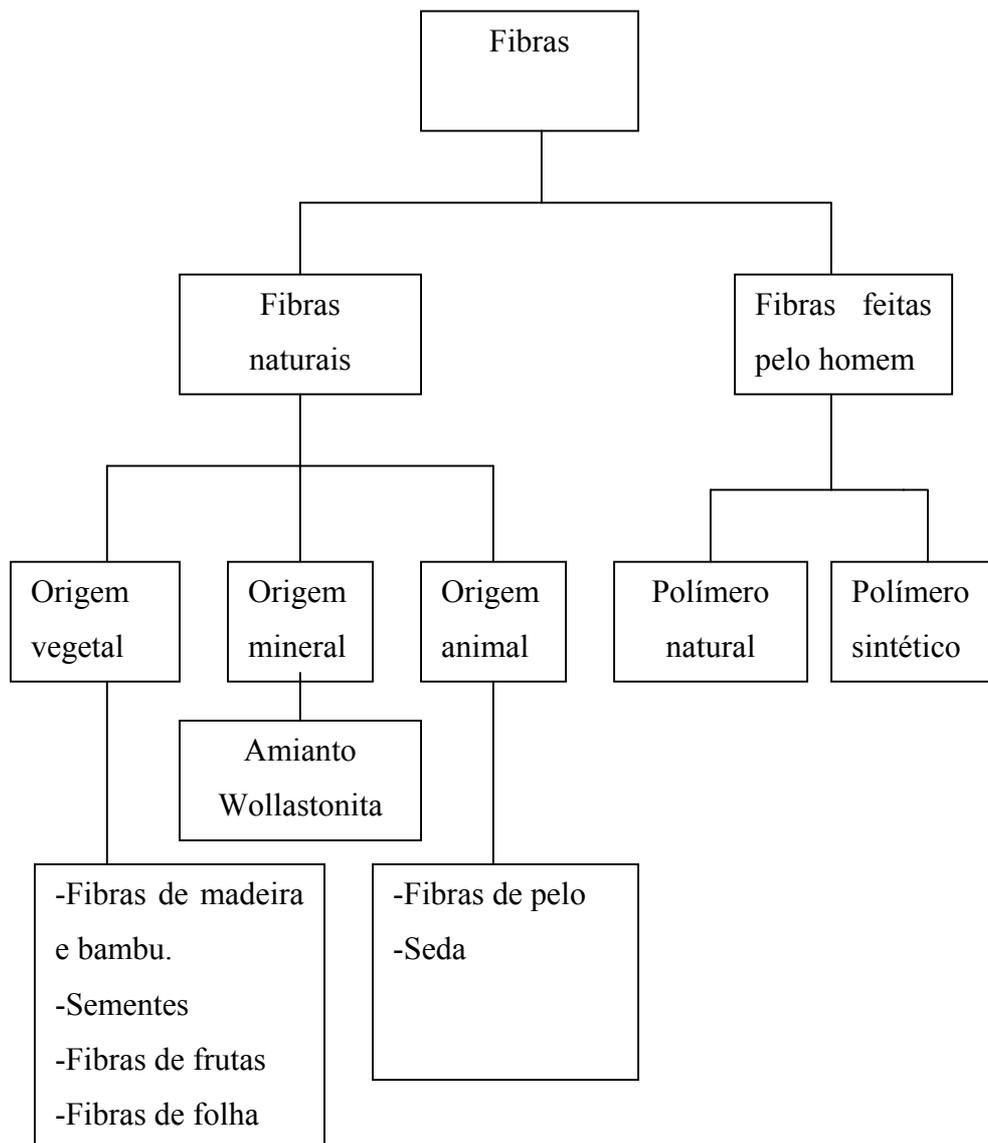


2 FIBRAS NATURAIS

2.1. Classificação

As fibras podem ser divididas em dois grupos principais, fibras naturais e fibras feitas pelo homem (Persson et al., 1984):



A utilização das fibras vegetais e minerais como reforço foi escolhida como objeto de estudo neste trabalho. Estas apresentam uma série de vantagens sobre as fibras sintéticas justificando assim o seu uso como reforço em matrizes tanto cimentícias como poliméricas. Além disso, estas fibras servem como um substituto natural para o amianto. Algumas vantagens e desvantagens da fibra vegetal em relação à sintética podem ser observadas:

Vantagens:

- Conservação de energia.
- Grande abundância.
- Baixo custo.
- Não é prejudicial à saúde.
- Possibilidade de incremento na economia agrícola.
- Prevenção de erosão.
- Baixa densidade.
- Biodegradáveis.

Desvantagens:

- Baixa durabilidade quando usada como reforço em matriz cimentícia.
- Variabilidade de propriedades.
- Fraca adesão em seu estado natural a inúmeras matrizes.

Antes de se estudar o comportamento das fibras vegetais como reforço em uma matriz, seja ela frágil ou dúctil, se faz necessário o estudo e a análise das propriedades destas fibras.

2.2.

Fibra de bambu

O bambu ocorre em áreas tropicais, subtropicais e até em áreas temperadas onde fatores ecológicos necessários ao seu desenvolvimento estão presentes. O bambu, pertence à classe das gramíneas, que é subdividida em quatro famílias e aproximadamente cinquenta gêneros. Dentre todos os gêneros apenas alguns podem ser usados para fins estruturais. São estes: *Arundinaria*, *Bambusa*, *Cephalostachyum*, *Dendrocalamus*, *Gigantocloa*, *Melocanna*, *Phyllostachys*, *Schizostachyum*, *Guadua* e *Chusquea*.

O uso do bambu como material estrutural é talvez tão antigo quanto a civilização humana, entretanto o uso de suas fibras e polpas (figura 2.1) como reforço em matrizes cimentícias data de 1910 (Subrahmanyam, 1984). A vantagem do uso das fibras do bambu como reforço é devido ao seu baixo custo, boa resistência à tração, rapidez no crescimento do bambu e baixo custo e baixo consumo de energia na produção das fibras. Alguns estudos têm sido feitos sobre o reforço por fibra de bambu em matrizes cimentícias nos últimos anos (Subrahmanyam, 1984; Pakotiprapha et al., 1983a; Pakotiprapha et al., 1983b; Coutts et al., 1995). As características principais das fibras de bambu estão listadas na tabela 2.1.



Figura 2.1 – Aspecto macroscópico da polpa de bambu.

A polpa do bambu é obtida da mesma forma que se obtém as polpas de madeira para fabricação de papel. Sendo as principais formas de obtenção a polpação mecânica e a polpação Kraft.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas e físicas da polpa e fibra de bambu.

Ref.	Comprimento (mm)	Diâmetro (μm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Along. na ruptura (%)	Densidade (kg/m^3)	Obs.
Smook (1989)	2,8	15	-	-	-	-	polpa
Guimarães (1987)	-	-	28,2	564	3,22	-	fibra
Sinha (1975)	3,06	7	-	-	-	1600	fibra

Estes processos estão além do escopo desta dissertação podendo ser melhor compreendido através de bibliografias específicas (Smook, 1989). A vantagem destes processos está na eliminação da lignina, a qual pode ser atacada pela alcalinidade da matriz cimentícia.

