

2 MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS VEGETAIS

Autor: ROMILDO DIAS TOLÊDO FILHO

I - INTRODUÇÃO

Reforçar matrizes frágeis para aumentar a sua capacidade de absorver energia é uma prática que tem sido usada desde os princípios da nossa civilização. Há cerca de 3500 anos, já se usava palha ou capim para reforçar tijolos de barro secos ao sol conhecidos como adobe [Cook, 1980; Bentur e Mindess, 1990]. No entanto, apenas nos últimos vinte e cinco anos os princípios relativos ao uso de fibras como reforço de matrizes frágeis começou a ser compreendido. Inicialmente sugeriu-se que a deformação de primeira fissura de matrizes frágeis (tais como pasta de cimento, argamassa ou concreto) poderia ser significativamente aumentada usando-se fibras discretas adequadamente espaçadas. Infelizmente, estudos experimentais mostraram que a tensão na qual as matrizes fissurariam poderia ser ligeiramente aumentadas se fibras de alto módulo de elasticidade fossem usadas como reforço mas que, em geral, as deformações de fissuração permaneciam inalteradas. Entretanto, os resultados mostraram uma considerável modificação no comportamento do material após o surgimento da primeira fissura: as fibras interligavam as fissuras resultando em um aumento na tenacidade pós-fissuração do material. Portanto, embora a deformação de fissuração não aumente devido à presença das fibras, a deformação trativa de ruptura aumenta, resultando em um material com alta tenacidade e resistência ao impacto. Desde então, uma grande variedade de fibras tem sido utilizadas como reforço de matrizes à base de cimento, incluindo fibras metálicas, poliméricas, minerais e naturais.

O objetivo do presente capítulo é sumarizar pesquisas recentes usando fibras naturais de origem vegetal como reforço de matrizes à base de cimento. Os tópicos apresentados incluem: (a) classificação e propriedades das fibras naturais; (b) tecnologia de produção dos compósitos; (c) propriedades das misturas no estado fresco; (d) propriedades dos compósitos endurecidos e (e) propriedades de longa duração.

II - CLASSIFICAÇÃO, MICRO-ESTRUTURA E PROPRIEDADES DAS FIBRAS NATURAIS VEGETAIS

II.1 - Classificação

Com base em sua morfologia, as fibras vegetais podem ser classificadas em quatro classes: fibras oriundas das folhas, do talo, do lenho e da superfície [Cook, 1980]. A Figura 2.1 mostra, esquematicamente, as principais fibras de cada classe.

Fibras das folhas - as fibras obtidas das folhas têm origem nas plantas monocotiledôneas. As fibras ocorrem em feixes com extremidades sobrepostas de tal forma que produzem filamentos contínuos através do comprimento da folha. Elas são ligadas umas às outras por lignina e sua função é conferir resistência à folha e dar suporte aos vasos de condução de água do vegetal. As principais fibras oriundas das folhas são: sisal (*Agave sisalana*), henequem (*Agave fourcroydes*), abacá (*Musa textilis*), palma (*Samuela carnerosana*), fique (*Furcrea macriphyla*), phormium (*Phormium tenax*), cantala (*Agave cantala*), canton (*Canton*), sansevieria (*Sansevieria*), caroá (*Caroa*), pita floja (*Aechme Mogdalene*) e fibra de banana (*Musa sapientum*). Apresenta-se a seguir uma sumária descrição do cultivo do sisal.

. **sisal** - a fibra foliar mais usada é a de sisal, cuja planta é cultivada, principalmente, na Tanzânia, no Brasil, no Haiti e na Indonésia. O sisal é uma planta tropical quase acaulescente, possuindo folhas rígidas, lisas, verde-brilhantes, com cerca de 100 mm de largura e 1500 mm de comprimento. As folhas rendem, no desfibramento, de 2% a 5,5% de fibras secas (em relação ao seu peso verde). Dentre as principais aplicações do sisal destacam-se a manufatura de cordoalha em geral, fabricação de barbantes, produção de estofamentos, tapetes, produtos artesanais, etc. Sua resistência e módulo de elasticidade são relativamente elevados, sugerindo seu uso como elemento de reforço.

