

3.0

Procedimento Experimental

3.1

Materiais utilizados

Na produção dos compósitos foram utilizadas fibras vegetais de curauá, juta e sisal, como elementos de reforço, e matriz de argamassa de cimento Portland. Como mistura de referência foi tomada a argamassa plena, com o intuito de evidenciar as diferenças de desempenho das misturas com e sem reforço.

O cimento utilizado foi o Portland composto com filler (CPII-F-32), da marca Mauá. A água utilizada foi obtida da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural, oriunda da região metropolitana do Rio de Janeiro. Para esse agregado, foi determinada a massa unitária no estado seco de acordo com a NBR 7251- Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária (ABNT 1982), resultando em $1,47 \text{ g/cm}^3$. A determinação da massa específica real foi feita de acordo com a NBR 9776 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman (ABNT 1987), obtendo-se o valor de $2,63 \text{ g/cm}^3$. A composição granulométrica foi também determinada, de acordo com a NBR 7217 – Agregados - Determinação da composição granulométrica (ABNT 1987), estando a curva granulométrica obtida representada na Figura 3.1. Os resultados do módulo de finura e de diâmetro máximo da areia foram, respectivamente, 2,69 e 4,8 mm.

Essa areia foi considerada descontínua, pois apresentou grande concentração de grãos numa determinada faixa de tamanho, entre 0,60 e 1,20 mm. Não houve necessidade de determinação dos teores de umidade do agregado miúdo, pois, antes da medida da massa a ser misturada, era procedida a secagem em estufa até a constância de peso.

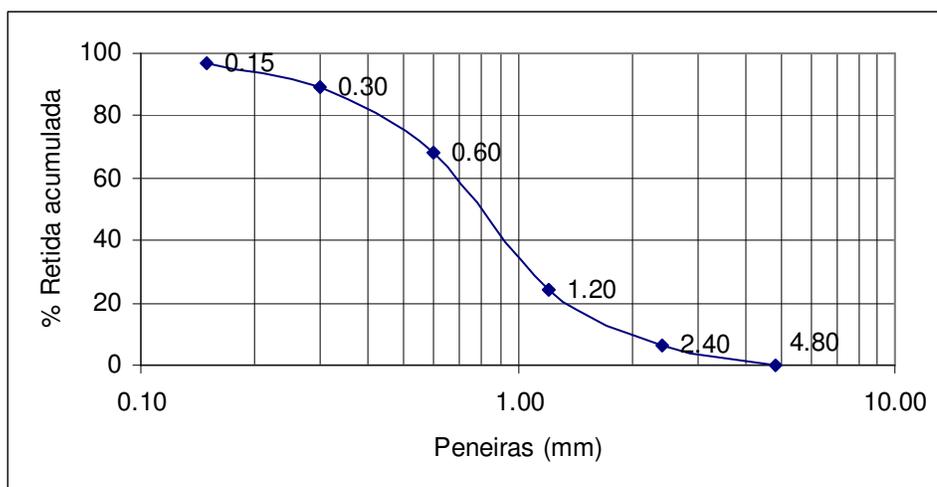


Figura 3.1 – Curva Granulométrica da Areia.