A estrutura de uma fibra de madeira, a qual é muito semelhante a do bambu, pois ambas são fibras celulósicas, pode ser melhor compreendida através da figura 2.2. Esta estrutura está subdividida em:

- Lamela intermediária (LI): Ligação entre fibras, em sua maior parte composta de lignina.
- Parede primária (P): Camada fina, relativamente impermeável, de aproximadamente 0,05 μm de espessura.
- Parede secundária (S): Composta por três camadas distintas, caracterizadas por diferentes alinhamentos de fibrilas. S_1 : é a camada externa da parede secundária (0,1-0,2 μm de espessura). S_2 : forma o corpo principal da célula possuindo espessura entre 2 e 10 μm . S_3 : é a parte interna da parede secundária (aproximadamente 0,1 μm de espessura).
- Parede terciária (T): Igual a S_3 .
- Lúmen (L): O canal central da fibra.

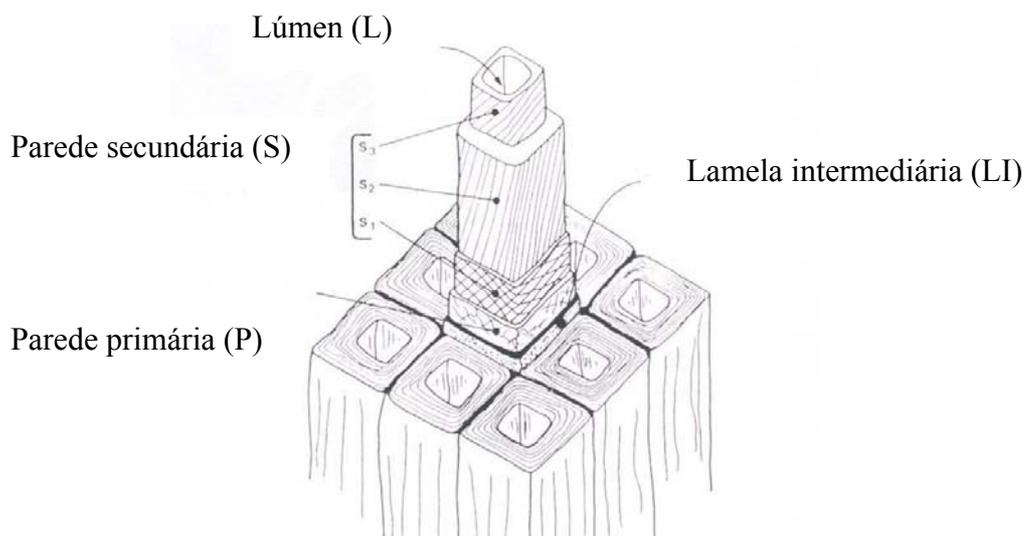


Figura 2.2 – Estrutura de uma fibra de madeira (Coutts, 1992).

2.3. Fibra de sisal

O nome sisal é oriundo de uma cidade costeira em Yucatan, México, tendo como significado, água fria (Persson et al., 1984). O sisal (figura 2.3) é uma das fibras vegetais que possui maior resistência à tração e uma das mais indicadas para o uso como reforço em argamassas.



(a)



(b)

Figura 2.3 – O sisal (a) e sua fibra (b).

Como se pode ver através da tabela 2.2, as propriedades mecânicas e físicas apresentam grande variabilidade, assim como ocorre para outras fibras vegetais. Isto pode ser explicado pela espécie da planta, local de plantio e metodologia de ensaios. No Brasil a espécie cultivada é a *Agave Sisalana*, sendo que o Estado da Bahia contribui com 85 % do total da produção. A cultura do sisal existe no Brasil desde a década de 40, quando foi trazida da região de Yucatan - México, para ser cultivado nos Estados da Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte, tendo em vista que essas regiões apresentam um clima propício para o desenvolvimento da cultura sisaleira. Desde sua implantação no Brasil, o processo de extração da fibra é exatamente o mesmo. Não houve nenhum avanço tecnológico nesta área e, em função disso, a produtividade brasileira é muito baixa, em detrimento de outros países produtores, que desenvolveram tecnologias mais avançadas e, atualmente, possuem uma produtividade 4 vezes maior do que a produtividade brasileira (CNA, 2003).

A figura 2.4 mostra a seção transversal de uma planta de sisal, onde pode ser visto a localização de fibras mecânicas e fibras arco, assim como a estrutura da última. A estrutura do tecido das fibras arco dá a elas uma considerável resistência

mecânica (Li et al., 2000). Essas são as fibras mais longas e em comparação com as fibras mecânicas elas se separam facilmente durante o processamento.

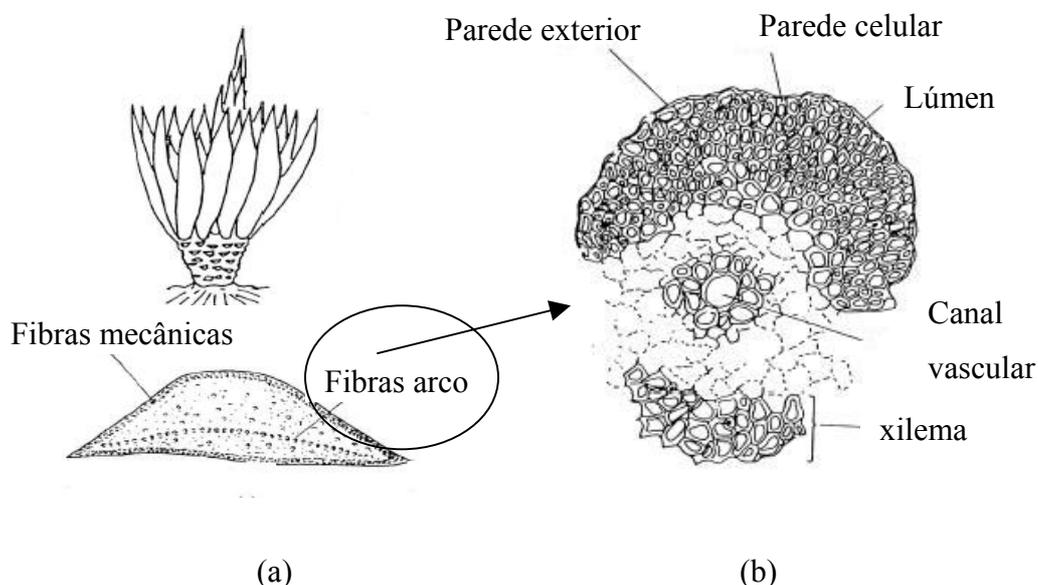


Figura 2.4 – Localização das fibras mecânicas e arco (a) e seção transversal da fibra arco (b). (Li et al., 2000)

As fibras xilema possuem formato irregular, sendo compostas de células de paredes finas as quais são fáceis de quebrar e de se perder durante o processo de extração. Estas fibras estão situadas no lado oposto às fibras arco através da conexão com o canal vascular.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas e físicas da fibra de sisal.