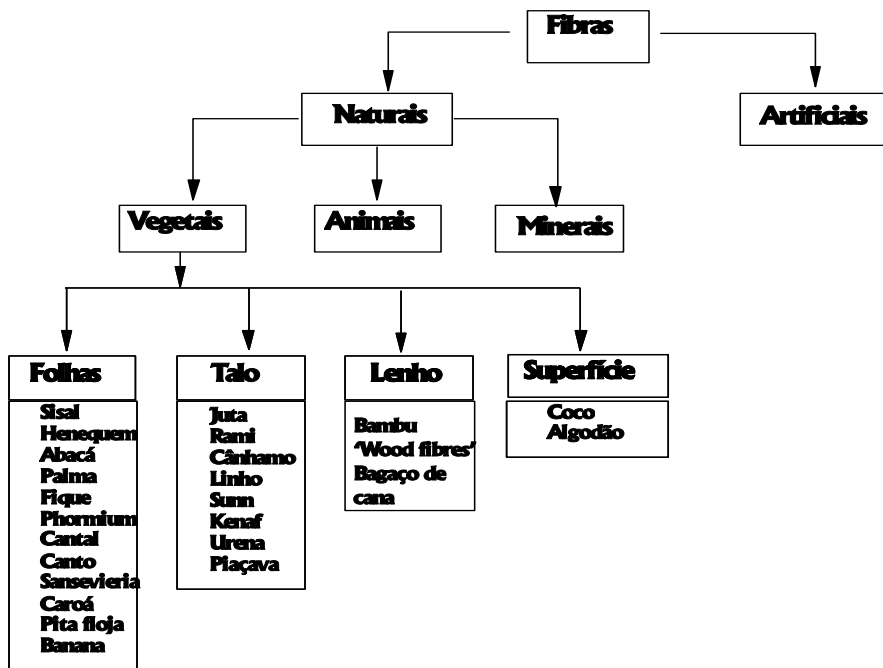


FIGURA 2.1 - Classificação das fibras naturais vegetais (após Cook, 1980).

Fibras do talo ou tronco - as fibras obtidas do tronco têm 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 dissolvam o material que envolve as fibras. O processo é seguido por secagem das fibras. As fibras oriundas do talo são usadas essencialmente na indústria têxtil e as principais são a juta (*Chorchorus*), rami (*Boehmeria nivea* ou *Boehmeria tenacisema*), cânhamo (*Cannabis sativa*), linho (*linum usitatissimum*), sunn (*Crotalaria juncea*), kenaf (*Hibiscus cannabinus*), urena (*Urena lobata*) e piaçava (*Attalea funifera*). Dentre as fibras oriundas do talo, as mais comuns no Brasil são:

. **juta** - segunda fibra têxtil mais cultivada do mundo, perdendo apenas para o algodão. Ela é cultivada principalmente no Paquistão, na Índia, e na China. No Brasil, esta fibra é encontrada nos estados da região norte. Sua resistência e módulo de elasticidade são relativamente elevados, permitindo seu uso como reforço. Sua principal utilização é na produção de sacos, barbantes, esteiras, papel de parede e produtos similares.

. **malva** - esta fibra cresce nas regiões de clima tropical e subtropical do mundo. Ela tem boa resistência e pode ser utilizada como reforço. Seu uso principal se dá na produção de linha.

. **piaçava** - de origem brasileira, desenvolve-se principalmente no estado da Bahia. É uma fibra dura, resistente e de grande durabilidade. Seu uso se dá na produção de cordas para embarcações, cestos, vassouras, escovas e coberturas.

Fibras do lenho ou de madeiras - as fibras obtidas do lenho são relativamente curtas, grossas e inflexíveis. Pedaçoes de madeiras são processadas em várias soluções e sujeitas a tratamentos mecânicos para extrair fibras de celulose (wood fibres) de boa qualidade na forma de polpa. No caso de fibras de bambu e de cana-de-açúcar, o processamento dessas fibras envolve o esmagamento da planta com rolos projetados especificamente para esse fim. No caso das fibras da cana-de-açúcar, as mesmas devem passar por um tratamento de fervura para retirar o açúcar residual. As fibras de celulose (“wood fibres”) não serão objeto do presente estudo.

. **fibras de bambu** - as fibras de bambu são extraídas do colmo do bambu, com comprimento médio variando conforme a espécie. As fibras obtidas são curtas, grossas e de resistência elevada. O bambu é encontrado nas regiões tropicais e sub-tropicais do mundo.

. **fibras do bagaço-de-cana** - Cuba e Brasil são os principais produtores mundiais dessa planta. Essas fibras apresentam propriedades que permitem o seu uso como reforço.

Fibras da superfície - as fibras chamadas de superfície formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas. As fibras de coco e de algodão estão incluídas nesse grupo.

. **fibra de coco** - a fibra de coco é obtida da casca que envolve o fruto. Ela é utilizada, principalmente, na produção de capachos, escovas e produtos artesanais. Suas propriedades mecânicas permitem seu uso como elemento de reforço.

. **fibra de algodão** - a fibra de algodão é cara e de baixa resistência, não sendo provável o seu uso como reforço.

Microestrutura das fibras naturais vegetais

As fibras vegetais de origem vegetal podem diferir significativamente em sua aparência física mas elas possuem, entretanto, similaridades que as identificam como uma família. As características das fibras dependem das propriedades dos seus constituintes individuais, da estrutura fibrilar e da matriz lamelar. As fibras naturais são compostas de numerosas fibro-células alongadas fusiformes, que se adelgaçam de forma cônica na direção das extremidades. As fibro-células são unidas pelas lamelas médias as quais são constituídas de lignina, hemicelulose e pectina. No presente trabalho, descreve-se a microestrutura das fibras de coco e sisal com exemplo das fibras naturais.