3.1.1

Determinação das propriedades físicas das fibras

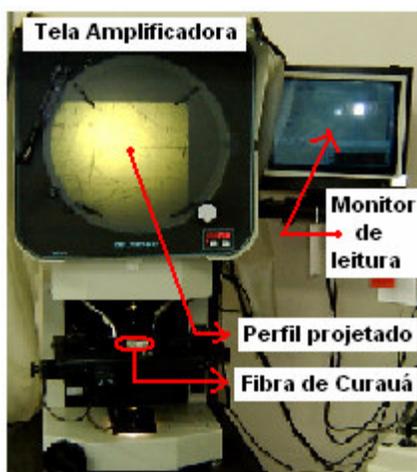
Geometria das fibras

Nesse trabalho, para determinar o diâmetro das fibras de curauá e juta, foram utilizados dois métodos. Um deles foi através do uso do paquímetro. Para se medir o diâmetro de uma fibra vegetal, pode-se utilizar um paquímetro de 0,01 mm de precisão. Para cada fibra, calcula-se o diâmetro médio a partir de três medidas em posições convenientemente espaçadas (dois próximos de cada extremidade e um próximo do centro). No entanto, esse método tem pouca precisão, considerando-se a grande variação entre os diâmetros medidos ao longo do comprimento de uma fibra vegetal, além do fato de que a fibra não tem a sua seção transversal perfeitamente circular. Além disso, ao usar esse método, é preciso ter o cuidado de não esmagar a fibra com o paquímetro.

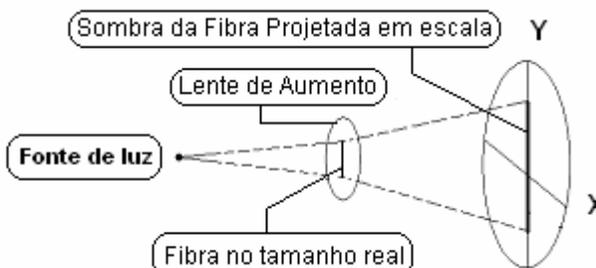
Foi observada a existência, nas fibras de curauá e juta utilizadas, de partes esmagadas em ambas as extremidades das fibras, esmagamento esse supostamente causado por algum tipo de ação mecânica, durante o

processo de produção. Essas partes do comprimento total das fibras apresentam, portanto, grandes diferenças de diâmetros em relação à porção adjacente. Esses segmentos extremos foram desprezados, quando do corte da fibra a ser inserida no compósito.

O outro método usado para medir o diâmetro das fibras foi baseado na projeção de luz. O equipamento consta de um projetor de perfil da marca DELTRONIC, com magnificação de até 100 vezes. As Figuras 3.2 (a e b) apresentam uma vista do aparelho, juntamente com um esquema explicativo de seu processo de funcionamento. Nesse método, foram usadas fibras de curauá e de juta secas ao ar, de comprimentos de 50 mm e 100 mm, para as primeiras, e de 50 mm para as últimas. Foram realizadas três medidas ao longo do comprimento de cada exemplar e determinada à média aritmética para cada tipo de fibra, tendo sido utilizados 30 exemplares.



(a)



(b)

Figura 3.2 – (a) Projetor de Perfil da marca Deltronic usado para medir diâmetro da fibra, (b) Esquema explicativo do processo de funcionamento.

Os comprimentos das fibras de curauá e de juta foram medidos, através de uma fita métrica, com precisão de 1mm. Para cada tipo de fibra, foram colhidos 100 exemplares das remessas recebidas no laboratório, sendo determinadas às faixas de variação dessa dimensão. Foram medidos os comprimentos com os quais as fibras são entregues pelas fábricas para o

mercado, podendo-se supor ser esse o máximo comprimento possível de se obter, após o processamento industrial.

No caso da fibra de curauá, a remessa entregue no laboratório estava constituída por uma mistura das duas espécies (roxa-avermelhada e branca), havendo diferenças significativas entre seus comprimentos, o que influenciou na média final.

Massa específica

As massas específicas das fibras de curauá e juta foram medidas através do frasco de Chapman (Figura 3.3 b). As fibras foram cortadas com comprimentos médios de 30 mm (Figura 3.3 a), e secas em estufas até constância de massa, ou seja, até que duas pesagens consecutivas, espaçadas de 2 horas, não apresentassem variação de massa de mais de 0,1%. Esse comprimento foi o escolhido para facilitar a introdução das fibras através do gargalo do frasco. Foram introduzidos 50 g de fibras secas. As fibras foram deixadas imersas por 24 horas antes de ser efetuada a leitura do nível da água no gargalo do frasco, permitindo, dessa forma, que os vazios das fibras pudessem ser ocupados pela água. Pela equação 3.1, obtém-se a massa específica da fibra, sendo m_{fi} a massa das fibras secas e L a leitura no gargalo do frasco de Chapman.

$$\mu = \frac{m_{fi}}{L - 200} \quad (3.1)$$



Fibras de Curauá cortadas com 3 cm de comprimento.