Ref.	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Densidade (kg/m ³)	Diâmetro (µm)
Guimarães (1987)	14,9	176	29,2	-	-
Chand et al (1988)	9,4-22	530-640	3-7	1450	50-300
Tolêdo Filho (1997)	10,94-26,70	227,8-230	2,08-4,18	750-1070	80-300
Beaudoin (1990)	13-26	1000-2000	3-5	-	-

2.4. Wollastonita

Wollastonita é um metasilicato de cálcio (CaOSiO_2). Este mineral possui uma composição de 48,3 % de óxido de cálcio (CaO) e 51,7% de dióxido de silício (SiO_2), podendo apresentar pequenas quantidades de alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio (Virta, 1997). A wollastonita (figura 2.5) apresenta morfologia acicular e foi reconhecida em 1822 pelo químico inglês Sir Willian Wollaston. Esta resulta da transformação metamórfica de rochas carbonáceas com o quartzo. A principal utilização da wollastonita se dá como substituto para o amianto, na produção de cerâmica, tintas e plásticos. Também é usado em adesivos, produtos sujeitos à fricção e refratários entre outros.

A produção de wollastonita foi estimada entre 500.000 e 550.000 toneladas em 1996, sendo que alguns dos maiores produtores em 1996 foram (Virta, 1997):

- China – 250.000 toneladas
- Estados Unidos – 150.000 toneladas.
- Índia – 90.000 toneladas
- México – 29.000 toneladas
- Finlândia – 22.300 toneladas

No Brasil existe uma reserva em Itaoca – São Paulo de 800.000 toneladas. A reserva nos Estados Unidos é de 5 milhões de toneladas e no México, de 90 milhões de toneladas.

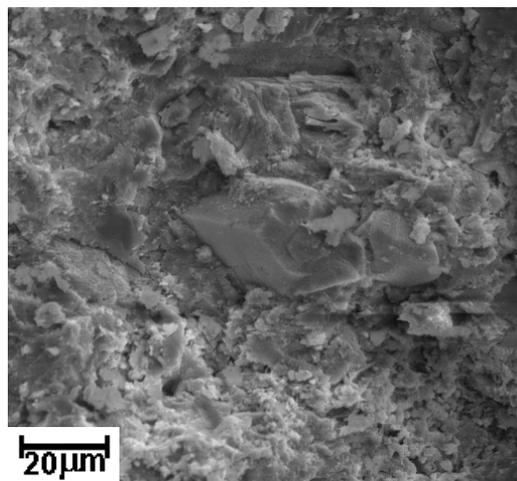


Figura 2.5 – Fibra de wollastonita fraturada em uma matriz cimentícia observada através do MEV.

A dimensão transversal de uma partícula individual pode variar de cerca de 5 μm a 100 μm e a longitudinal pode variar de 50 μm a 200 μm . Devido a essa pouca uniformidade de dimensões, são geralmente comercializadas em faixas de medidas (grades) conforme as necessidades de utilização. As propriedades físicas e mecânicas da wollastonita NYAD 325 da Nycos Minerals pode ser verificada na tabela abaixo, assim como sua composição química.

Tabela 2.3 – Propriedades físicas e mecânicas e composição química da wollastonita NYAD 325. (NYCO TECHNICAL DATA IN-82-88-4, 1988).

Propriedades físicas e Mecânicas		Composição química (%)	
Massa Específica (kg/m^3)	2900	CaO	47,5
Módulo de Elasticidade (GPa)	120	SiO ₂	51
Resistência à tração	-	Fe ₂ O ₃	0,40
pH (10% diluída)	9,90	Al ₂ O ₃	0,20
Solubilidade na Água ($\text{g}/100\text{cm}^3$)	0,0095	MnO	0,10
Coef. exp. Term. ($\text{mm}/\text{mm}/^\circ\text{C}$)	$6,5 \times 10^{-6}$	MgO	0,10
Ponto de fusão ($^\circ\text{C}$)	1540	TiO ₂	0,02
Razão de aspecto (L/d)	5:1	-	-
Peso molecular	116	-	-
Dureza Moh's	4,5	-	-
Perda ao fogo (1000 $^\circ\text{C}$)	0,68	-	-

2.5. Fibra de eucalipto

O eucalipto (*Eucalyptus regnans*) é classificado como uma madeira dura sendo que suas fibras apresentam grandes diferenças em relação a madeiras moles:

- suas fibras são muito mais curtas.
- Parede celular mais espessa
- Maior quantidade de vasos de parede fina.
- Menor diferença entre madeiras mais jovens e velhas.

Poucos trabalhos sobre a fibra de eucalipto são encontrados na literatura assim como dados de suas propriedades físicas e mecânicas. Coutts et al. (1987) fizeram um estudo mostrando a superioridade das fibras do *Pinus Radiata* em relação as fibras de eucalipto, quando usadas como reforço em matriz cimentícia; fibras estas provenientes de uma madeira mole em relação ao eucalipto. Na tabela 2.4 são mostradas as propriedades físicas e mecânicas da fibra de eucalipto. Pode-se notar que sua resistência à tração é bem variável. Deve-se levar em conta que as diferentes espécies de eucalipto devem influenciar nestes resultados. O módulo de elasticidade é bastante elevado chegando a ser maior do que o do sisal.

Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas e físicas da fibra de eucalipto.

Ref.	Comp. (mm)	Diâmetro (μm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)
Hillis et al. apud Coutts (1984)	1,0	20	-	-
Fordos et al. (1986)	0,9-1,2	12-30	45	200-1300

2.6.

Fibra de juta

A juta é uma fibra vegetal tradicionalmente usada para se fazer cordas e sacos. Esta fibra é obtida da haste da planta (*Corchorus capsularis*), tendo seu comprimento uma variação de 200 a 1500 mm (d'Almeida, 1987) e sendo composta de 58-63 % de α - celulose, 21-24 % de hemicelulose, 12-14 % de lignina. As propriedades mecânicas da juta estão listadas na tabela 2.5. Pode-se observar que os valores mostrados, embora baixos quando comparados aos das fibras industriais, são adequados para aplicações sujeitas a baixas solicitações mecânicas.

Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas e físicas da fibra de juta.

Ref.	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Diâmetro (μm)	Densidade (kg/m^3)	Comp. (mm)
Chawla (1979)	21,78	270,5	-	-	-	-
d'Almeida (1987)	21,1	270,5	1,28	-	-	-
Chand (1988)	17,42	239,46	1,16	200	-	-
Aziz (1987)	26-32	250-350	2-3	100-400	120-140	180-800
Beaudoin (1990)	26-32	250-350	1,5-1,9	-	-	-

2.7.

Fibra de coco

A fibra do coco é obtida da fruta proveniente do coqueiro (*Cocos nucifera*). Sua fibra é extraída da parte mais externa, chamada exocarpo, e do endocarpo, conforme é mostrado na figura 2.6. O cultivo do coco esta concentrado principalmente nas áreas tropicais da Ásia e do leste da África (Azis et al., 1984). Suas fibras apresentam comprimento entre 150 e 300 mm consistindo principalmente de lignina, tanina, celulose, pectinina e outras substâncias solúveis

em água. Existem três tipos principais de fibras: a mais longa e fina, conhecida como fibra branca a qual é usada para fabricação de cordas e esteiras. Uma fibra mais grossa, a qual é usada para fazer capachos e uma fibra mais curta utilizada como enchimento em colchões.

