma análise termogravimétrica. Esta análise foi feita nas polpas de bambu, de sisal, de eucalipto e no bambu em seu estado natural. Amostras de aproximadamente 20 mg foram pesadas para o teste e ensaiadas sob fluxo de N₂. A temperatura foi variada da ambiente a 400 °C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Os testes foram realizados no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio em uma STA 1500 da Polymer Laboratories, como pode ser visto na figura 5.17.



Figura 5.17 – STA 1500 da Polymer Laboratories.

5.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A superfície de fratura dos compósitos foi analisada em um microscópio eletrônico de varredura (ZEISS DSM 960). Para o ensaio de impacto todas as amostras foram analisadas, entretanto para o ensaio de flexão apenas os compósitos cimentícios com 8 % de reforço foram analisados, como também o laminado de bambu. O equipamento usado está mostrado na figura 5.18.

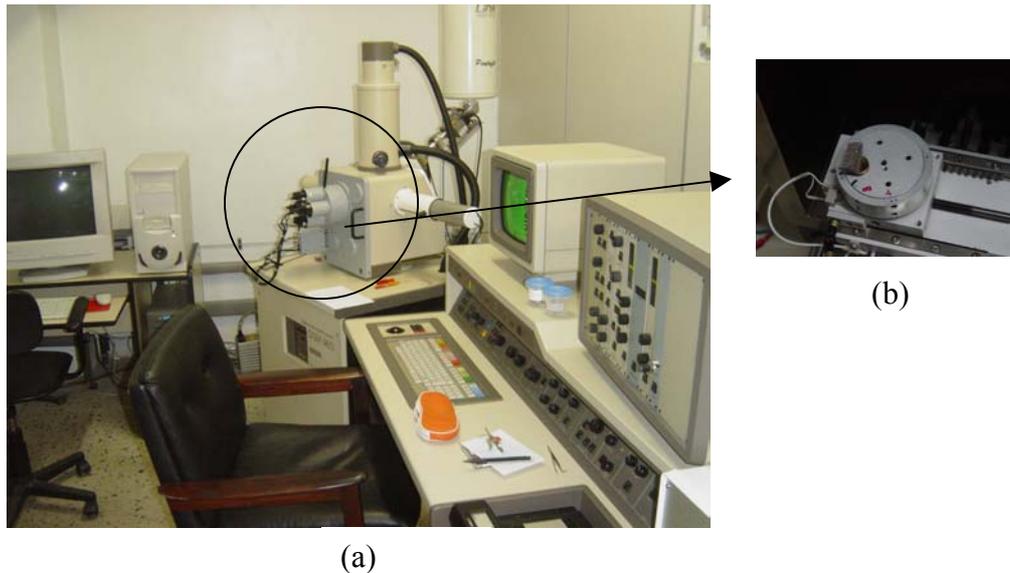


Figura 5.18- Microscópio eletrônico de varredura.(a) Vista geral (b) Detalhe da amostra no porta-amostra.

Usou-se o detector de elétrons secundários, sendo que em alguns casos usou-se o detector de elétrons retroespalhados para uma melhor visualização de elementos com massa atômica diferente. As amostras analisadas foram previamente metalizadas com ouro, utilizando uma evaporadora BALZERS SCD 050 mostrada na figura 5.19. As análises no MEV foram feitas com voltagem de aceleração do feixe de elétrons de 20 kV.



Figura 5.19 – Evaporadora Balzers SCD 050.

5.7. Determinação dos índices físicos

Os índices físicos foram determinados através da norma RILEM (1984) e ASTM C1185 (1995). Estes índices são: densidade seca, absorção de água e porosidade aparente. Usaram-se corpos-de-prova empregados nos ensaios mecânicos e os índices físicos foram determinados através das equações mostradas a seguir:

$$D = \frac{M_d}{M_s - M_{\text{sub}}} \quad (5.11)$$

$$W_a = \frac{M_s - M_d}{M_d} 100 \quad (5.12)$$

$$P_a = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_{\text{sub}}} 100 \quad (5.13)$$

Onde,

D = densidade (g/cm^3)

W_a = Absorção de água (%)

P_a = porosidade (%)

M_d = massa seca (g)

M_s = massa saturada (g)

M_{sub} = massa submersa (g)

Note: $M_s - M_{\text{sub}} = \text{volume em cm}^3$. Multiplicar por 10^3 para obter densidade em kg/m^3 .

5.8. Determinação do comprimento de fibra

O comprimento das fibras extraídas da polpa de bambu é uma propriedade difícil de se determinar, sendo este procedimento muitas vezes omitido na literatura. Determinou-se o comprimento das fibras extraídas da polpa do sisal através de técnicas de processamento digital de imagens. As fibras foram retiradas da polpa (a qual foi fornecida em forma de papel Kraft) com o auxílio de uma pinça. Estas fibras foram então colocadas sobre a superfície de um digitalizador de mesa num total de aproximadamente 20 fibras por etapa, perfazendo no final 92 amostras. As fibras foram digitalizadas em um Studio Scan II Si da AGFA utilizando-se uma resolução de 800 dpi (“dots per inch” ou pontos por polegada). Esta resolução foi suficiente para se conseguir medir o tamanho da fibra em uma segunda etapa. As imagens digitalizadas foram exportadas para o programa AxioVision 4.1. Através deste programa o comprimento das fibras foi determinado um a um. O programa permite que o usuário meça a fibra através de ferramenta parecida com a utilizada em programas de CAD (“Computer Aided Design” ou projeto com auxílio de computador) enquanto essas medidas são exportadas para um arquivo texto. Dessa forma é possível se medir rapidamente uma grande quantidade de amostras e ao mesmo tempo ter os dados disponíveis digitalmente para uma posterior análise estatística.