

FIGURA 12 – Polimerização do Nylon
Fonte: Smith, 1998, p. 375

Segundo Smith, (1998, p. 372), os nylons por serem plásticos estruturais, possuem uma boa capacidade para suportar cargas e temperaturas elevadas, baixo coeficiente de atrito e boa resistência química e à abrasão. São materiais muito cristalinos devido à estrutura regular e simétrica das cadeias poliméricas principais. A resistência mecânica elevada deve-se, em parte, às ligações de hidrogênio, entre as cadeias moleculares. Têm aplicações em quase todos os setores industriais, destacando-se peças antiatrito não lubrificadas, componentes mecânicos e elétricos submetidos a temperaturas elevadas e componentes resistentes ao impacto que exijam resistência mecânica e rigidez.

O nylon 6 usado nesta pesquisa, é resíduo do processamento de tecidos (destinados a fabricação de pneus) tendo, portanto, variados comprimentos (Figura 13).



(a)



(b)

FIGURA 13 – (a) e (b) Tecido de nylon 6

As fibras foram retiradas desses tecidos e cortadas manualmente com tesoura. O tamanho médio obtido através de amostragem, correspondeu a 2,5 mm, resultando em um coeficiente de forma de 32,8 admitindo-se o valor do diâmetro (790 μ m) informado pelo fornecedor. As fibras foram submetidas à determinação de umidade com o seguinte procedimento: amostra de (5 \pm 0,1)g foi colocada em estufa a (110 \pm 5) $^{\circ}$ C por cerca de (30 \pm 2) minutos e deixada a esfriar em um dessecador durante (10 \pm 1) minutos e em seguida determinado o seu peso. Essa operação é repetida várias vezes até que a diferença entre duas determinações sucessivas seja inferior a 0,30 %. Com a diferença entre o peso inicial da amostra, antes da secagem, e o peso obtido após a última secagem calculou-se um teor de umidade médio de 3,49% para o nylon 6.

2.4 Sisal

A *agave sisalana perrine*, nome científico do sisal, juntamente com outras fibras vegetais, foi pesquisada de forma pioneira, segundo Savastano (2000, p. 17), pelo Ceped - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia - desde o início da década de 1980, destacando-se os estudos desenvolvidos no Programa THABA – Programa de Tecnologias de Habitação - (GUIMARÃES, 1987, p. 98), com compósitos cimento-fibra vegetal, visando sua aplicação em materiais de construção (telhas, calhas para drenagem, bancadas para pias de cozinha, etc.) que pudessem ser facilmente produzidos pelos próprios consumidores, notadamente os de baixa renda.

Como já visto na revisão bibliográfica, as fibras naturais, de um modo geral, estão sendo bastante pesquisadas nos últimos anos, por apresentarem uma série de vantagens: são abundantes, não-tóxicas, resistentes, têm baixo custo e se originam de fontes renováveis de matéria prima

(MARTINS *et al.*, 2004). Têm estrutura constituída, basicamente, por cadeias de celulose (Figura 14), lignina e hemicelulose.

