

2.0

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1

Conceituação

O compósito é considerado um material multifásico que exhibe uma significativa proporção das propriedades de ambas as fases constituintes, tal que uma melhor combinação de propriedades seja obtida. Muitos compósitos são formados por somente duas fases. Uma delas é chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, geralmente chamada de fase dispersiva. As propriedades dos compósitos estão relacionadas com as propriedades das fases constituintes, suas quantidades relativas e geometria da fase dispersiva, (forma e tamanho das partículas), distribuição e orientação (Callister 1994).

2.2

Compósitos reforçados por fibras vegetais

O interesse pelo uso das fibras naturais como reforço está vinculado ao seu baixo custo, disponibilidade, por questões ambientais e econômicas, já que os materiais tradicionais de construção apresentam um custo bastante elevado, explicado pelo alto consumo de energia e transporte. A Figura 2.1 apresenta um esquema da constituição dos compósitos fibrosos.

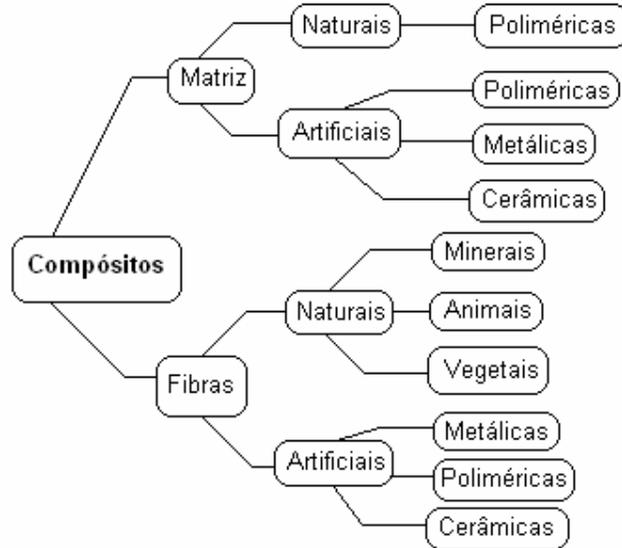


Figura 2.1 – Esquema da constituição dos compósitos fibrosos.

Neste trabalho, utilizaram-se fibras adicionadas à argamassa de cimento Portland, buscando determinar a influência desse reforço nas características físicas e mecânicas do compósito produzido.

Dependendo das condições de serviço a que estiverem sujeitas, as matrizes com características frágeis, tais como argamassas, podem necessitar de melhorias de algumas de suas propriedades. A adição de fibras nesse tipo de matriz tem trazido melhorias consideráveis nas propriedades de tração e flexão, aliadas a uma alteração nas propriedades reológicas da mistura fresca e controle da fissuração, conferindo-lhe maior capacidade de carregamento após o aparecimento das primeiras trincas (Hannant 1978). Além disso, tem sido observado o aumento da ductilidade e da tenacidade do compósito com fibras em relação à matriz sem reforço.

Geralmente as propriedades finais do compósito são influenciadas pelas características individuais de seus constituintes e pelo método de fabricação do compósito, conforme os fatores a seguir:

- Tipo, geometria, arranjo e distribuição, fração volumétrica, aspecto superficial, tratamento prévio, propriedades físicas, mecânicas e químicas das fibras;

- Grau de aderência entre fibra e matriz;
- Métodos de produção (mistura, adensamento e cura) do compósito.

Apesar das já citadas vantagens obtidas com a adição do reforço fibroso, em termos de capacidade de deformação, observa-se que tais benefícios vêm acompanhados por diminuição na resistência à compressão. Contudo, em aplicações voltadas para a produção de componentes construtivos, principalmente para habitação popular, os elementos não são comumente solicitados por consideráveis cargas de compressão, sendo tais desvantagens plenamente compensadas pelo acréscimo da capacidade de absorção de energia do compósito, o que o torna mais resistente a impactos.

Na avaliação das características do material compósito, objeto desse trabalho, foram tomadas como base as propriedades individuais das fibras e da matriz e suas respectivas frações volumétricas, podendo a avaliação analítica ser feita através da regra das misturas.

Nos ensaios de trabalhabilidade realizados por Tolêdo Filho (1997), com compósitos cimentícios com fração volumétrica de fibras vegetais entre 2% e 3%, foi observada uma trabalhabilidade entre média e alta. No entanto, foi mostrado que o aumento na fração volumétrica de 2% para 3% foi suficiente para reduzir a trabalhabilidade em 70%. Logo, frações volumétricas maiores não são recomendadas quando se pretende fazer compósitos com fibras vegetais em matriz cimentícia sem utilização de plastificantes.

Estudos comparativos realizados com fibras de juta em compósitos à base de cimento, com diferentes frações volumétricas, mostraram uma melhora no comportamento do material à flexão com o aumento da fração volumétrica de até 3%. A utilização de maior volume de fibras (4%) provocou uma diminuição dessa resistência (Mansur e Aziz 1981 apud Rodrigues 1999).

No presente trabalho, foi dada ênfase ao comprimento da fibra vegetal, como variável de estudo, com vistas ao aprofundamento da avaliação de sua importância no desempenho mecânico do compósito. Foram utilizadas fibras curtas, cujos comprimentos variaram entre 15 e 45 mm,

orientadas aleatoriamente dentro da matriz cimentícia. Visando obter uma primeira aproximação, para determinação dos níveis de resistência que podem ser esperados, pode-se usar as equações semi-empíricas da regra das misturas para fibras longas, adaptadas através dos fatores de eficiência relativos a tamanho e orientação das fibras vegetais (Fujiyama 1997). Esses fatores de eficiência (η_1 e η_2) tornam-se necessários para permitir ajuste das equações às situações em que são utilizadas fibras curtas distribuídas aleatoriamente na matriz, já que tais formulações foram desenvolvidas por Cox e Krenchel apud Jones (1975) para as condições de utilização de fibras longas e contínuas, alinhadas e igualmente espaçadas no interior da matriz. Essas últimas condições, de fato, promovem um melhor desempenho mecânico do compósito.

2.2.1

Fibras vegetais

A aplicação de fibras vegetais na construção data dos primórdios de nossa civilização. Milhares de anos atrás, os Persas já usavam as fibras associadas ao solo para construções de habitações, resultando em paredes com bom isolamento térmico e boa aparência estética (Ghavami e Tolêdo Filho 1991).