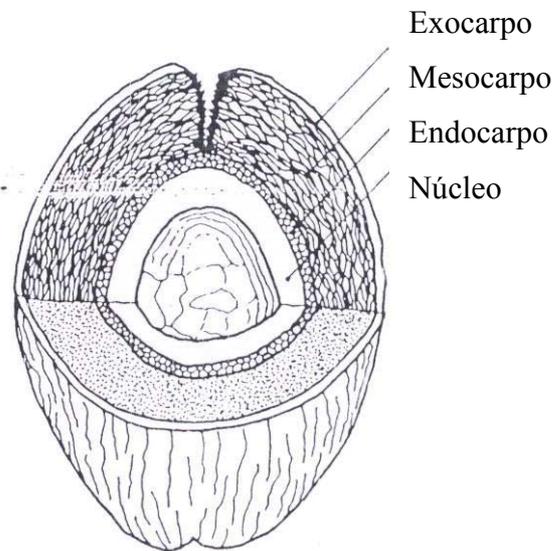


Figura 2.6 – Estrutura da fruta do Coco (Persson et al., 1984).

A produção mundial de coco no ano de 1981 foi de 30 a 35 milhões de cocos. Sendo que pelo menos 2 milhões de toneladas de fibras são jogadas fora por ano (Persson et al., 1984). Na figura 2.7 é apresentado um gráfico da produção anual de coco entre o ano de 1992 e 2001. O preço da fibra é bastante baixo, a partir de 20 dólares americanos por tonelada dependendo da qualidade da fibra. (Persson et al., 1984).

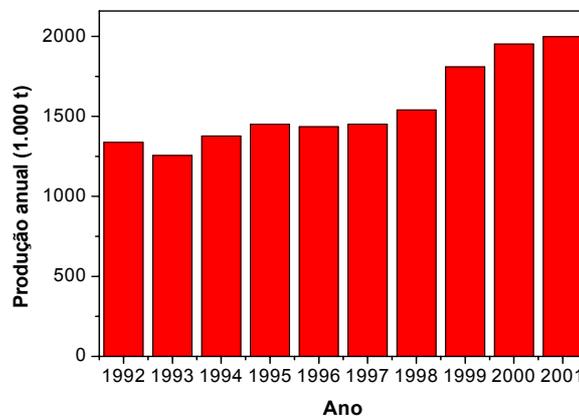


Figura 2.7 – Produção anual de coco.

Observando as propriedades mecânicas através da tabela 2.6 nota-se que a fibra de coco possui uma resistência à tração variando de 69 a 200 MPa possuindo módulo de elasticidade baixo, quando comparadas com as fibras vegetais supra citadas.

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas e físicas da fibra de coco.

Ref.	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Diâmetro (μm)	Densidade (kg/m^3)
Guimarães (1987)	2,74	176	29,2	-	-
Chand et al. (1988)	6,2	131-175	-	100-450	1150
Azis et al. (1987)	1,9-2,6	100-200	10-25	100-400	-
Paramasivam et al. (1984)	2	69,3	-	300	1140
Kulkarni et al. (1981)	-	163-226	30-42	200-300	-
Beaudoin (1990)	2	71	-	-	-

2.8.

Fibra de banana

A banana é uma planta tropical muito cultivada em razão dos seus frutos. Seu gênero é classificado como *Musa*, da família *Musaceae*, a qual engloba mais de 30 espécies distintas e pelo menos 100 subespécies. O seu gênero é dividido em dois grupos principais chamados *samusa* e *physicals*. Fibras de banana são brancas, finas, moles e lustrosas podendo ser usadas como matéria prima para produção de sacolas, cordas e jogos de mesa entre outros. Esta é uma fibra multicelular sendo a falta de dados científicos uma das razões para a sua pouca

utilização. As propriedades mecânicas e físicas da fibra de banana estão mostradas na tabela 2.7. Sua resistência à tração e módulo de elasticidade são bem próximos aos da fibra de sisal, considerada uma das mais resistentes entre as fibras naturais.

Tabela 2.7 – Propriedades mecânicas e físicas da fibra de banana.

Ref.	Comprimento (mm)	Diâmetro da fibra (μm)	Densidade (kg/m^3)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Zhu et al. (1994)	2,0	3,0	1500	700-800	-	-
Kulkarni et al. (1983)	10-300	50-250	-	468-1055	27-32	-
Chand et al. (1988)	-	80-250	1350	529-754	7,7-20	1-3
Beaudoin (1990)	-	-	-	1100-1300	-	-

2.9.

Matrizes cimentícias reforçadas por fibras naturais

A maior parte das pesquisas nos últimos anos sobre o uso de fibras naturais como reforço em matrizes cimentícias foi motivada pela grande quantidade de fibras disponíveis e pelo fato delas possuírem alta resistência mecânica (Bentur et al., 1990). Combinado com o processo de fabricação simples, o qual permite a produção de compósitos de várias formas, esses se tornam ideais para a utilização em residências de baixo custo. O papel das fibras naturais na resistência ao impacto, melhorando assim a ductilidade e a absorção de energia, é de considerável importância prática. Entretanto, a durabilidade a longo prazo destas fibras na matriz cimentícia tem ainda que ser estabelecida. O hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia ataca a lignina e a hemicelulose localizadas na lamela central das fibras, enfraquecendo assim a ligação entre as

células individuais (Tolêdo Filho, 2000). Outro mecanismo de degradação, relatado por Gram (1983), é a hidrólise alcalina das moléculas de celulose. Esta causa a degradação de cadeias de moléculas levando a uma redução do grau de polimerização e a uma menor resistência à tração.

Inúmeros trabalhos sobre propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras naturais tem sido feito nos últimos anos. Os principais pontos estudados são a sua resistência à flexão e a tenacidade estática, sendo que estudos sobre a resistência ao impacto não são encontrados na literatura disponível.

2.9.1.

Modelo para análise de compósitos reforçados por fibras descontínuas

Neste trabalho os compósitos foram reforçados por fibras curtas distribuídas aleatoriamente na matriz. Compósitos reforçados por fibras longas, contínuas, são muito mais rígidos e resistentes. Entretanto algumas vantagens importantes podem ser observadas nos compósitos reforçados por fibras curtas e aleatoriamente distribuídas. Por exemplo, o processo de fabricação se torna muito mais rápido e fácil resultando em um baixo custo. Além disso, o compósito apresenta um comportamento isotrópico o qual é muito mais fácil de ser analisado. Os compósitos podem apenas ser considerados verdadeiramente isotrópicos se isto ocorrer nas três dimensões. Esta situação é suscetível de acontecer quando o comprimento da fibra for muito menor que a espessura do compósito. Caso contrário o compósito apresenta isotropia plana ou bi-dimensional

Fórmulas empíricas foram criadas por Cox (1952) para o cálculo das constantes elásticas do papel e outros materiais fibrosos, estas porém não são consideradas precisas o suficiente para o dimensionamento de materiais compósitos (Gibson, 1994):

Para o caso de isotropia bi-dimensional:

$$\bar{E} = \frac{E_f V_f}{3} ; \quad \bar{G} = \frac{E_f V_f}{8} ; \quad \bar{\nu} = \frac{1}{3} \quad (2.1)$$

Para o caso de isotropia tri-dimensional:

$$\bar{E} = \frac{E_f V_f}{6} \quad ; \quad \bar{G} = \frac{E_f V_f}{15} \quad ; \quad \bar{\nu} = \frac{1}{4} \quad (2.2)$$

\bar{E} = módulo de elasticidade longitudinal médio.