(a)



(b)

Figura 3.3 – (a) Fibras de Curauá, (b) Frasco de Chapman.

Teor de umidade

Foi determinado o teor de umidade que as fibras de curauá e de juta apresentaram, quando expostas ao ar, no ambiente do laboratório, foram deixadas expostas ao ar por 24 horas, obtendo-se a massa seca ao ar (P_a), as fibras foram secas em estufas a 100 Cº até constância de massa, depois foram cortadas em um comprimento de cerca de 30 mm e, após isso, foram determinadas suas massas secas (P_e). A seguir, as amostras tiveram suas massas determinadas em balança eletrônica, com precisão de 0,01 g. O teor de umidade das fibras secas ao ar foi calculado pela equação 3.2.

$$H = \frac{P_a - P_e}{P_e} 100(\%) \quad (3.2)$$

Absorção de água

Para determinar a absorção de água das fibras de curauá e juta, amostras foram secas em estufa até constância de massa e, em seguida, foram colocadas em imersão em água e tiveram suas massas determinadas, para esta determinação foi utilizado papel absorvente para retirar o excesso de água das amostras. Procedeu-se, então, às determinações de massa em

intervalos de 5 minutos, 30 minutos, 1 hora e 2 horas. A partir daí, as determinações foram feitas em intervalos de 24 horas até o sexto dia. Em seguida, em intervalos de 48 horas, até atingir o ponto de saturação. Utilizou-se a equação 3.3 para calcular a absorção de água, onde P_{ht} é o peso úmido da fibra em g no tempo t e P_e é o peso seco em estufa da fibra em g.

$$A = \frac{P_{ht} - P_e}{P_e} 100(\%) \quad (3.3)$$

3.1.2

Determinação da resistência à tração das fibras de curauá e de juta

Nesse trabalho, determinou-se a resistência à tração na fibra única, segundo a recomendação da indústria HYSOL GRAFIL (de fibras de carbono) (HYSOL GRAFIL 1977). Como o ensaio à tração em fibras vegetais não é, ainda, normalizado, a influência do comprimento da fibra deve ser levada em consideração. Há também a grande variabilidade de diâmetro ao longo da fibra, o que traz maior imprecisão ao resultado do teste.

Nesse método, a fibra única é colocada a uma moldura confeccionada com uma folha de papel (Figura 3.4a), onde existem dois orifícios. O orifício circular, a princípio, serviria para conter um trecho da fibra para determinação do diâmetro. O outro orifício, alongado, conteria o comprimento da fibra a ser tracionado. Porém, pelos resultados já obtidos dos ensaios de determinação do diâmetro da fibra, através do projetor de perfil, já havia sido observada a grande variação de diâmetro ao longo do seu comprimento. Assim, foi estabelecido que as medidas dos diâmetros seriam tomadas diretamente no segmento da fibra a ser submetida à tração (orifício alongado), buscando, com isso, uma maior precisão para o valor da tensão de ruptura da fibra.

A fibra foi colada à moldura, tomando-se o cuidado de utilizar um comprimento aderido que promovesse uma ancoragem suficiente, assegurando que somente seriam transmitidos, ao segmento livre, esforços

de tração. Providências também foram tomadas para evitar o dilaceramento de fibra pela pressão exercida pelas garras da máquina de tração (Figura 3.4b). Assim, foram colocadas fitas de neoprene entre as garras e a moldura contendo a fibra.

A fibra fixada à moldura possuía uma base de medida pré-estabelecida. Após a fixação da fibra, o conjunto foi fixado às garras da máquina e, em seguida, cortou-se lateralmente a moldura para que a carga de tração aplicada atuasse somente na fibra. A máquina utilizada para esse ensaio foi uma EMIC DL 10000, com célula de carga com capacidade máxima de 2 kgf ou 0,02 kN.