Com base em sua morfologia, as fibras vegetais podem ser classificadas em quatro classes (Cook 1980 apud Tolêdo Filho 1997). A Figura 2.2 mostra, esquematicamente, as principais fibras de cada classe.

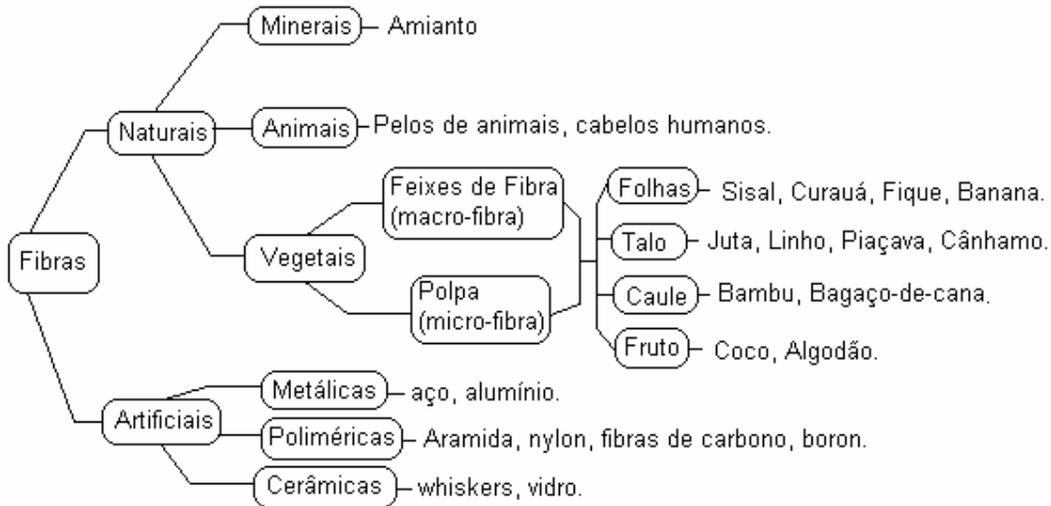


Figura 2.2-Classificação das fibras vegetais.

Fibras das folhas – Tendo sua origem nas plantas monocotiledôneas, as fibras das folhas ocorrem em feixes com extremidades sobrepostas de tal forma que produzem filamentos contínuos através do comprimento da folha (Tolêdo Filho 1997), conferindo-lhe resistência e dando suporte aos vasos de condução de água do vegetal.

Fibras de talo ou tronco – Tendo origem em plantas dicotiledôneas, essas fibras ocorrem no floema, que fica na entrecasca do talo. Os feixes de fibra são unidos entre si e mantidos no lugar pelo tecido celular do floema e pelas substâncias gomosas e graxas. As fibras podem ser obtidas colocando-se os talos em tanques de água quente ou deixando-os espalhados no chão para permitir que a ação das bactérias dissolva o material que envolve as fibras. O processo é seguido por secagem das fibras.

Fibras do Caule (madeira) – são fibras curtas, grossas e rígidas. Pedacos de madeira são processados em várias soluções e sujeitos a tratamentos mecânicos para extrair fibras de celulose (wood fibres) de boa qualidade na forma de polpa. Como exemplo, temos fibras de bambu e de cana-de-açúcar (Tolêdo Filho 1997).

Fibras do Fruto – Essas fibras formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas. As fibras de coco e algodão são incluídas neste grupo (Tolêdo Filho 1997).

As fibras oriundas das folhas são as de maior interesse para serem utilizadas como reforço, embora fibras de talo, do caule e do fruto também possam ser usadas. De uma maneira geral, as fibras das folhas são mais grossas que as fibras dos talos e são referenciadas como fibras “duras” enquanto as fibras do talo são chamadas de fibras “macias” e, portanto, mais próprias para fins têxteis. Nesse trabalho foram utilizados, três tipos de fibras vegetais, duas fibras das folhas, curauá e sisal e uma de talo que é a fibra de juta (Tolêdo Filho 1997).

2.2.1.1

Microestrutura das fibras vegetais

As fibras vegetais são constituídas por células individuais (microfibras) unidas umas às outras por meio da lamela intermediária, que é constituída de hemicelulose e lignina.

Cada microfibrila é formada por um número de camadas, contendo fibrilas que são compostas por cadeias moleculares de celulose. Essas fibrilas se apresentam, em cada camada sob a forma de espiral com ângulos de inclinação variáveis, que têm influência sobre o desempenho mecânico da fibra. A Figura 2.3 apresenta um esquema de uma microfibrila, onde podem ser vistas as camadas primária e secundária (Gram 1983). A camada secundária é dividida em três subcamadas (S_1 , S_2 e S_3).

A região central da fibra apresenta uma cavidade denominada lúmen, que é grande responsável pela elevada absorção de água e baixa massa específica aparente, características comuns às fibras vegetais. Além disso, substâncias agressivas costumam penetrar no lúmen, a exemplo dos compostos hidratados do cimento, em compósitos com matriz cimentícia causando reações degradantes dos componentes da fibra. Esses compostos podem, ainda, sofrer cristalização nessa cavidade central, e demais vazios das fibras, causando enrijecimento desse reforço e sua conseqüente fragilização.

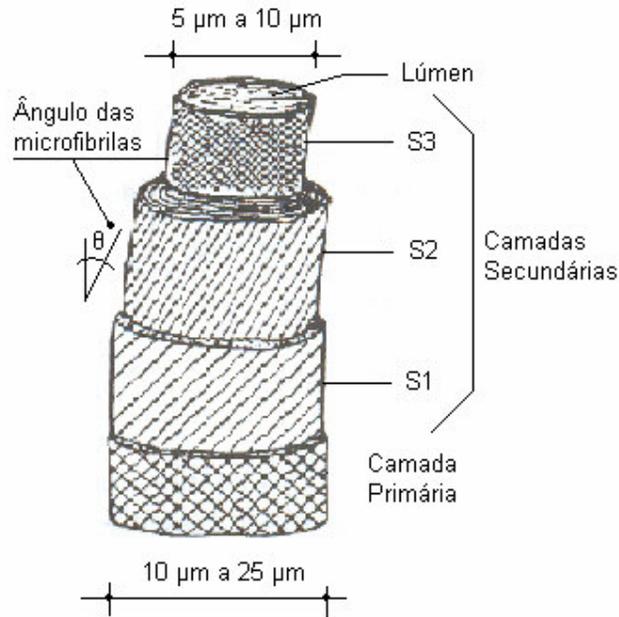


Figura 2.3 – Esquema de uma fibro-célula de uma fibra vegetal com dimensões aproximadas.