\bar{G} = Módulo de Cisalhamento médio.

$\bar{\nu}$ = Coeficiente de Poisson médio.

A modelagem de materiais compósitos é normalmente baseada na regra das misturas. Entretanto a regra das misturas para propriedades mecânicas só é válida se os componentes são lineares elásticos e a adesão entre eles é perfeita. Sendo assim a regra das misturas só pode ser aplicada ao regime elástico, pré-fratura, levando em conta ainda fatores de eficiência.

A eficiência do reforço por fibras pode ser julgada com base em dois critérios: a melhoria da resistência e da tenacidade do compósito, quando comparado com a matriz sem reforço. Esses efeitos dependem do comprimento da fibra, da sua orientação e da adesão interfacial fibra-matriz. Em aplicações de engenharia estes fatores de eficiência variam entre 0 e 1.

Para possibilitar o uso da regra das misturas em compósitos reforçados por fibras curtas dispostas aleatoriamente, Cox (1952) e Krenchel (1964) desenvolveram fatores de eficiência - η_1 relativo à orientação das fibras e η_2 relativo ao tamanho das fibras - transformando assim a equação da regra das misturas, por exemplo, em (Jones, 1975):

$$\sigma_{ct} = \eta_1 \eta_2 \sigma_{ft} V_f + \sigma_{mt} V_m \quad (2.3)$$

A maior influência das fibras é no período de pós-fissuração, onde a influência da matriz é pequena, podendo até mesmo ser desprezada devido às múltiplas fissuras existentes. Pode-se assim eliminar o 2º termo da equação 2.3 para o cálculo da resistência a tração:

$$\sigma_{ct} = \eta_1 \eta_2 \sigma_{ft} V_f \quad (2.4)$$

A tabela 2.8 mostra os valores de η_1 para compósitos não fissurados:

Tabela 2.8 – Valores dos fatores de eficiência η_1 dados por Cox e Krenchel.

Orientação das fibras	Deformação ocorre nas duas direções (Cox, 1952)	Deformação ocorre apenas na direção da força aplicada (Krenchel, 1964)
Alinhadas	1	1
Aleatoriamente no plano (isotropia bi-dimensional)	1/3	3/8
Aleatoriamente no volume (isotropia tri-dimensional)	1/6	1/5

De acordo com Krenchel (1964) para fibras curtas deve ser usado um fator de eficiência η_2 :

$$\eta_2 = 1 - 2 \frac{L_s}{L} \quad (2.5)$$

onde ,

$$L_s = \frac{\sigma_f}{4\tau} d$$

d = diâmetro da fibra.

τ = tensão de adesão interfacial fibra-matriz.

σ_f = resistência à tração da fibra.

L = comprimento da fibra

Sendo assim de acordo com Krenchel (1964) o fator de eficiência total η seria o produto de η_1 e η_2 .

Laws (1971) em seu trabalho concluiu que para a zona elástica, definida como a zona anterior à falha da matriz, o fator de eficiência do comprimento, η_2 , para um compósito com fibras curtas alinhadas deve ser bem próximo a 1. O fator de orientação nesta região para compósitos com fibras distribuídas aleatoriamente no plano é 1/3 (deformação ocorre nas duas direções) e 3/8 (deformação ocorre

apenas na direção da força aplicada). Para compósitos com fibras distribuídas aleatoriamente em 3 dimensões o valor de η_1 é 1/6 (deformação ocorre nas duas direções) e 1/8 (deformação ocorre apenas na direção da força aplicada).

Já Romualdi e Mandel (1964) propuseram que em um compósito reforçado por fibras curtas dispostas aleatoriamente, apenas 41% destas fibras contribuem para o controle das fissuras. Este valor foi obtido considerando-se que se N fibras são orientadas uniformemente (distribuição uniforme de θ e ϕ - figura 2.8), o comprimento médio das fibras na direção x é dado pela equação 2.6.

$$\frac{N \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} L \cos \theta \cos \phi d\theta d\phi}{N(\pi/2)^2} = 0,41L \quad (2.6)$$

L = comprimento da fibra.

N = número de fibras.

$L \cos\theta\cos\phi$ = projeção na direção x.

Dessa forma apenas 41% da quantidade total de fibras contribui como reforço na matriz.

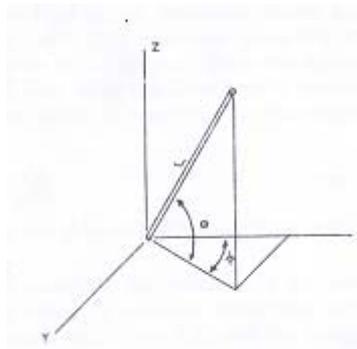


Figura 2.8- Fibra de comprimento L orientada aleatoriamente.

Alguns pesquisadores desenvolveram equações que podem ser utilizadas para se calcular a resistência à flexão, tração, ruptura das fibras e tenacidade entre outros parâmetros, a saber:

- **Swamy e Mangat (1974) , Swamy, Mangat e Rao (1974):**

Para deformações elásticas iguais na fibra e na matriz a resistência à tração em um compósito é dada pela regra das misturas como:

$$\sigma_{ct} = \sigma_{mt}V_m + \sigma_fV_f \quad (2.7)$$

O módulo de ruptura da matriz pode ser relacionado a sua resistência à tração:

$$\sigma_{mf} = \beta\sigma_{mt} \quad (2.8)$$

Multiplicando a equação 2.7 por β tem-se:

$$\beta\sigma_{ct} = \sigma_{mf}V_m + \beta\sigma_fV_f \quad (2.9)$$

Para concreto reforçado por fibras, o módulo de ruptura pode ser relacionado ao módulo de resistência à flexão Z :

$$M = \sigma_{mf}Z \quad (2.10)$$

onde M é o momento aplicado e $Z = \frac{I}{c}$.

Entretanto é notório que a linearidade não pode ser aplicada para concreto fibroso e a distribuição não linear da tensão de flexão é relacionada a tensão de tração:

$$M = \sigma_{ct}(\alpha Z) \quad (2.11)$$

onde, α é um fator que correlaciona a tensão na fibra, o módulo da resistência à flexão da seção e o momento aplicado.

Das equações 2.10 e 2.11 tem-se:

$$\sigma_{mf} = \sigma_{ct}\alpha \quad (2.12)$$

E pelas equações 2.9 e 2.12 tem-se:

$$\alpha\beta\sigma_{ct} = \alpha\sigma_{mf}V_m + \alpha\beta\sigma_fV_f \quad (2.13)$$

ou

$$\sigma_{cf} = \frac{\alpha}{\beta}\sigma_{mf}V_m + \alpha\sigma_fV_f \quad (2.14)$$

Para compósitos que falhem por arrancamento pode-se substituir σ_f na equação 2.14 por:

$$L_c = \sigma_f \frac{d}{2\tau} \quad (2.15)$$

Substituindo a equação 2.15 em 2.14 tem-se:

$$\sigma_{cf} = \frac{\alpha}{\beta}\sigma_{mf}V_m + \alpha 0,82\tau V_f L / d \quad (2.16)$$

Como na equação 2.16 a constante α relaciona a tensão na fibra do compósito ao momento aplicado e a tensão na fibra depende da tensão de adesão interfacial, τ , pode-se reescrever a equação 2.16 como:

$$\sigma_{cf} = A\sigma_{mf}V_m + 0,82\tau V_f L / d \quad (2.17)$$

onde, o valor de τ inclui a influência de α .