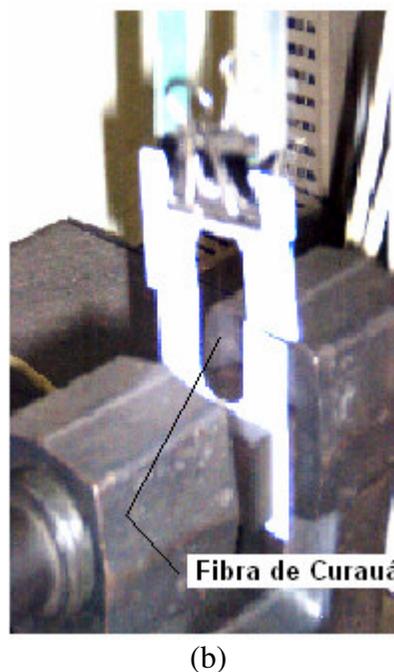
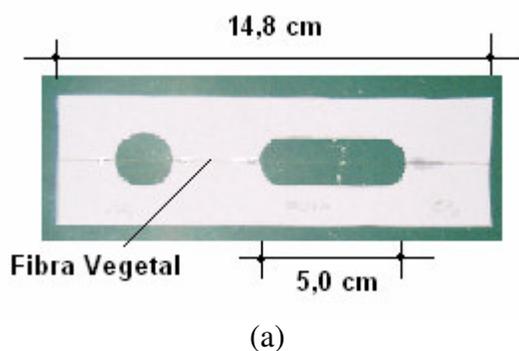


Figura 3.4 – (a) Corpo de prova com uma única fibra de curauá, (b) Ensaio de tração na fibra.

3.2

Produção dos corpos-de-prova de compósitos

Buscou-se adotar, para os corpos-de-prova utilizados nesse estudo, padrões de traço, dimensões de espécimes e tipos de ensaios já adotados, em trabalhos anteriores com compósitos de argamassa e fibra vegetal. Esses

trabalhos (Tolêdo Filho 1997, Fujiyama 1997, Rodrigues 1999), desenvolvidos no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, adotaram metodologias de produção e testes dos compósitos bastante semelhantes. O intuito foi possibilitar o estabelecimento de comparações entre os resultados obtidos, principalmente entre a influência das fibras já utilizadas anteriormente (sisal e coco) e as adotadas nesse estudo (curauá, juta, além de sisal).

Com relação ao traço da mistura, os trabalhos anteriormente citados utilizaram a proporção em massa 1:1:0,40 (cimento: areia: relação água/cimento). Nesse trabalho, foi tentada, inicialmente, uma mistura com essa proporção. Observou-se, porém, que, ao tentar inserir o reforço com fibras de curauá, com fração volumétrica de 3%, a mistura tornou-se muito pouco trabalhável, dificultando a homogeneização do compósito. A mistura tomou-se aspecto de aspereza, como se água adicionada tivesse sido absorvida pela fibra e a massa tivesse se tornado instantaneamente seca. Assim, outra alternativa não restou, a não ser a adoção de um fator água/cimento mais alto. Para se chegar ao valor finalmente adotado, de 0,59, várias tentativas foram feitas, com valores crescentes dessa relação, até alcançar uma mistura com um mínimo de trabalhabilidade.

Desse modo, os compósitos estudados foram confeccionados com argamassa de traço em massa 1:1:0,59, com frações volumétricas das fibras de curauá, juta e sisal de 2% e 3% e comprimentos de fibras de 15, 25 e 45 mm. Para os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, foram moldados 6 corpos-de-prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, para cada mistura. Foram utilizadas formas metálicas (casca cilíndrica, haste e base metálica) como mostra a Figura 3.5.