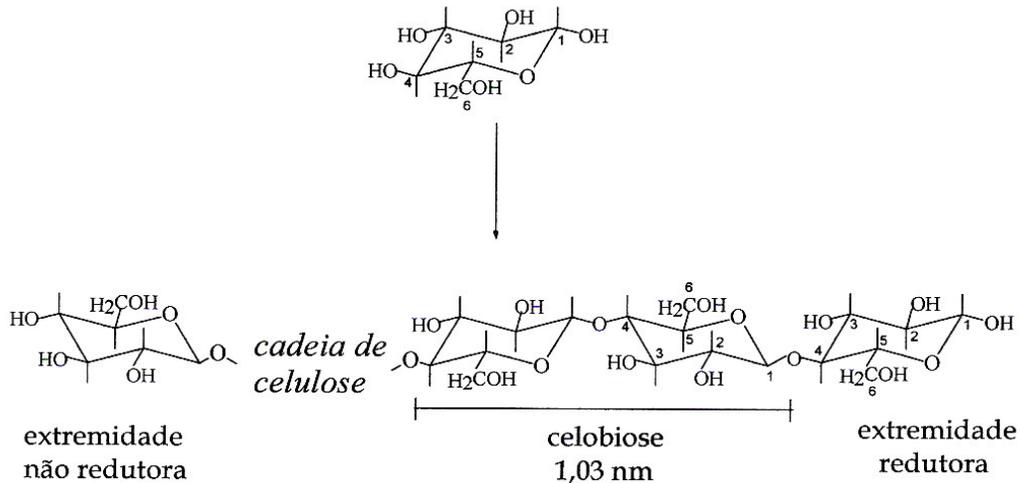


Figura 14 - Estrutura da celulose destacando a unidade básica repetitiva (celobiose)

Fonte: Regiani, 2000, p. 17

Segundo Joseph P.V. *et al.* (2000), a fibra natural pode ser considerada como sendo um compósito em si mesma, com a celulose como fase dispersa (fibra) e a lignina e a hemicelulose representando a matriz envolvente. Sua estrutura apresenta células individuais que são compostas por microfibrilas ricas em celulose distribuídas em camadas (Figura 15), de diferentes espessuras. (SAVASTANO Jr., 2000, p. 8).

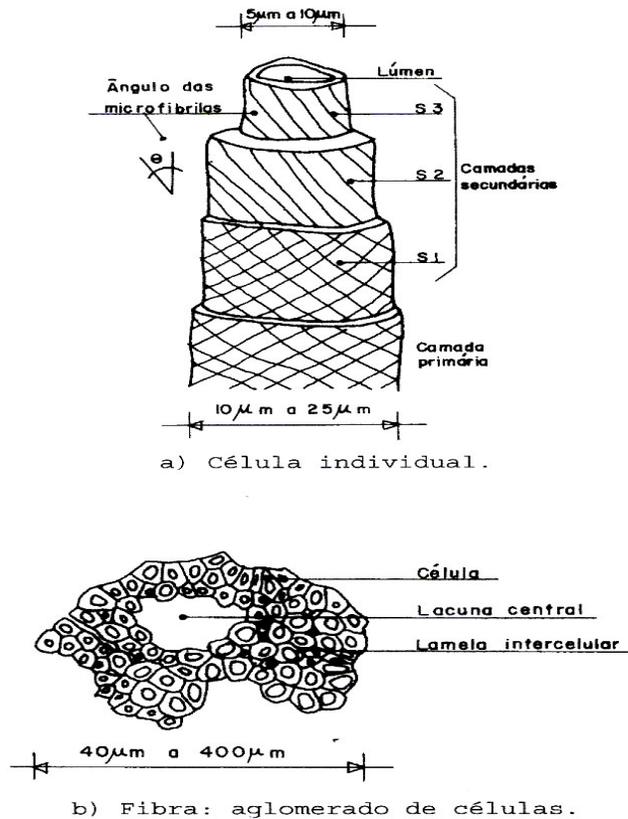


FIGURA 15 - Esquema estrutura de fibra vegetal
Fonte: Savastano Jr., 2000, p.10

Na Figura 16 é apresentada uma seção transversal de fibras de sisal obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A fibra de sisal é matéria prima utilizada na produção de fios, cordas e tapetes. As fibras são extraídas e beneficiadas, a partir das folhas da planta, gerando um aproveitamento, para fins comerciais, de apenas 4% da folha de sisal, sendo os 96% restantes descartados ou utilizados como adubo sem tratamento adicional.

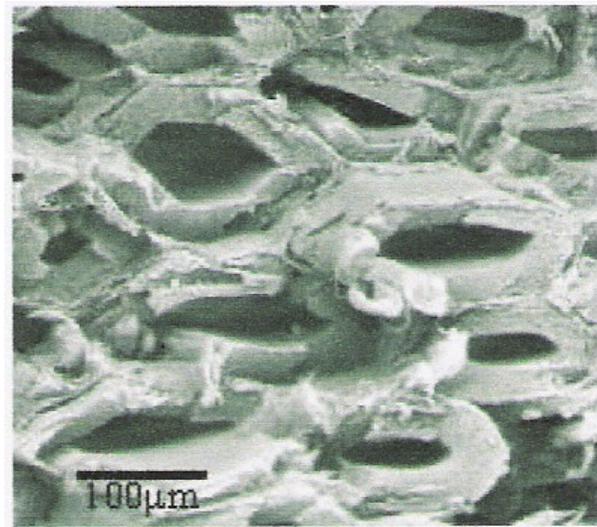


FIGURA 16 – Seção transversal das fibras de sisal por MEV
Fonte: Carvalho, 2005, p. 39