-Aveston, Mercer e Sillwood (1974):

Para fibras curtas Aveston et al.(1974) desenvolveram um modelo para se avaliar o limite de resistência do compósito. Foi assumido que $L < L_c$ e que a resistência ao arrancamento das fibras é suficiente para suportar o carregamento no compósito. Dessa forma a resistência seria simplesmente igual a força

friccional necessária para o arrancamento das fibras com comprimento médio de $L/4$ multiplicado pelo número de fibras por área $N = v_f / \pi r^2$.

$$\sigma_c = 2\pi r \tau \left(\frac{L}{4} \right) \left(\frac{v_f}{\pi r^2} \right) = \frac{v_f \tau L}{d} \quad (2.18)$$

Se for assumido que o decréscimo na tensão de adesão interfacial é proporcional a tensão da fibra tem-se que:

$$\tau = \tau_0 - \frac{KF}{\pi r^2} \quad (2.19)$$

e

$$F = 2\pi r \tau L = \frac{2\pi r \tau_0 L}{1 + \frac{2KL}{r}} \quad (2.20)$$

onde,

F = força de arrancamento média.

A resistência do compósito seria então o produto da força de arrancamento média por fibra, entre $L = 0$ e $L = l/2$ e pelo número de fibras por unidade de área $N = v_f / \pi r^2$:

$$\sigma_u = \frac{v_f}{\pi r^2} \frac{2}{L} \int_0^{l/2} \frac{2\pi r \tau_0 L}{1 + \frac{2KL}{r}} = \frac{v_f \tau_0}{K} \left[1 - \frac{r}{KL} \log \left(1 + \frac{KL}{r} \right) \right] \quad (2.21)$$

- Aveston, Cooper e Kelly (1971):

Neste trabalho foi deduzido um modelo para a tensão de ruptura das fibras a qual é dada pela equação 2.22:

$$\sigma_{fuc} = \left[\frac{12U_s \tau E_m E_f V_m^2}{r E_c V_f} \right]^{1/3} \quad (2.22)$$

onde,

$$U_s = \frac{V_f}{\pi r^2} 2\pi r \int_0^{x'} \tau \Delta v dx$$

Δv = deslocamento na fibra – deslocamento na matriz.

r = raio da fibra.

x' = comprimento necessário para fibras contínuas transferirem o carregamento por área unitária do compósito.

$$x' = \frac{V_m \sigma_m r}{V_f 2\tau}$$

- **Marston, Atkins e Felbeck (1974):**

Marston et al. (1974) desenvolveram um modelo para o cálculo da tenacidade total em um compósito. Este modelo é baseado na soma das tenacidades de arrancamento das fibras, formação de novas superfícies e redistribuição de tensões.

A energia liberada na criação de novas superfícies durante a fratura do material foi a novidade no modelo de Marston. Para se determinar a tenacidade gerada pela formação de novas superfícies é necessário levar em conta a área criada pela fratura das fibras, matriz e interface fibra-matriz.

A seção transversal da nova área criada pela fratura das fibras pode ser aproximada por:

$$A_f = \frac{N\pi d^2}{4} \quad (2.23)$$

onde, N é igual ao número total de fibras fraturadas e d é o diâmetro da fibra.

R_f pode ser então definido como a tenacidade superficial da fibra.

O segundo tipo de superfície formada é a área da seção transversal da matriz a qual pode ser aproximada pela equação

$$A_m = A_{nom} - A_f \quad (2.24)$$

onde, A_{nom} é a área da seção transversal.

A tenacidade da matriz R_m é determinada experimentalmente.

O terceiro tipo de superfície formada é aquela criada entre a fibra e a matriz como o resultado de fraturas interfaciais. A área criada por essa fratura é:

$$A_{if} = N\pi dL \quad (2.25)$$

onde, L é o comprimento médio exposto da fibra nas metades da superfície fraturada. Se as fibras fraturam de forma aleatória, o comprimento médio das fibras expostas será $\frac{1}{4}$ do seu comprimento total. Dessa forma

$$A_{if} = \frac{N\pi dL_c}{4} \quad (2.26)$$

Sendo R_{if} a energia associada a interface, a energia total consumida é igual a

$$U_{total} = \frac{N\pi d^2}{4} R_f + \left(A_{nom} - \frac{N\pi d^2}{4} \right) R_m + \frac{N\pi dL_c}{4} R_{if} \quad (2.27)$$

A tenacidade é definida como a razão da energia total dissipada pela área de dissipação.

$$\frac{U_{total}}{A_{nom}} \quad (2.28)$$

A área nominal pode ser relacionada a fração volumétrica das fibras:

$$v_f = \frac{N\pi d^2}{4A_{nom}} \quad (2.29)$$

Dessa forma tem-se:

$$A_{\text{nom}} = \frac{N\pi d^2}{4v_f} \quad (2.30)$$

A substituição das equações 2.27 e 2.30 em 2.28 resulta em:

$$R_s = v_f R_f + (1 - v_f) R_m + \frac{v_f L_c R_{if}}{d} \quad (2.31)$$

Utilizando $L_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau}$

obtém-se de forma equivalente,

$$R_s = v_f R_f + (1 - v_f) R_m + \frac{v_f \sigma_f R_{if}}{2\tau} \quad (2.32)$$

Se $v_f R_f$ for muito pequeno tem-se

$$R_s = v_m R_m + \frac{v_f \sigma_f R_{if}}{2\tau} \quad (2.33)$$

A fórmula geral seria então:

$$R_{\text{total}} = \frac{v_f \sigma_f^2 d}{24\tau} + \frac{v_f \sigma_f^3 d}{6E_f \tau} + v_m R_m + v_f \frac{L_c}{d} R_{if} \quad (2.34)$$

onde, a tenacidade devido ao arrancamento das fibras, R_{po} corresponde à primeira parcela da equação 2.34 e a tenacidade devido a redistribuição das tensões, à segunda.

- **Mai (1979)**

Mai utilizou a mesma metodologia para o cálculo da tenacidade daquela usada por Marston, ou seja, a tenacidade total do compósito é aquela proveniente das contribuições das diferentes tenacidades: formação de novas superfícies, redistribuição de tensões e arrancamento de fibras.

Mai sugeriu que a parcela de distribuição de tensões, R_{re} pode ser desprezada para compósitos cujo comprimento das fibras seja inferior ao comprimento crítico. Desta forma a única parcela da equação seria a tenacidade correspondente ao arrancamento das fibras, R_{po} :

$$R_{po} = \frac{\eta v_f L^2 \tau}{6d} \quad (2.35)$$

A parcela resultante da formação de novas superfícies é dada pela equação 2.36:

$$R_s = v_m R_m + (\eta v_f) \frac{4\bar{L}R_{if}}{d} \quad (2.36)$$

onde,

\bar{L} é o comprimento médio de arrancamento das fibras e foi definido como sendo igual a $L/4$.