Para uma melhor compreensão das propriedades mecânicas e durabilidade das fibras, seus principais componentes estruturais (celulose, hemicelulose e lignina) são comentados.

Celulose – é um polímero derivado da glicose: β – D – glicopiranosose. Glicose é apenas um de um número de monossacarídeos tendo a mesma composição química, $C_6H_{12}O_6$.

Hemicelulose – é também um polímero de açúcares (tais como galactose e manose) raramente, ou nunca, cristalino (Walker 1993), que apresenta baixo grau de polimerização e é solúvel em álcalis. De acordo com (Gram 1983) a hemicelulose está presente principalmente na parede primária.

Lignina – a lignina é um adesivo natural cuja estrutura ainda não foi completamente demonstrada (Walker 1993). Consiste de cerca de 65% de carbono, 6% de hidrogênio e 29% de oxigênio, compondo um polímero de cadeia muito complexa que, para ser dissolvido, necessita ser primeiramente subdividido em substâncias mais simples (Coutts 1988). A lignina pode ser dissolvida e lixiviada em meio alcalino e está presente,

em grande concentração na lamela intermediária (cerca de 70 %) (Tolêdo Filho 1997).

2.2.1.2

Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais

Nas Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam-se as propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, de algumas fibras vegetais comumente utilizadas em compósitos encontráveis na literatura técnica. Esses dados foram tomados como elementos de comparação com valores obtidos para as fibras estudadas no presente trabalho. Pode ser observada uma grande variabilidade entre os valores apresentados, que pode ser creditada às condições ainda não padronizadas dos testes aplicados. Além disso, essas propriedades dependem da idade da planta, do local do cultivo, das condições climáticas e da microestrutura das fibras.

Tabela 2.1 – Propriedades físicas das fibras naturais vegetais.

Fibras Vegetais	Autores	Ø (mm)	Comp. (cm)	H (%)	μ (KN/m ³)
Curauá	Picanço e Ghavami (2004)	0,12	99,75 - 127,00	11,47	13,47
Bagaço-de-cana	Racines (1978)	0,20 - 0,40	5,00 - 30,00	-	-
	Aziz et al. (1984)	-	-	-	12,00 - 13,00
Bambu	Jindal (1986)	0,35	22,00 - 27,00	-	-
	Savastano Jr. e Agopyan (1998)	-	-	-	11,80
Coco	Tolêdo Filho (1997)	0,18 - 0,32	-	13,70	6,70 - 10,00
	Aziz et al. (1987)	0,10 - 0,40	5,00 - 35,00	-	-
Juta	Azis et al. (1987)	0,10 - 0,20	18,00 - 80,00	-	10,20 - 10,40
	Picanço e Ghavami (2004)	0,09	0,56 - 0,85	11,37	10,79
Piaçava	Tolêdo Filho (1990)	0,10 - 0,90	6,00 - 23,00	-	8,00 - 11,00
	CEPED (1982)	-	-	-	10,50
Sisal	Ghavami et al. (1999)	0,15	38,20 - 94,00	-	-
	Tolêdo Filho (1990)	0,08 - 0,30	38,00 - 94,00	13,30	7,50 - 11,00

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas das fibras naturais vegetais.

Fibras Vegetais	Autores	Resistência à Tração (MPa)	E (GPa)	Def. na Ruptura (%)
Curauá	Esse Trabalho	195,00 - 832,50	12,45	3,02
Juta	Picanço e Ghavami (2004)	137,78 - 533,24	-	-
Bagaço-de-cana	Racines (1978)	170,00 - 290,00	15,00 - 19,00	-
	Guimarães (1982)	177,00	4,90	5,11
Bambu	Guimarães (1982)	564,00	28,20	3,22
	Beaudoin (1990)	440,00	37,00	-
Coco	Ghavami (1985)	105,00 - 198,00	2,00 - 6,00	16,00
	Savastano Jr. e Agopyan (1998)	95,00 - 118,00	2,80	23,90 - 51,40
Juta	Chand (1988)	240,00	17,40	1,20
	Beaudoin (1990)	250,00 - 350,00	26,00 - 32,00	1,50 - 2,00
Linho	Coutts (1983)	1000,00	100,00	1,80 - 2,20
Piaçava	Toledo Filho (1990)	50,00 - 90,00	-	4,00 - 6,00
	CEPED (1982)	143,00	5,60	6,00
Sisal	Toledo Filho (1997)	577,50	11,00 - 27,00	2,10 - 4,20
	Ghavami et al. (1999)	580,00	18,00	6,00

2.2.1.3

Fibras de curauá

Curauá é uma planta nativa originária da Amazônia, cuja folha produz uma fibra têxtil de natureza ligno-celulósica. Trata-se de uma bromeliácea, do tipo ananás, especificamente ananás erectipholius. Existem duas espécies de Curauá, uma de folha roxa-avermelhada, que se desenvolve mais, e outra de folha verde-clara, chamada de Curauá branco. As folhas medem cerca de 5 cm de largura por 5 mm de espessura e o comprimento é de aproximadamente 1,5 m. O fruto é semelhante, em aspecto e sabor, ao do abacaxi, sendo porém mais fibroso, o que o torna impróprio para o consumo humano, além de apresentar menor tamanho que o anterior (Lobato 2003).

O Lago Grande do Curuaí, em Santarém, estado do Pará, é a zona de maior concentração de Curauá da região do Baixo Amazonas. Mais de 50 comunidades cultivam a planta em consórcio com diferentes culturas como mandioca, urucu, cumaru e seringueira.

Utilizada, desde os primórdios, pelos índios habitantes da região para a confecção de artefatos os mais diversos, a planta do curauá se desenvolve facilmente e é bastante resistente. Quando da ocupação das terras da região por agricultores e pecuaristas, a planta chegou a ser considerada uma praga, por sua facilidade de renovação. Com a transformação de grandes áreas de mata virgem em pastos para o gado

bovino, foi notável a redução da presença dessa planta em muitas áreas da região.