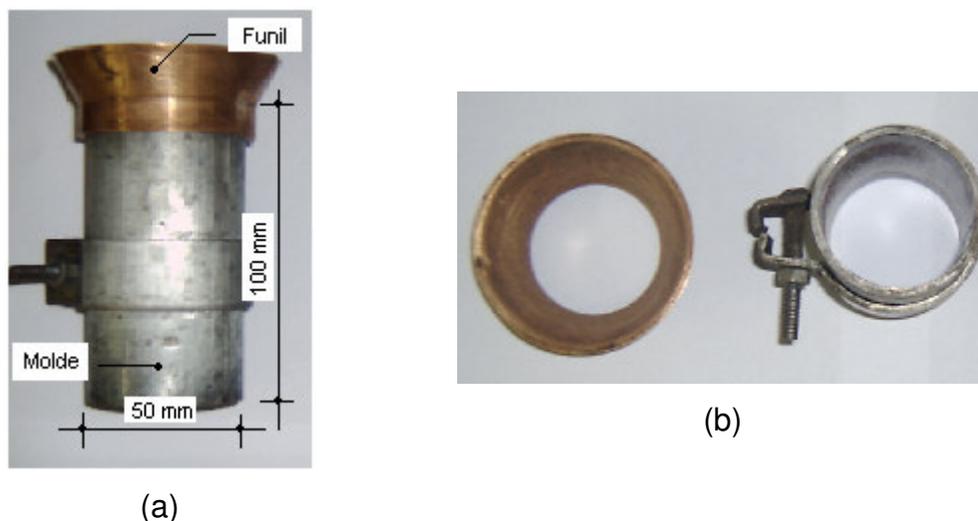


Figura 3.5 – (a) Vista frontal do molde cilíndrico com $\varnothing = 50$ mm e $L = 100$ mm, (b) Vista superior do molde cilíndrico.

Para os ensaios de flexão em quatro pontos (*third point loading test*), foram moldados 6 corpos-de-prova prismáticos, de seção transversal quadrada (50 mm x 50 mm) e 300 mm de comprimento. Foram confeccionadas formas de madeira com capacidade de moldar 6 corpos-de-prova simultaneamente, como mostra a Figura 3.6.



Figura 3.6 – Molde de madeira para 6 vigas, com $L = 300$ mm e de seção transversal 50 mm x 50 mm.

Antes da pesagem, os materiais constituintes da mistura passaram por alguns processos. A areia foi seca em estufa até constância de massa, depois peneirada com peneira de abertura de 4,8 mm. As fibras vegetais (curauá, sisal, juta) também foram secas em estufa até constância de massa,

e cortadas em comprimentos iguais a 15, 25 ou 45 mm para cada tipo de ensaio e mistura.

Os materiais constituintes assim preparados foram levados a uma argamassadeira, com capacidade da cuba de 5 l, para proceder à mistura. Primeiramente, foram misturados o cimento e a areia seca, seguindo-se da adição da água, aos poucos, até a obtenção de uma certa plasticidade para a argamassa. Logo após, foram adicionadas as fibras, também aos poucos, até que a mistura atingisse a homogeneização total.

Para os corpos-de-prova cilíndricos, a argamassa foi colocada dentro dos moldes em 4 camadas, adensadas com 30 golpes do soquete padrão. Após preenchido o molde, o material foi levado a uma mesa vibratória e submetido a vibração por 1 minuto. Para as vigas, o processo foi semelhante, sendo preenchidos os moldes em 4 camadas, adensadas com 50 golpes do soquete padrão e, após o preenchimento, o conjunto também foi levado a uma mesa vibratória e submetido a vibração por 1 minuto.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram mantidos nos moldes por 2 dias e, em seguida, foram imersos em água por 24 dias, sendo ensaiados aos 28 dias de idade. Apesar dos sabidos inconvenientes, adotou-se a cura por imersão em água, já que os trabalhos anteriores, tomados para efeito de comparação, assim procederam. Os corpos-de-prova foram retirados da água dois dias antes do dia da realização do ensaio, para permitir que fossem suficientemente secos ao ponto de possibilitar as operações de capeamento das faces de trabalho, usando massa plástica, e colagem dos extensômetros elétricos. A figura 3.7 mostra corpos-de-prova cilíndricos depois de desformados, imersos na água em processo de cura. Para as vigas, o método de cura adotado foi o mesmo.