R_{if} = tenacidade resultante da interface fibra-matriz.

d = diâmetro da fibra

η = fator de eficiência.

Mai também sugere uma simplificação de R_{if} por R_m quando não se tiver dados para calcular o primeiro. Com as simplificações sugeridas por Mai a equação 2.36 fica da seguinte forma:

$$R_s = v_m R_m + (\eta v_f) \frac{LR_m}{d} \quad (2.37)$$

E a equação para o cálculo da tenacidade total:

$$R_{\text{total}} = \frac{\eta v_f L^2 \tau}{6d} + \left[v_m + \eta \frac{v_f L}{d} \right] R_m \quad (2.38)$$

- **Mai, Foote e Cotterell (1980):**

Em seu trabalho Mai et al. (1980) sugeriram uma equação para o cálculo da tenacidade em compósitos híbridos (asbesto + fibra celulósica). Estes compósitos possuíam suas fibras dispostas aleatoriamente e falharam por arrancamento. A equação proposta é a seguinte:

$$R = \frac{\eta}{6} \left[v_a \left(\frac{L_a^2}{d_a} \right) \tau_a + v_c \left(\frac{L_c^2}{d_c} \right) \tau_c \right] + \left[(1 - v_o)(1 - v_a - v_c) + \eta v_a \left(\frac{L_a}{d_a} \right) + \eta v_c \left(\frac{L_c}{d_c} \right) \right] R_m \quad (2.39)$$

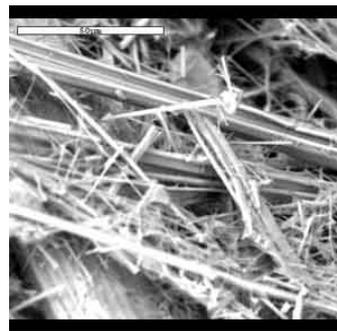
onde, os subscritos o, a, c denotam vazios, fibras de asbesto e fibras de celulose respectivamente.

2.10. O cimento amianto

Asbesto ou amianto é o nome geral que se dá a diversos tipos de silicatos minerais fibrosos cristalinos os quais possuem propriedades físicas e químicas únicas (Hannant, 1978; Coutts, 1988). Os nomes latino e grego, respectivamente, amianto e asbesto, têm relação com suas principais características físico-químicas, incorruptível e incombustível. Os dois grupos principais são as serpentinas e os anfibólios. De longe o mineral mais abundante é a crisolita ($3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou asbesto branco, sendo este o principal componente do grupo das serpentinas. A crisolita constitui mais de 90 % das reservas mundiais de amianto e é usada em larga escala na produção do cimento amianto (Hannant, 1978). De acordo com Coutts (1992) 3 tipos de amianto são usados significativamente na indústria do cimento amianto. São estes a crisolita (asbesto branco) visto na figura 2.9, a amosita (asbesto cinza-marrom) e a crocidolita (asbesto azul).



(a)



(b)

Figura 2.9 – Crisolita em seu estado bruto (a) e vista ao microscópio (b).

A crisolita apresenta uma resistência química a meios alcalinos fortes, refletindo assim na durabilidade observada nos produtos de cimento amianto. Entretanto, as fibras são susceptíveis a perdas de resistência quando submetidas a elevadas temperaturas e acima de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ sua resistência decai bastante (Hannant, 1978). O tipo de fibra mais forte do grupo dos anfibólios é a crocidolita ou asbesto azul ($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{FeO}\cdot 8\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$). A crocidolita é considerada como a mais perigosa forma do asbesto no ponto de vista de risco à saúde. Outras formas de asbesto pertencentes ao grupo dos anfibólios são a amosita, a antofilita, a tremolita e a actinolita.

Desde 1900 o tipo mais importante de composto cimentício produzido comercialmente tem sido o cimento amianto. A proporção em relação a massa de

fibras de amianto é normalmente entre 9 a 12 % para placas corrugadas, 11 a 14 % para tubos de pressão e o aglomerante utilizado normalmente é o cimento Portland (Hannant, 1978). O sucesso do cimento amianto pode ser explicado pela compatibilidade entre as fibras e a matriz cimentícia. Isto é devido ao alto módulo de elasticidade e resistência das fibras e a sua afinidade com o cimento Portland, o que permite uma dispersão efetiva em porcentagens relativamente altas de fibras (10% ou mais) e garante boa aderência fibra-matriz no compósito endurecido (Bentur et al., 1990). Algumas propriedades mecânicas e físicas dos tipos de asbesto e do seu compósito podem ser verificadas na tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Propriedades mecânicas e físicas do amianto.

Autores	Tipo	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (kg/m ³)	Comp. (mm)
Studinka (1989)	Pasta de Cimento pura	7-8	5-6	15	-	-
	Cimento Amianto	30-40	17-20	28-35	-	-
	Crisolita	-	3600	150	-	-
Sinha (1975)	Crisolita	-	300-1250	-	2500	22,2
Rilem 19FRc (1982)	Crisolita	-	3100	164	2550	-
	Crocidolita	-	3500	196	3370	-
Beaudoin (1990)	Crisolita	-	3100	164	-	-
	Crocidolita	-	3500	190	-	-

No quadro 2.1 é feita uma comparação entre as características do amianto e das fibras vegetais.

Quadro 2.1 – Principais diferenças entre amianto e fibras vegetais.

Amianto	Fibras vegetais
Não combustível	Combustível
Apresenta risco à saúde	Não apresenta risco à saúde
Melhor dispersão das fibras	Pior dispersão das fibras
Alto custo	Baixo custo
Maior consumo de energia	Menor consumo de energia

2.10.1.

Resistência ao impacto

A resistência ao impacto do cimento amianto é notoriamente baixa e isso pode ser explicado em parte pela rigidez do material na zona de pós-fissuramento da matriz. Outro fator que contribui é que as fibras curtas possuem pouca capacidade de absorver energia através do arrancamento. De acordo com Agopyan (1983) a resistência ao impacto do cimento amianto é de 2 kJ/m². Entretanto este trabalho não relata o tipo de ensaio nem a geometria do corpo de prova. Krenchel (1964), em seu trabalho, obteve para o ensaio de impacto Charpy com velocidade de 3,4 m/s e geometria de 30 x 70 mm o valor de 2,71 kJ/m².

2.10.2.

Tecnologia de produção

O cimento amianto foi inventado por L. Hatschek, um austríaco que em 1900 patenteou o processo de fabricação do cimento amianto sob o título de “Verfahren zur Herstellung von Kunststeinplatten aus Faserstoffen und Hydraulischen Bindemitteln” (Processo de manufatura para folhas de “pedras sintéticas” e agentes de ligação hidráulica) (Studinka, 1989). As técnicas de manufatura do processo Hatschek permanecem basicamente as mesmas até hoje sendo bem parecidas com a produção de papel pesado (Coutts,1988). No processo Hatschek uma solução aquosa de asbesto e cimento, na proporção de 7 a 10 % de sólidos, é colocada em um tanque contendo cilindros rotativos. Os cilindros retêm a matéria sólida, removendo um pouco da água. Uma banda

rotativa movimenta-se sobre a superfície dos cilindros retendo uma fina camada da mistura de cada cilindro como pode ser visto na figura 2.10.