O plantio adensado é feito no espaçamento de 50 cm por 2 m de largura. A planta curauá produz entre 20 e 24 folhas por ano, podendo proporcionar 2 kg de fibra cada uma, e aproximadamente 98 folhas, em cinco anos, a média do seu ciclo de vida. A princípio, o maquinário usado para beneficiamento do curauá era o mesmo utilizado no processamento do sisal, planta cultivada do Nordeste brasileiro. Atualmente são utilizadas máquinas mais modernas que a tradicional “periquita”, que ainda é utilizada pelos pequenos produtores da região do Lago Grande. Esse equipamento rudimentar proporciona um baixo rendimento e muito desperdício. Introduziram-se máquinas mais modernas, com quatro entradas de alimentação, sendo previsto o desenvolvimento de novos equipamentos, como resultado de pesquisas que estão em curso em São Paulo e na Alemanha. As novas máquinas deverão ter capacidade de processar 800 kg por hora de manta de curauá.

O composto viscoso que sobra do processo de desfibramento, a mucilagem, permite a fabricação de papel e o soro do curauá que contém uma toxina utilizada para a produção de um anestésico (Gomes 2002).

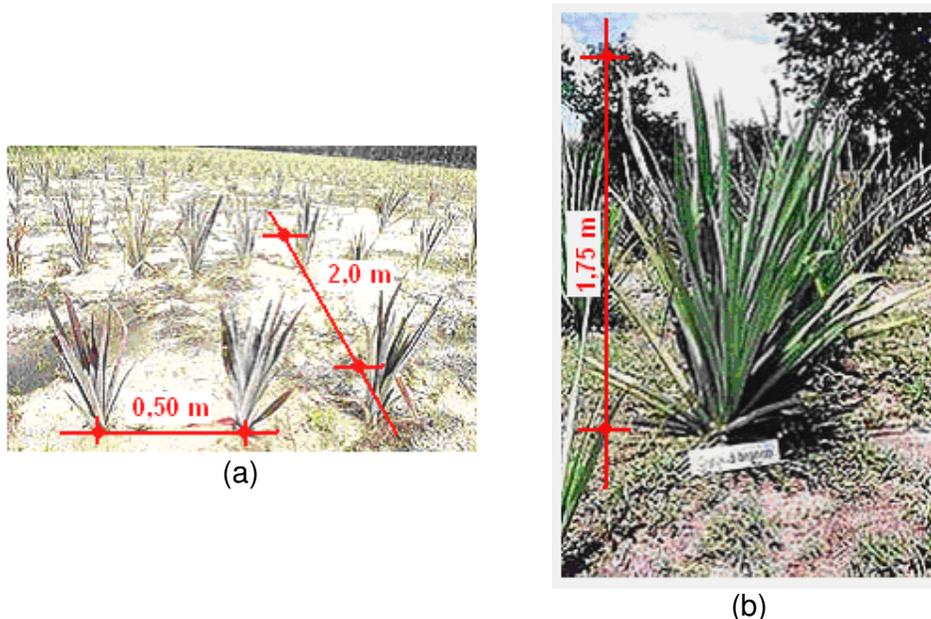


Figura 2.4 – Planta Curauá com seu Plantio adensado (a) e comprimento aproximado (b).

As folhas são transportadas até as centrais de beneficiamento, onde, após o desfibramento, procede-se à lavagem em tanques com água corrente e a secagem em varais. Após isso, é feita a secagem em estufas, que acelera o processo de perda de água, assegurando melhor qualidade ao produto final. A folha seca é embalada em fardos de até 30 kg, que são levadas às fábricas, onde são produzidas as mantas usados na composição de artefatos da indústria automobilística, tais como, tampa de porta-malas, revestimento de teto, etc.

2.2.1.4

Fibras de sisal

O sisal apresenta várias mutações naturais geradas a partir da agave fourcroydes. Na atualidade conhece-se cerca de 57 espécies e 300 variedades (Fujiyama 1997). Esta planta é resistente a clima seco e cultivado em regiões tropicais e subtropicais, sendo plantio comum no Nordeste brasileiro. Uma característica desta planta é que ela possui folhas grandes, pontiagudas e dispostas em roseta, semelhante ao abacaxi. Originou-se, segundo Ferri (1976), no México espalhando-se em seguida para outras regiões do mundo, como África, Europa e Ásia.

Usam-se as fibras de sisal para confecção de cordéis, sacos, alguns tipos de tecidos, barbantes para embalagem, reforço para cabo de arame, canos, redes, passadeiras, tapetes e reforços em compósitos.

A colheita do sisal, normalmente, é feita após 5 ou 6 anos do plantio, quando cortam-se as folhas de baixo para cima, de forma que ainda reste entre 12 ou 18 folhas na planta. Essa colheita é executada inúmeras vezes durante o ano. A vida útil dessa planta está estimada em 25 anos. As folhas apresentam coloração em tom cinza-esverdeado com largura entre 8 e 10 cm e comprimento entre 150 e 250 cm. As fibras encontram-se incrustadas no cerne das folhas. Após o corte das folhas, essas devem ser trabalhadas o quanto antes, uma vez que seu armazenamento causa rápida putrefação.

A retirada das fibras é feita com a descarnação, esmagamento e raspagem do cerne das folhas em conjunto com um jato de água, seguida

de secagem ao ar. Estes processos podem ser efetuados usando-se equipamentos mecânicos ou artesanamente (manualmente). A Figura 2.5 apresenta uma foto da planta de sisal.



Figura 2.5 – Foto planta de sisal.

2.2.1.5

Fibras de juta

Com o nome científico *Corchorus capsularis*, e originária da Índia, a juta é uma fibra resistente e tem módulo de elasticidade relativamente elevado, o que a torna conveniente para o uso como reforço de matriz cimentícia. Do fio de juta são produzidos diversos tipos de telas usadas em confecções, decorações, revestimentos de piso e parede, artesanato, cortinas, sacolas, divisórias, base para gesso, sacarias (Tolêdo Filho 1997).

Após a colheita, os feixes com as hastes, ficam imersos em água por 15 a 20 dias, depois de ser desfibrada e lavada, a juta fica é posta a secar estendida em varais, por dois ou três dias. As fibras, após a secagem, são armazenadas e, posteriormente, comercializadas em fardos. O processo de fiação tem início no amaciador, uma máquina que suaviza a fibra, e numa etapa seguinte, dá-se a cardagem que "penteia" e desembaraça a juta, resultando em finos fios, esses fios, então, são organizados em grandes rolos por uma máquina denominada passador. Os rolos seguem para as fiadeiras, onde as fibras são torcidas e trançadas, dando origem a fios, cordas e cabos de várias espessuras, de acordo com sua utilização. As fibras de juta são classificadas como: amaciadas, cardadas e urdidas transformando-se em fios.