O sisal utilizado nesta pesquisa é resíduo do processamento de fibras naturais e foi fornecido cortado em tamanho médio de 3,5 mm (Figura 17), correspondendo a um coeficiente de forma (comprimento/diâmetro) equivalente a 87,5. Adotou-se para o diâmetro médio das fibras o valor máximo (400 μm) encontrado na literatura. O sisal foi submetido a processo de determinação de umidade idêntico ao do nylon 6, apresentando um teor de umidade médio de 8,31%.



FIGURA 17 - Tamanho das fibras de nylon e de sisal

3. MATERIAIS - CARACTERÍSTICAS E DISPONIBILIDADE

O PVC reciclado, para esta pesquisa, como anteriormente descrito, foi obtido através de reciclagem mecânica primária com a moagem e pulverização de conexões previamente produzidas a partir do mesmo material do PVC original.

Dentre as fibras utilizadas, o nylon 6, por apresentar módulo de elasticidade semelhante ao do PVC, e bastante inferior ao do sisal, em princípio, não deveria servir como reforço no compósito. Porém, sua escolha deve-se, basicamente, a dois motivos: (i) a expectativa de uma perda significativa das propriedades mecânicas do PVC ao ser reciclado, fazendo com que o nylon 6 residual (que mantém as mesmas características técnicas do nylon 6 original) passasse a ter módulo de elasticidade bem maior que o do PVC reciclado, podendo então, vir a melhorar o desempenho dos compósitos; (ii) a elongação do nylon muito superior à do PVC, deveria também contribuir para uma melhor performance do compósito com o PVC reciclado.

3.1 Características físicas e mecânicas dos materiais

As características físicas e as propriedades mecânicas dos materiais estudados nesta pesquisa, informadas pelos fornecedores e encontradas na literatura, são apresentadas em seus valores mínimos e máximos na Tabela 2.

TABELA 2 - Características típicas e propriedades mecânicas dos materiais (*)

| Características e propriedades mecânicas | PVC (original) | PVCr (reciclado) | Nylon 6 | Sisal |
|--|----------------|------------------|---------------|-------------|
| Polímero | sintético | sintético | sintético | Natural |
| Diâmetro (μm) | - | - | 790 | 50-400 |
| Umidade (%) | - | - | nd | 11 |
| Massa específica (kg/m^3) | 1.390-1.580 | 1.390-1.580 | 1.130-1.150 | 1.030-1.500 |
| Peso molecular (g/mol) | 50.000-100.000 | nd | 10.000-30.000 | 25.000 |
| Fusão cristalina ($^{\circ}\text{C}$) | 160 - 220 | nd | 216 -225 | nd |
| Transição vítrea ($^{\circ}\text{C}$) | 75 - 105 | nd | 50 | nd |
| Resistência à tração (MPa) | 31 - 60 | nd | 75,9-94,5 | 347 a 700 |
| Alongamento na ruptura (%) | 40 - 80 | nd | 15 - 300 | 3 - 14 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 2,4 - 4,1 | nd | 2 - 3,8 | 7 - 22 |
| Resistência à compressão (MPa) | 39 - 59 | nd | 19 - 49 | nd |
| Resistência ao impacto (J/m) | 39 - 49 | nd | 68 - 245 | nd |
| Resistência à flexão (MPa) | 62 - 107 | nd | 49 - 91 | nd |
| Dureza (Shore D) | 65 - 85 | nd | nd | nd |