Figura 3.7 – Corpos-de-prova cilíndricos em processo de cura por imersão em água.

A designação dos corpos-de-prova do programa experimental são apresentadas na Tabela 3.1. As seguintes abreviações foram usadas para representar o tipo, comprimento e a fração volumétrica das fibras na mistura:

- As duas letras iniciais: CP – corpo-de-prova
- A terceira letra – tipo de fibra:
 - N – nenhuma
 - C – curauá
 - J – juta
 - S – sisal
- Os dois algarismos seguintes – comprimento da fibra em mm
- A porcentagem após o hífen – fração volumétrica da fibra

Tabela 3.1 – Programa experimental das misturas.

Abreviação	Traço(em peso)	Tipo de Fibra	Volume de Fibra (%)	Comprimento (mm)
CPN00-0%*	1:1:0,40	-	-	-
CPN00-0%	1:1:0,59	-	-	-
CPC15-3%	1:1:0,59	Curuá	3	15
CPC25-2%	1:1:0,59	Curuá	2	25
CPC25-3%	1:1:0,59	Curuá	3	45
CPC45-2%	1:1:0,59	Curuá	2	45
CPC45-3%	1:1:0,59	Curuá	3	25
CPS25-3%	1:1:0,59	Sisal	3	25
CPJ25-3%	1:1:0,59	Juta	3	25
CPJ45-3%	1:1:0,59	Juta	3	45

* argamassa com fator água/cimento 0,40, que seria a mistura de referência, caso fosse esse o fator adotado para os compósitos.

3.3

Propriedades mecânicas do compósito

3.3.1

Ensaio de compressão

Ensaio de compressão foram realizados em corpos de provas de argamassa sem fibras (CPN00-0%* e CPN00-0%) e em compósitos de argamassas com fibras (CPC15-3%, CPC25-3%, CPC25-2%, CPC45-3%, CPJ25-3%, CPS25-3% e CPF25-3%). Pretendeu-se obter as relações constitutivas desses materiais à compressão, determinando-se também os valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das misturas estudadas.

Foram colocados extensômetros elétricos na metade da altura dos corpos-de-prova, nas direções longitudinal e transversal, com o intuito de se obter as deformações nessas duas direções.

Os corpos-de-prova cilíndricos de cada material foram ensaiados, em uma máquina, marca CONTENCO, com aquisição automática dos dados de cargas e deformações, usando uma célula de carga de capacidade de 250 kN. A figura 3.8 apresenta um esquema do ensaio.

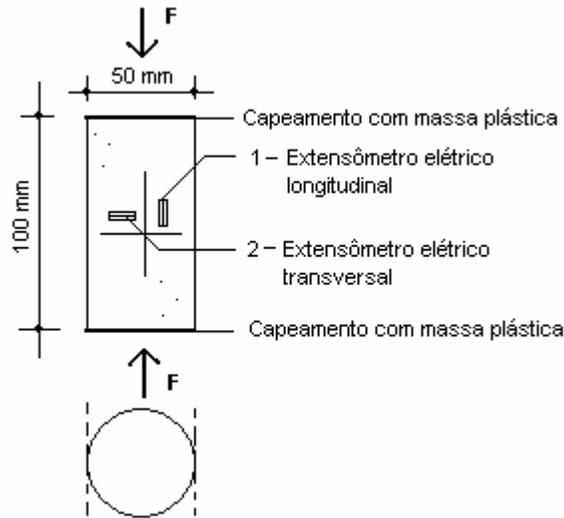


Figura 3.8 – Esquema do ensaio de compressão simples.