A juta (*corchorus capsularis*) é um arbusto que alcança uma altura de 3 a 4 metros. Seu florescimento acontece cerca de 4 a 5 meses após a semeadura, iniciando-se imediatamente a colheita. A Figura 2.6 apresenta arbustos de juta.



Figura 2.6 – Arbustos de Juta.

A juta foi introduzida no Brasil no início do século XX por Ryota Oyama, passando por um processo de climatização. Iniciando sua cultura com os Japoneses, posteriormente começou a ser cultivada pelas populações ribeirinhas da região Norte do Brasil. De cultivo apropriado em regiões de várzea, os nutrientes necessários para seu crescimento podem vir próprio húmus do rio.

2.2.2

Matrizes cimentícias

Num compósito de baixo ou médio desempenho, a matriz, que é a fase contínua, é quem exerce o principal papel de suporte de esforços. Além disso, a matriz deve prover a proteção física e a ancoragem das fibras, transferindo as tensões entre os elementos de reforço. Frequentemente, devido a interações físicas ou químicas, forma-se entre as fibras e a matriz uma fase intermediária, chamada de interface ou zona de transição que, embora de pequena espessura, pode interferir no controle dos mecanismos de falha, na tenacidade na fratura e na relação tensão-deformação do material (Daniel e Ishai 1994).

Na Figura 2.7, é apresentado um esquema dos tipos de matriz, de acordo com sua natureza. As matrizes à base de cimento Portland podem se constituir de pastas, argamassas e concretos. Os compósitos estudados no presente trabalho utilizaram matriz de argamassa de cimento.

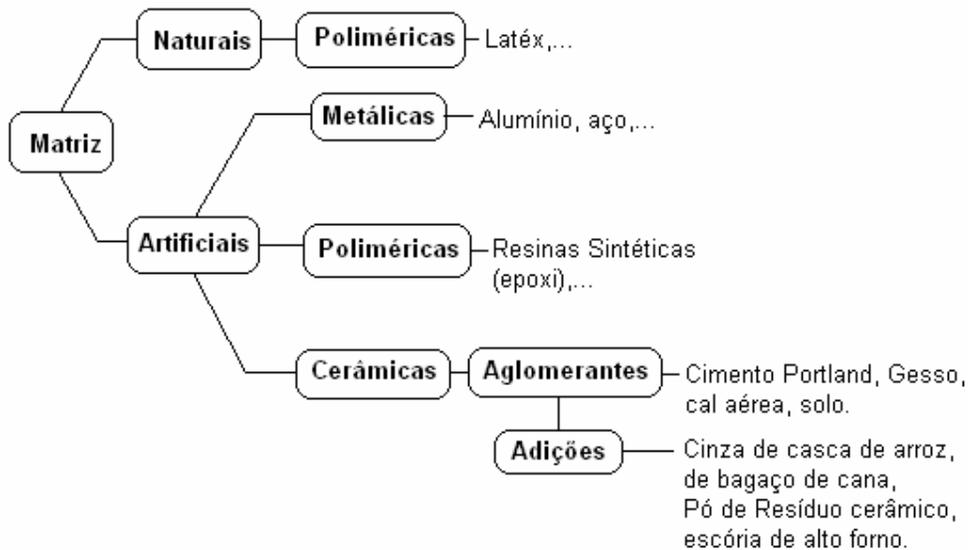


Figura 2.7 - Esquema de matrizes para compósitos.

As proporções entre os valores de algumas propriedades das fibras e da matriz são importantes fatores para a determinação do desempenho teórico do compósito. Quando são utilizadas fibras, com alongamento na ruptura superior ao da matriz, a mesma pode fissurar muito antes de ser atingido o limite de resistência da fibra. Se o módulo de elasticidade a tração da fibra é consideravelmente menor que o da matriz, como ocorre geralmente em compósitos com matriz cimentícia e fibras de celulose, somente após a fissuração da matriz é que as fibras passam a sofrer a maior parte da solicitação mecânica.

No caso de matrizes cimentícias, o diâmetro máximo das partículas dos agregados torna-se também importante, pois afeta a distribuição das fibras e a quantidade de fibras que pode ser incluída no compósito. O tamanho médio das partículas da pasta de cimento antes da hidratação se encontra entre 10 a 30 μ , enquanto pode-se considerar que uma argamassa contenha partículas de diâmetro máximo de até cerca de 5 mm. Em concretos nos quais se pretenda inserir fibras, não deveria haver partículas maiores que 20 mm e, preferivelmente, não maiores que 10 mm, pois, do contrário, torna-se difícil obter uma distribuição uniforme das fibras (Hannant 1978).

2.2.3

Propriedades dos compósitos cimentícios com fibras vegetais

2.2.3.1

Propriedades mecânicas

2.2.3.1.1

Comportamento sob compressão

Resultados de estudos experimentais anteriores demonstraram um decréscimo na resistência à compressão com fibras vegetais de sisal, acompanhado de ligeiro decréscimo do módulo de elasticidade (Tolêdo Filho 1997, Fujiyama 1997, Rodrigues 1999), Nota-se que a resistência à compressão do compósito é influenciada pelo tipo, comprimento e fração

volumétrica das fibras. A redução dessa resistência foi promovida para frações volumétricas aumentadas, refletindo o fato de que, sob esforços de compressão, as fibras não agem como reforço e podendo, na verdade, aumentar o teor de falhas no material.

Na produção de argamassa de cimento reforçada por fibras naturais vegetais, a cura do corpo de prova é geralmente feita por imersão em água. Após a retirada depois de 28 dias, os mesmos são secos naturalmente sob condições atmosféricas, ocorrendo assim a perda da água anteriormente absorvida e conseqüentemente a retração de volume das fibras. Essa retração provoca o deslocamento na interface fibra-matriz, reduzindo a resistência de aderência. Tem-se tornado consenso, entre os pesquisadores que lidam com compósitos cimentícios com fibras vegetais, o fato de que esse método de cura pode ser inadequado, por induzir esse tipo de falha no material, ainda em sua produção.

Observa-se, durante um ensaio de compressão desses compósitos, que é comum que o corpo de prova, embora já rompido, mantenha suas partes unidas pelas fibras, não perdendo, assim, sua continuidade e evitando sua fratura catastrófica. Isso vem reafirmar o papel das fibras como elementos capazes de ligar as faces das fissuras, conferindo ao material uma certa capacidade, mesmo que mínima, de carregamento, após a fissuração da matriz. A Tabela 2.3 apresenta resultados de diferentes autores do grupo de pesquisa sobre materiais e tecnologia não convencionais da PUC-Rio de ensaios à compressão.