(*) Valores mínimos e máximos na literatura ou informados pelo fornecedor

Fontes: Mano (1991); Smith(1998) ; Callister (2002); Savastano Jr (2000); Li(2000); Guimarães(1990); Michaud (2003); Carvalho (2005); Rodolfo Jr. (2006) e fornecedores

Obs: nd = informação não disponível

3.2 Disponibilidade dos materiais

PVC - Segundo Rodolfo *et al.* (2006), o consumo de resina de PVC, em 2005, no mundo atingiu 35 milhões de toneladas, sendo o Brasil responsável por 2,0% dessa demanda. A capacidade mundial de produção está estimada, naquele ano, em 36 milhões de toneladas. O consumo *per capita* indica ter o Brasil um potencial significativo de consumo de PVC nos próximos anos, pois ainda é muito baixo, 4,0 kg/hab/ano, comparado com Taiwan (41,9), Estados Unidos (21,1) e Coréia do Sul (20,0).

O PVC vem sendo reciclado de forma ainda muito restrita, uma vez que na sua composição apresenta cloro e na sua produção são incorporados variados aditivos para conferir-

lhe uma melhor performance, mas que podem vir a apresentar riscos de danos à saúde humana. Sua reciclagem, no Brasil, a partir de moagem de restos de tubos de obras de construção civil, vem sendo feita apenas para a produção de eletrodutos, necessitando de outras alternativas que possam beneficiar a crescente quantidade de resíduos gerados pela construção civil.

Existem programas por parte de fabricantes de tubos, em parceria com empresas de construção civil e ONG's ambientalistas, através das quais compram resíduos de tubos de PVC. Não foram encontrados estudos publicados sobre esta quantidade de resíduos de PVC gerados na construção civil, porém estimativas feitas em pesquisa interna, mas não divulgada, realizada por um fabricante (na Bahia) de eletroduto com PVC reciclado, apontam uma perda entre 8 a 12% do total de material em PVC em obras de construção civil. Na Bahia, segundo dados divulgados pelo COFIC (2005) são produzidos 45.000 t/ano de tubos de PVC o que pode representar, no mínimo, cerca de 3.600 t/ano de resíduos de resíduos gerados na construção civil.

Considerando-se a crescente participação de materiais à base de PVC (tubos, conexões, tanques, etc.) nas obras, verifica-se a importância de estudos que viabilizem a sua reciclagem em outros tipos de materiais de construção, além de eletrodutos.

. **Nylon 6** – segundo informação obtida em entrevista com o engenheiro responsável pela área de rejeitos de uma indústria produtora de nylon 6, situada no Pólo Petroquímico de Camaçari, gera-se, aproximadamente, uma tonelada mensal desses rejeitos, e essa quantidade atualmente representa, em média, cerca de 1% da produção da fábrica. A produção total de fios de nylon e poliéster do Polo Petroquímico de Camaçari e do Centro Industrial de Aratu foi, inicialmente (SIC, 1980) prevista em 65.343 t/ano. Porém, os últimos dados divulgados pela Secretaria da Indústria e Comércio e Mineração do estado da Bahia (SICM, 1997) indicaram, para o ano de 1996, um total de capacidade instalada, na Bahia, de 37.900 t/a. Segundo o COFIC (2005), na Bahia são produzidos atualmente 12.000 t/ano de fios de nylon 6. Se for adotado o

percentual de 1% de tal produção, haverá, portanto, uma disponibilidade de aproximadamente, 12 t/ano de rejeitos de fios de nylon 6.

Atualmente, os fabricantes vendem de parte dos rejeitos de fios de nylon e poliéster para pequenas empresas fabricantes de redes de pesca, que os utilizam sem qualquer tipo de tratamento ou de beneficiamento.