A partir dos valores das deformações longitudinais e transversais, foi calculado o coeficiente de Poisson e a deformação volumétrica para cada corpo-de-prova, como mostram as equações 3.4 e 3.5 respectivamente. Foi determinado o coeficiente de Poisson para cada mistura, como a média aritmética dos seis corpos-de-prova. O módulo de elasticidade foi calculado através dos gráficos de tensão-deformação, tomando-se a secante do trecho considerado como o de maior linearidade na zona elástica do gráfico. A Figura 3.9 mostra o esquema do processo usado para determinar o módulo de elasticidade.

$$\nu = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \quad 3.4$$

$$\epsilon_v = \epsilon_l - 2 \cdot \epsilon_t \quad 3.5$$

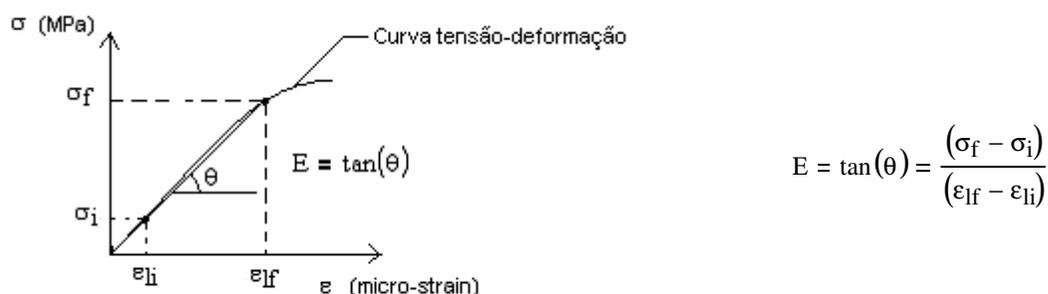


Figura 3.9 – Esquema para calculo do módulo de elasticidade.

3.3.2

Ensaio de tração por compressão diametral

Para medida da resistência à tração dos compósitos, foi adotado o método proposto por Lobo Carneiro e normalizado pela ABNT sob o título NBR 7222 Resistência à tração de argamassa e concreto por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. O carregamento foi aplicado ao longo da geratriz do corpo-de-prova cilíndrico, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, utilizando-se taliscas de madeira que foram interpostas entre o cilindro e os pratos da máquina. Assim, pode ser demonstrado que, sob essa carga, a seção vertical do cilindro fica sujeita a uma tensão de tração horizontal, que é determinada pela equação 3.6:

$$f_t = \frac{(2 \cdot P)}{\pi \cdot \phi \cdot L} \quad (3.6)$$

onde temos que P é a carga de ruptura, L é o comprimento e Φ diâmetro do corpo-de-prova. A Figura 3.10 apresenta um esquema do ensaio de tração por compressão diametral. Para esse ensaio também foram usados 6 corpos-de-prova de argamassa CPN00-0% com fator água/cimento de 0,59 e 6 corpos-de-prova de cada amostra de compósitos de argamassa com fibras, (CPC25-2%, CPC25-3%, CPC45-3%, CPJ25-3%, CPJ45-3% e CPS25-3%).

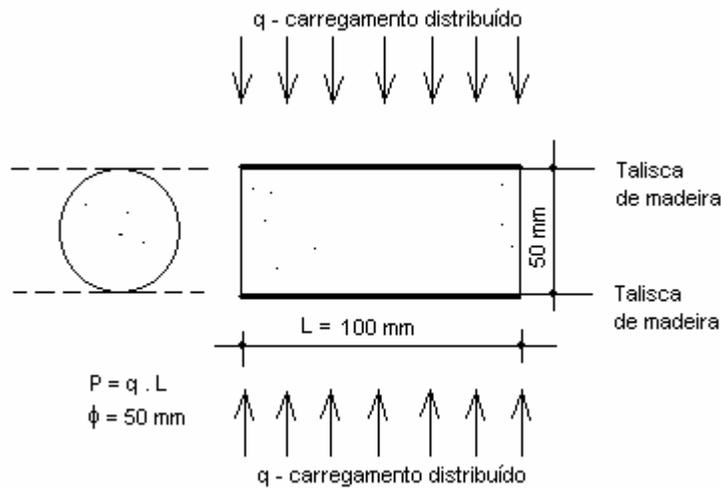


Figura 3.10 – Esquema do ensaio de tração por compressão diametral.