Tabela 2.3 – Valores de ensaios de compressão de autores diferentes.

Autor	Material	$\epsilon_{axial} (\times 10^{-9})$	Coef. de Poisson	$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (MPa)	E (GPa)
Rodrigues (1999)	CPN	3,62	0,17	42,15	23,14
	CPF25	1,63	0,23	23,37	17,04
	CPF45	1,34	0,18	18,41	18,40
Tolêdo Filho (1997)	M1	3,78	0,23	70,10	29,80
	M1S325	3,00	0,21	47,80	26,10
	M1S315	2,90	0,23	47,30	24,80
	M1S225	2,53	0,23	51,30	28,00
	M1C325	2,54	0,23	49,80	28,20
Fujiyama (1997)	Arg. plena	-	-	27,80	-
	Arg. e fibra de 25	-	-	25,10	-
	Arg. e fibra de 45	-	-	21,96	-

No trabalho de Rodrigues (1999) foram utilizados compósitos com matriz de argamassa (traço em massa 1:1:0,45 de cimento: areia: relação água cimento) reforçada com fibras de sisal, com fração volumétrica de 2,21% e comprimento de 25 mm (CPF25) e 45 mm (CPF45). A mistura de referência foi argamassa plena (CPN). Fujiyama (1997) utilizou misturas semelhantes, as do trabalho anterior, com relação água/cimento de 0,40 e fração volumétrica de 3%.

No trabalho de Toledo Filho (1997) foram utilizados compósitos com matriz de argamassa (traço em massa 1:1:0,40 de cimento: areia: relação água/cimento) reforçada com fibras de sisal e coco, com frações volumétricas de 2 e 3% e comprimento de 15 mm (M1S315) e 25 mm (M1S325, M1S225, M1C325, M1C225). A mistura de referência foi argamassa plena (M1).

2.2.3.1.2

Comportamento sob flexão

A maioria das aplicações de materiais compósitos com matrizes à base de cimento estão sujeitas a cargas de flexão. Portanto, é de grande importância o conhecimento do comportamento do material quando submetido a este tipo de carregamento (Toledo Filho 1997). A carga de flexão suportada por uma viga de concreto pode ser aumentada pela inclusão de fibras. A atuação das mesmas é marcante depois de atingida a carga de pico, que corresponde ao início da fissuração da argamassa. Assim, ao invés da ruptura brusca apresentada pela matriz plena, o compósito continua a suportar carga, embora em níveis inferiores à carga de pico, apresentando grande deformação. A Tabela 2.4 apresenta resultados de ensaios à flexão feito por (Rodrigues 1999).

Tabela 2.4 - Valores de ensaios de flexão.

Autor	Material	$P_{\text{máx.}}(\text{N})$	$\delta_{\text{máx.}}(\text{mm})$	E (GPa)
Rodrigues 1999	CPN	2647,85	0,45	4,20
	CPF25	2920,16	0,93	3,34
	CPF45	2477,79	0,80	3,41

Quando uma viga retangular de material elástico é carregada em flexão, as tensões e deformações longitudinais em uma dada seção transversal variam de forma linear da superfície em compressão, para atingir um máximo de tração na superfície oposta. A tensão de ruptura, calculada a partir do momento de flexão, assumindo-se um comportamento elástico, é conhecida como módulo de ruptura e é uma medida da resistência à tração do material. Na prática, mesmo para um material elástico, o módulo de ruptura é geralmente maior que a resistência à tração, pois um volume menor do corpo de prova é tencionado e tensões de flexão, que podem surgir em um ensaio de tração pelo desalinhamento das garras, são eliminadas. No entanto, a teoria convencional das vigas é inadequada para compósitos reforçados por fibras, pois a curva tensão – deformação pós-fissuração no lado tracionado é diferente daquela observada em compressão (Brescansin 2003).

Mesmo se o compósito for considerado como um material idealmente elástico, antes da fissuração da matriz, Bentur e Mindess (1990) advertem que a teoria da flexão não pode ser considerada para o comportamento em flexão além deste ponto. Quando o limite elástico na flexão, em um material elástico perfeito, é alcançado, haverá ruptura. No entanto, o elasto-plástico pode continuar suportando cargas adicionais. Tal fato é acompanhado por modificações na distribuição das tensões, com a linha neutra movendo-se para cima e a distribuição das tensões de tração se tornando retangular. Como resultado, a curva carga-deflexão no material elasto-plástico continuará a ascender além do limite elástico. Assim, a ductilidade associada ao comportamento pseudo-plástico leva a um aumento da capacidade de carga do material idealmente plástico, mesmo que na resistência à tração não seja maior que aquela do material idealmente elástico. A Figura 2.8 mostra o comportamento à flexão de uma material elástico perfeito e elasto-plástico perfeito, mostrando a distribuição de tensão e deformação à flexão em três diferentes estágios (I, II, III) e a curva resultante da carga-deflexão resultante.

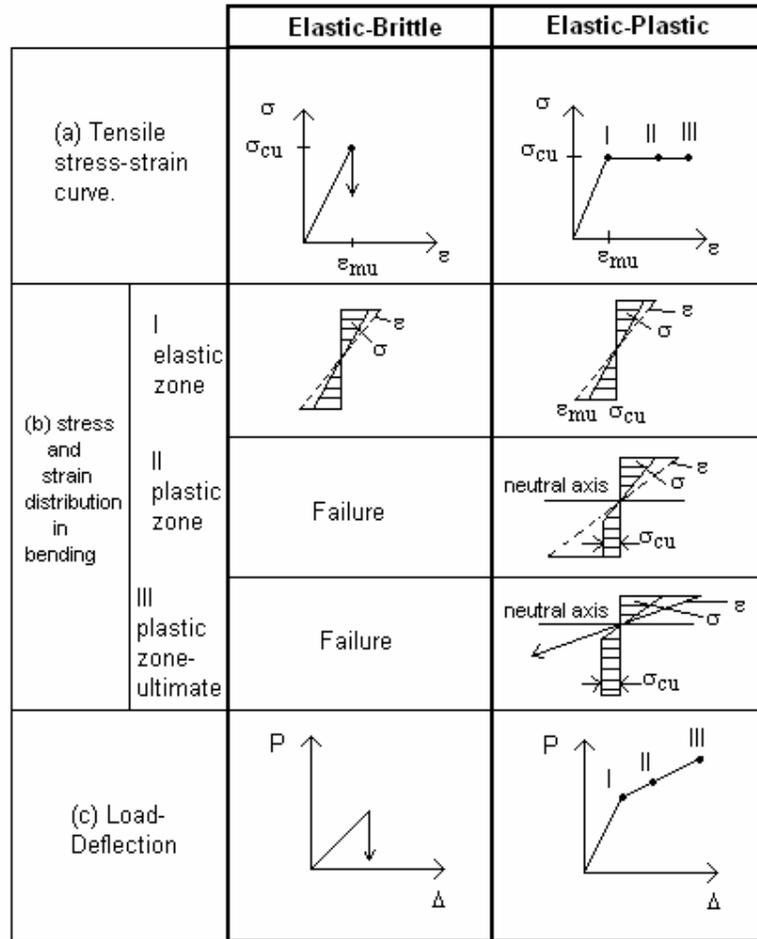


Figura 2.8 - Comportamento à flexão de um material elástico perfeito e elasto-plástico perfeito, fonte Bentur e Mindess (1990).