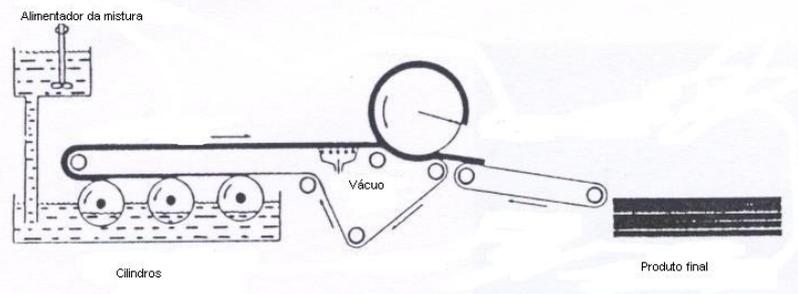


Figura 2.10 – Esquema de produção através do processo Hatschek.(Coutts, 1992).

A mistura então é movimentada sobre uma região onde é aplicado vácuo o qual remove a maior parte da água ainda restante. A fórmula passa sob um cilindro várias vezes até que um produto de espessura desejada seja obtido. O material é depois comprimido por rolos de pressão.

Outros Processos de fabricação:

a) Processo Mazza

Este processo é utilizado para a fabricação de tubos de pressão feitos de cimento amianto sendo uma modificação do processo Hatschek.

b) Processo Magnani

Neste processo a taxa sólidos/água está próxima a 0,5 e a mistura é aquecida e bombeada em um cinto onde a mesma é prensada e nivelada por rolamentos. Tanto os cintos quanto os rolamentos podem ser feitos de forma a se poder fabricar tanto folhas corrugadas quanto lisas.

c) Processo de extrusão de Manville

As fibras de asbesto, o cimento, a sílica fina e plastificantes como o óxido de polietileno são inseridas em um misturador com água suficiente apenas para produzir uma mistura rígida. A mistura é então forçada através de uma prensa de aço com aquecimento, para produzir seções extrudadas de perfil desejado.

2.10.3. Riscos à saúde

As fibras constituintes do mineral asbesto são muito finas e podem facilmente ficar em suspensão no ar. Sob essas circunstâncias, a forma física e a inércia química destas fibras combinam-se para criar um grande problema à saúde dos trabalhadores de indústrias que manuseiam tal mineral ou outros expostos de forma similar.

De acordo com a ABREA as seguintes doenças podem ser causadas por exposição prolongada ao asbesto (ABREA, 2004):

- Asbestose: endurecimento lento do pulmão o qual causa a falta de ar progressiva, cansaço, emagrecimento, dores nas pernas e costas. Não tem cura e progride mesmo que nunca mais se exponha à poeira do amianto. O tratamento empregado é para diminuir os sintomas da falta de ar. Em geral os sintomas levam de 15 a 25 anos para se manifestar, porém pode ocorrer antes, caso se tenha tido uma exposição a grandes quantidades de poeira.
- Câncer de pulmão
- Mesotelioma de Pleura (tecido que reveste o pulmão) e Pleritônio (tecido que reveste a cavidade abdominal): tumor maligno que mata em até dois anos após confirmado o diagnóstico. O mesotelioma é uma doença que pode apresentar-se até 35 anos após a contaminação.
- Doenças Pleurais (placas, derrames, espessamentos, distúrbios ventilatórios): embora alguns médicos digam que sejam benignas, elas trazem uma série de incômodos como falta de ar e cansaço. Ninguém nasce com essa doença, esta é adquirida no trabalho e pelas condições que o trabalho se desenvolve. As empresas em geral, recusam vagas para trabalhadores portadores dessas doenças alegando que não estão aptos para o trabalho.

- Cânceres de Faringe e do aparelho digestivo: já existem muitas evidências de que estas doenças se manifestam em quem esteve exposto ao amianto.

Hoje em dia a produção e o processamento de produtos a base de amianto estão sujeitos a medidas e controles de segurança bastante rígidos sendo sua proibição já sancionada em diversos países, principalmente nos mais desenvolvidos. O tempo médio de incubação de doenças causadas pelo asbesto está entre 10 e 40 anos. Devido a este fato é possível que a longo prazo um grande número de doenças relacionadas ao asbesto se desenvolva. É interessante notar que o risco de se desenvolver câncer de pulmão para fumantes expostos ao asbesto é muito maior em comparação a não fumantes (Studinka, 1989).

Na literatura médica, vários artigos sobre doenças causadas pela exposição ao asbesto podem ser encontrados (Acheson et al., 1984; Albin et al., 1990; Berry et al., 1985; Hodgson et al., 2000; Smith et al., 1996). Por uma análise destes artigos pode-se concluir que realmente a exposição ao asbesto é prejudicial à saúde causando as doenças enumeradas acima. Entretanto existem divergências sobre a potencialidade de risco de cada tipo de asbesto. Sendo que, de acordo com Hodgson et al. (2000) a crisolita em seu estado puro (sem tremolita) pode apresentar nenhum risco ou baixo risco ao câncer. Entretanto de acordo com Smith e Wright (1996) não existem diferenças entre os diferentes tipos de asbesto no que diz respeito aos riscos à saúde.

Motivado pela divergência na comunidade científica da área tecnológica sobre o risco da exposição ao asbesto e a título de curiosidade é apresentado no quadro 2.2 o risco quantitativo gerado pela exposição ao asbesto. Estes riscos estão relacionados a duas doenças, Mesotelioma e câncer de pulmão e foram extraídos do trabalho de Hodgson et al. (2000).

Quadro 2.2 – Sumários de riscos quantitativos relativo a exposição ao asbesto para diferentes níveis de exposição.

Fibras	Mesotelioma	Câncer de pulmão
Exposição acumulada entre 10 e 100 f/ml.yr		
Crocidolita	400 mortes por 100.000 expostos.	100 a 150 mortes por 100.000 expostos
Amosita	65 mortes por 100.000 expostos.	-
Crisolita	2 mortes por 100.000 expostos.	5 mortes por 100.000 expostos.
Exposição acumulada de 1 f/ml.yr		
Crocidolita	650 mortes por 100.000 expostos.	85 mortes por 100.000 exposições.
Amosita	90 mortes por 100.000 expostos.	-
Crisolita	5 mortes por 100.000 expostos.	2 mortes por 100.000 exposições.
Exposição acumulada de 0,1 f/ml.yr		
Crocidolita	100 mortes por 100.000 exposições.	4 mortes por 100.000 exposições.
Amosita	15 mortes por 100.000 exposições.	-
Crisolita	Risco provavelmente insignificante. Estimativa mais elevada de 4 mortes por 100.000 exposições.	Provavelmente não significativa. Porém é argumentado que uma estimativa de 10 mortes por 100.000 exposições possa ser justificável.

Onde: f = fibra, ml = 1/28316,8 pés cúbicos e yr = ano.