3.3.3

Ensaio à Flexão

Ensaio de flexão em quatro pontos (cargas aplicadas nos terços médios) foram realizados em corpos-de-prova prismáticos de argamassa sem fibras, CPN00-0% com fator água/cimento 0,59, e em compósitos de argamassas com fibras (CPC25-2%, CPC25-3%, CPC45-2% e CPC45-3%). Os ensaios foram realizados em uma máquina INSTRON, modelo 5500R, com célula de carga de 500 kgf. Não foi necessária a utilização de extensômetros elétricos, sendo obtidos os deslocamentos do travessão da máquina. A figura 3.9 apresenta o esquema do ensaio. Com base nos valores de cargas e deslocamentos, o módulo de elasticidade foi obtido através da equação da linha elástica. Resolvendo-se a equação diferencial 3.7 e considerando a geometria dos corpos-de-prova chegamos à equação 3.8.

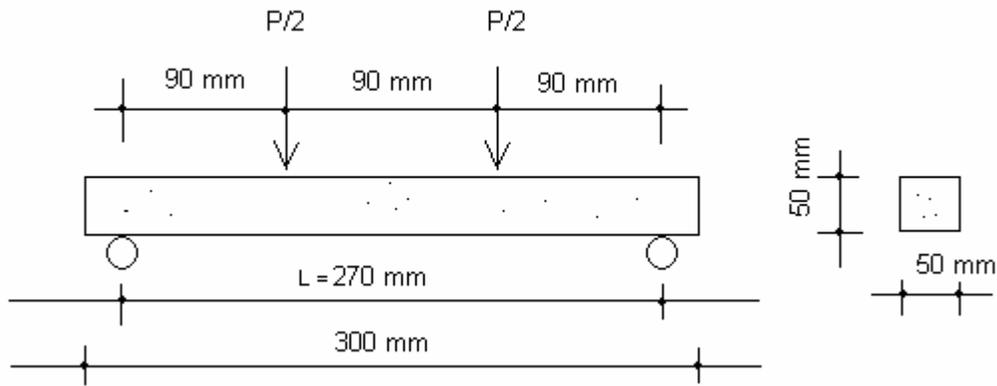


Figura 3.11 – Esquema do ensaio à flexão em quatro pontos.

$$E \cdot I \cdot \left(\frac{d^2}{dx^2} y \right) = M \qquad E \cdot I \cdot \left(\frac{d^2}{dx^2} y \right) = \frac{(P \cdot L)}{6} \qquad (3.7)$$

Sendo P a carga aplicada e L o comprimento entre os apoios.

$$E = (6,99) \cdot 10^5 \left(\frac{P}{y} \right) \qquad (3.8)$$

y – deslocamento dos pontos de aplicação da carga.

Foi calculada, então, a média entre os valores de E, de cada corpo-de-prova, sendo encontrado o módulo de elasticidade médio para cada material. Calculou-se também a tensão de flexão no limite de proporcionalidade (σ em MPa), como mostra a equação 3.9, a partir da carga P em (N), obtida do diagrama carga-deslocamento, para cada corpo-de-prova, no ponto a partir do qual o gráfico foge da linearidade. Obteve-se a média aritmética dos valores do limite de proporcionalidade, tomada como característica de cada material.

$$\sigma = 2,16 \cdot 10^{-3} \cdot P \qquad (3.9)$$

3.4

Microscopia das fibras e dos compósitos com fibras de curauá

Foi realizada análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fibras de curauá. Buscou-se observar suas características de forma, dimensões e aspecto superficial. Superfícies de fraturas dos corpos-de-prova prismáticos, ensaiados à flexão, foram também observadas, visando obter informações qualitativas sobre o modo de ruptura desses materiais. Além disso, procurou-se examinar o arranjo e a distribuição das fibras no interior da matriz.

A preparação das amostras para observação por microscopia foi feita, cortando-se o material em tamanhos convenientes e recobrando suas superfícies de fratura por deposição de carbono.

Esses ensaios foram realizados no Instituto Militar de Engenharia (IME) em equipamento de marca JEOL, modelo JSM-5800LV, com magnificação de 2200 vezes.