2.2.3.1.2.1

Análise da Tenacidade

Além da determinação da resistência sob flexão, a partir do diagrama carga-deflexão é possível determinar a tenacidade dos compósitos. A tenacidade é uma importante característica para os materiais compósitos constituídos de fibras vegetais, sendo geralmente aceito que um dos principais papéis desempenhados pelas fibras é prover tenacidade às matrizes frágeis (Tolêdo Filho et. al, 2002). Muitos ensaios podem ser aplicados para caracterização da tenacidade dos compósitos tais como tração, compressão, impacto e flexão. O ensaio de flexão é mais utilizado, pois o mesmo apresenta mais verdadeiramente as

condições de muitas situações práticas e é mais fácil de ser realizado que o ensaio de tração, por exemplo.

Os resultados dos ensaios de flexão permitem caracterizar a tenacidade através de um ou mais dos seguintes parâmetros: capacidade de absorção; índices dimensionais relacionados à capacidade de absorção de energia ou resistência à flexão equivalente em limites de deflexão pós-fissuração prescritos (Gopalaram Gettu, 1994). No entanto, tem-se observado que a curva carga-deflexão completa do ensaio de flexão depende de vários fatores como:

- Tamanho do corpo-de-prova
- Configuração da carga
- Tipo de controle (carga, deflexão no ponto de carga, deslocamento do travessão, etc.).
- Taxa de carregamento do ensaio
- Instrumentos utilizados para medição da deflexão

Mesmo a direção de aplicação de carga, com relação à direção de colocação das camadas de material na moldagem da viga compósita, afeta significativamente os resultados do ensaio de flexão. Quando a direção do ensaio é perpendicular à direção da moldagem, corpos-de-prova reforçados com fibras de aço exibiram redução na resistência à flexão e tenacidade quando comparados a corpos-de-prova cuja direção do ensaio e da moldagem são paralelas. (Toutanji; Bayasi, 1998).

Para garantir a homogeneidade e permitir a comparação dos resultados, a medida de tenacidade dos compósitos tem sido normalizada em vários países. As normas mais utilizadas, para avaliação da tenacidade são a ASTM C1018 (1992), NBN B15-238 (1992) e JCI-JCSE-SF4 (1983). A norma ASTM C1018 (1992), define a tenacidade na flexão em termos de relações entre as áreas sob a curva carga-deflexão em múltiplos de deflexão de primeira fissura e a área sob a curva carga-deflexão até primeira fissura. Essas várias relações (I_5 , I_{10} , I_{20} , I_{30}) são chamadas de índices de tenacidade e são calculados como relações das áreas sob a curva-deflexão até deflexões 3; 5,5; 10,5; 15,5 vezes a deflexão de primeira fissura, respectivamente, como está apresentado na

figura 2.9. os índices I_5 , I_{10} , I_{20} , I_{30} têm valores 5, 10, 20 e 30, respectivamente, para comportamento elasto-plástico ideal.

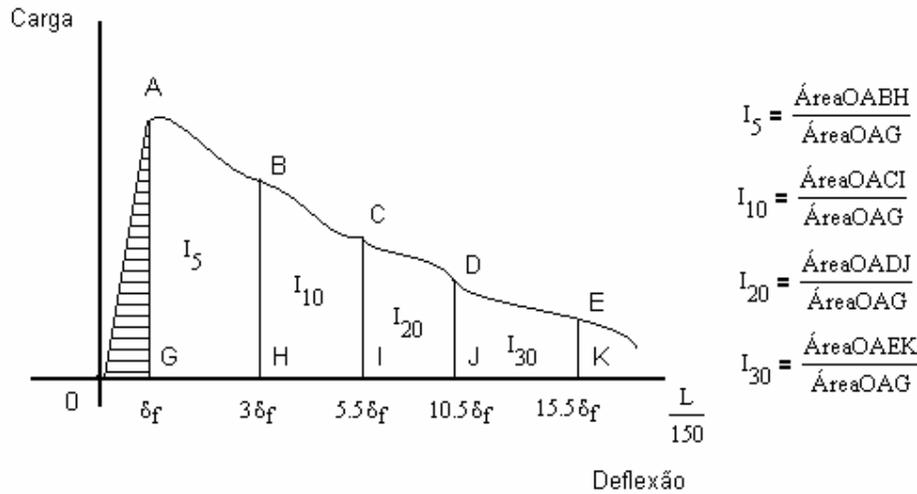


Figura 2.9 – Definição dos pontos para cálculo dos índices de tenacidade segundo a ASTM C1018 (1992).

A norma Belga NBN B15 – 238 (1992) utiliza índices de resistência adimensionais (relações entre cargas, P^*) para caracterizar a forma da curva carga-deflexão no regime pós-fissuração, como definido na figura 2.10 e o índice de tenacidade, F_T , definido a partir da energia absoluta, T_n , calculada como a área sob a curva até uma deflexão $\delta_n = L/n$, onde L é o vão livre e n são parâmetros limites ($n = 600, 450, 300, 150$), ou seja, F_T é calculado a partir de equação 2.1.

$$F_T = n \cdot \frac{T_n}{b \cdot d^2} \quad (2.1)$$

A norma japonesa JCI-JCSE-SF4 (1983) usa a capacidade de absorção de energia, $T_n = T_{JCL}$, até uma deflexão limite, no meio do vão, igual a $L/150$. Dessa forma o índice de tenacidade na flexão, F_T , é definido pela equação (2.1) com $n = 150$. As variáveis b e d representam a base e a altura da viga, respectivamente.