Sisal - A produção mundial de sisal atinge 4,5 milhões de toneladas anualmente, sendo a Tanzânia e o Brasil os principais produtores (LI *et al*, 2000). No Brasil, a Bahia é o maior produtor, sendo responsável por 94% da produção nacional, correspondendo cerca de 110 mil toneladas/ano de fibra seca, em 2004. Entre os anos 1965 e 1974 a produção da Bahia foi superior a 200 mil toneladas/ano, tendo posteriormente decaído em termos de área cultivada e de produtividade, que chega a ser 4 vezes inferior em relação a outros países produtores. (CARVALHO, 2005, p. 3). Daí, os programas de incentivo à sua cultura, desenvolvidos atualmente pelo Governo do Estado da Bahia, citados anteriormente, visando, sobretudo, recuperar a produtividade para um patamar acima de 1.100kg/ha. Quanto à fibra de sisal, a geração de resíduos corresponde a cerca de 6% da produção de tapetes, estimada em 54 toneladas/ano (SAVASTANO Jr., 2000, p. 25), o que corresponde a 3,2 toneladas/ano.

A Tabela 3 resume a estimativa da disponibilidade dos materiais no estado da Bahia.

TABELA 3 – Produção e disponibilidade dos materiais pesquisados, na Bahia (em toneladas)

| Materiais | Produção | | | Disponibilidade |
|-----------|-------------|--------------|----------|-----------------|
| | Mundo | Brasil | Bahia | Bahia |
| PVC | 35 milhões | 0,70 milhões | 45 mil * | 3,6 mil ** |
| Sisal | 4,5 milhões | 117 mil | 110 mil | 3,2 |
| Nylon 6 | nd*** | nd*** | 12 mil | 12 |

Notas: (*) Tubos de PVC

(**) Resíduos de tubos em obras = 8%

(***) nd = informação não disponível

Fontes: Rodolfo *et al.*(2006); Li *et al.* (2000); COFIC (2006); Savastano Jr. (2000)

4. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DOS COMPÓSITOS

4.1 Planejamento do trabalho experimental

Esta pesquisa foi concebida dentro da hipótese de que o PVC, sendo um polímero termoplástico semicristalino, quando reciclado, apresenta perda de desempenho mecânico. Por isso, fibras de sisal e de nylon 6 como reforço em compósitos de PVC reciclado (PVCr), devem recuperar suas propriedades mecânicas. Para comprovar tal hipótese, a pesquisa foi planejada de acordo com o seguinte método (vide esquema na Figura 18 no Anexo I):

- produção de dezoito corpos de prova por cada uma das oito formulações, constituídas por PVC original, PVC reciclado e por compósitos de PVC reciclado reforçados com fibras de nylon 6 e de sisal;
- realização de ensaios de tração, impacto e dureza com os corpos de prova;
- avaliação das perdas de propriedades mecânicas no PVC reciclado, comparado com o PVC original, a partir dos resultados dos ensaios;
- avaliação do desempenho da fibra de nylon 6 como reforço nos compósitos com diferentes teores;
- avaliação do desempenho da fibra de sisal como reforço nos compósitos com diferentes teores;
- comparação entre as fibras, a partir dos seus desempenhos como reforço nos compósitos;

- comparação dos resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova de PVC sem fibras (original e reciclado) com os obtidos nos diversos compósitos (reforçados com nylon 6 e com sisal).

4.2 Produção dos corpos de prova

Com os materiais PVC e fibras de sisal e de nylon, foram produzidos corpos de prova com as seguintes composições (formulações):

- PVC original (sem reforço de fibra)
- PVC reciclado (sem reforço de fibra)
- compósito PVC reciclado + fibra de sisal (5%, 10% e 20% em volume)
- compósito PVC reciclado + fibra de nylon 6 (5%, 10% e 20% em volume)

Os corpos de prova foram identificados conforme as suas composições, correspondendo a oito formulações (Tabela 4), sendo seis delas (do número 3 ao 8) compósitos.

TABELA 4 – Numeração das Formulações

| Corpos de Prova (matriz) | SEM FIBRA | Nylon 6 (% em volume) | | | Sisal (% em volume) | | |
|-----------------------------|--------------|--------------------------|----------|----------|------------------------|----------|----------|
| | | 5% | 10% | 20% | 5% | 10% | 20% |
| PVC (original) | 2 | - | - | - | - | - | - |
| PVCr (reciclado) | 1 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |

A produção dos corpos de prova constou das etapas de **preparação dos materiais, mistura nos compósitos e processamento.**