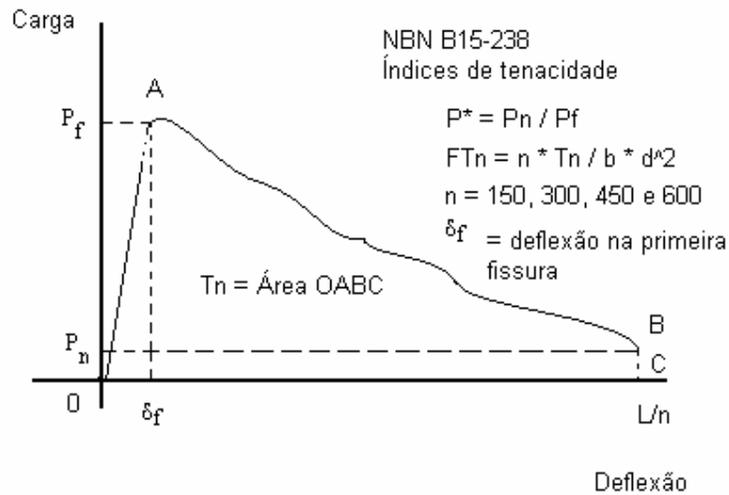


Figura 2.10 – Definição do índice de tenacidade segundo a NBN B15-238 (1992).

2.2.3.1.3

Comportamento sob tração

Mansur e Aziz (1982) apud Toledo Filho (1997), observaram, para pastas e argamassas reforçadas com fibras de juta, que a resistência à tração primeiro aumenta com o tamanho da fibra e que, após atingir um valor máximo, a mesma começa a decrescer devido o efeito adverso de se aumentar o volume de vazios no compósito. A Tabela 2.5 apresenta o comportamento de compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana e juta quando submetidos à tração direta pelos autores anteriormente citados.

Tabela 2.5 – Comportamento de Compósitos reforçados com fibras vegetais à tração direta,
Fonte Tolêdo Filho (1997).

Traço da matriz	Tipo de fibra	Vol. de fibras (%)	Comp. de fibra (mm)	f'_t (MPa)	E_t (GPa)
1:0:0,25	Bagaço-de-cana	10	25	3,87	12,40
		20	25	2,95	8,54
		30	25	2,43	6,40
1:0:0,33	Juta	0	-	1,20	9,50
		1	25	1,36	9,92
		2	25	1,96	11,60
		3	25	2,08	11,20
		4	25	1,68	11,40
1:1:0,33	Juta	0	-	2,04	15,40
		2	12	2,51	18,00
		2	18	2,18	13,43
		2	25	2,16	14,47
		2	38	2,12	17,70
1:2:0,33	Juta	0	-	2,09	17,77
		2	12	2,33	22,86
		2	18	2,48	22,56
		2	25	2,03	16,00
		2	38	1,63	16,66

2.2.3.2

Durabilidade

A fibra vegetal sofre reações de degradação ao ser posta em contato com a água alcalina do poro da matriz. A lignina e a hemicelulose são os compostos da fibra mais facilmente atacáveis. A água do poro em contato com a fibra, após a reação química, seria, então, neutralizada e o processo de degradação não progrediria. Porém, devido a gradientes de umidade do ambiente externo, essa água pode migrar, para outras áreas, por difusão. Em sua antiga posição, surge outra porção de água, ainda não neutralizada, e a fibra vegetal sofrerá nova reação química com os compostos alcalinos nela presentes. Esse processo leva a uma degradação progressiva da fibra, com a perda de material de sua superfície (Gram 1983).

Além desse tipo de ataque, a fibra pode perder suas características elásticas devido à migração dos compostos hidratados do cimento para suas cavidades (lúmen e vazios das paredes), onde ocorre a mineralização, tornando-a rígida e frágil. Esses processos levam a uma perda das propriedades desejáveis do compósito, ao longo do tempo.

A queda da durabilidade se reflete no aumento da incidência de fratura da fibra, no interior do compósito, e diminuição da incidência do arrancamento da fibra, com redução da resistência mecânica e da tenacidade do material.

As alternativas para amenizar os efeitos desses processos degradantes, encontráveis na literatura técnica, constam de ações no sentido de reduzir a alcalinidade da água do poro da matriz (por uso de cimentos especiais, menos alcalinos, ou substituição da parte do cimento por pozolanas), tratamentos prévios das fibras (impregnação com sílica), redução de porosidade da matriz (fillers, compactação, processos de cura especiais, vedação externa do componente). As pozolanas usadas, por sua vez, podem vir de fontes economicamente viáveis, como é o caso do reaproveitamento de resíduos, tais como a cinza de casca de arroz, de pó de resíduo cerâmico. A escória de alto forno, subproduto da fabricação do aço, tem-se mostrado uma alternativa viável.

2.3

Cimento Amianto

Dentre as fibras naturais minerais, a que mais se destaca é a fibra do amianto. “*Amianto é designação genérica de uma série de silicatos que apresentam naturalmente estrutura cristalina fibrosa*” (Agopyan 1983). As fibras do amianto têm boa resistência a meios muito alcalinos e boas propriedades mecânicas para o uso em Engenharia, porém suas fibras provocam doenças, principalmente nas vias respiratórias dos trabalhadores durante a sua produção. Aliada a isso, há uma grave questão ambiental, pela formação de áreas degradadas após a extração do minério. Como esse é um recurso não renovável, existe ainda a tendência a um custo crescente desse produto, quanto as reservas forem sendo esgotadas.

A produção da fibra de amianto foi proibida nos países industrializados desde os anos 70. No Brasil com a crescente conscientização de preservação do meio ambiente e a maior preocupação com as condições de salubridade no ambiente de trabalho, refletida num

maior rigor da legislação desse setor, as fibras minerais de amianto estão sendo substituídas aos poucos por fibras alternativas, como é o caso das fibras vegetais. Algumas propriedades do cimento amianto estão descritas na Tabela 2.6 (Petrucci 1978).

Tabela 2.6 – Propriedades Mecânicas do Cimento Amianto.

Propriedades Mecânicas	Valor Característico
Resistência à Compressão (MPa)	49,00 - 98,00
Resistência à Tração (MPa)	29,00 - 49,00
Módulo de Elasticidade (GPa)	21,60
Propriedades Físicas	Valor Característico
Massa Específica Real (kg/m^3)	$2,60 \cdot 10^3$
Massa Específica aparente (kg/m^3)	$1,50 \cdot 10^3 - 2,00 \cdot 10^3$