De acordo com Gram [Gram, 1983] a fibra de sisal é constituída, em seção transversal, por cerca de 100 fibro-células. Kulkarni *et al* [Kulkarni *et al*, 1981] diz que o número de células na seção transversal de uma fibra de coco varia de 260 a 584 dependendo do diâmetro da fibra. As Figuras 2.2 e 2.3, partes (a) e (b), mostram imagens de microscopia eletrônica, nos modos “backscattered” e de varredura (“SEM”), da microestrutura das fibras de sisal e coco. Como pode ser visto, a seção transversal das fibras de sisal e coco não são nem circular nem uniforme em dimensões. O lúmen varia de tamanho mas é em geral bem definido.

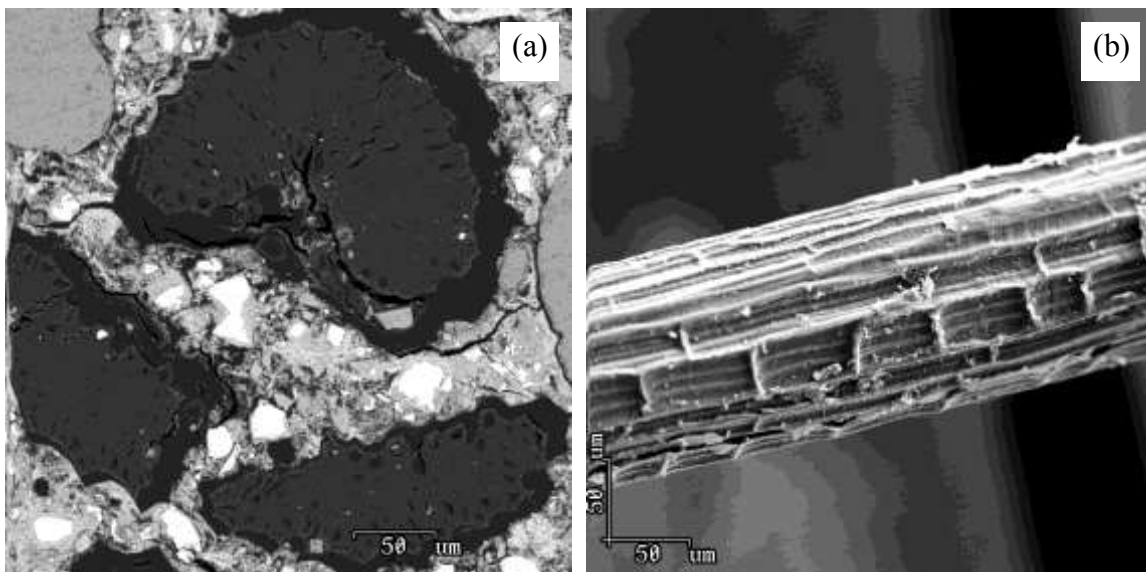


FIGURA 2.2 - (a) Seção transversal de fibras de sisal com o lúmen das fibro-células visível. (b) Superfície longitudinal da fibra de sisal (após Tolêdo Filho, 1997).

Fisicamente, cada fibro-célula é constituída de quatro partes: a parede primária, a parede secundária, a parede terciária e o lúmen. A Figura 2.4 ilustra, esquematicamente, a fibro-célula da fibra de sisal. As paredes das células são formadas de várias camadas de estrutura fibrilar compostas por fibrilas. Nas paredes primárias, as fibrilas têm uma estrutura reticulada. Na camada externa da parede secundária (S_1), as fibrilas são arranjadas em espirais com um ângulo espiral de 40° (para a fibra de sisal) em relação ao eixo da célula. As fibrilas da parede secundária interna (S_2) são arranjadas na forma de uma espiral mais íngreme, formando um ângulo de $18-25^\circ$. A parede terciária, mais interna e fina, tem estrutura fibrilar paralela ao eixo da célula e envolve o lúmen. As fibrilas são, por sua vez, contituídas de micro-fibrilas com uma espessura de cerca de 20 nm. As micro-fibrilas são compostas por cadeias moleculares de celulose com espessura de 0.7 nm e comprimento de poucos μm [Gram, 1983]. De acordo com Mukherjee e Satyanarayana [Mukherjee e Satyanarayana, 1986] o ângulo microfibrilar (ou ângulo espiral) das paredes secundárias das fibro-células das fibras de coco variam de $30-45^\circ$.

Quimicamente as fibras vegetais são constituídas de celulose, hemicelulose, lignina, pectina e uma pequena quantidade de substâncias graxas. A Tabela 2.1 apresenta a composição química e a morfologia das fibras de sisal e coco. Dinwoodie [Dinwoodie, 1981] sumariza o estado polimérico, os derivativos moleculares, e a função da celulose, hemicelulose, lignina e extrativos como mostrado na Tabela 2.2.

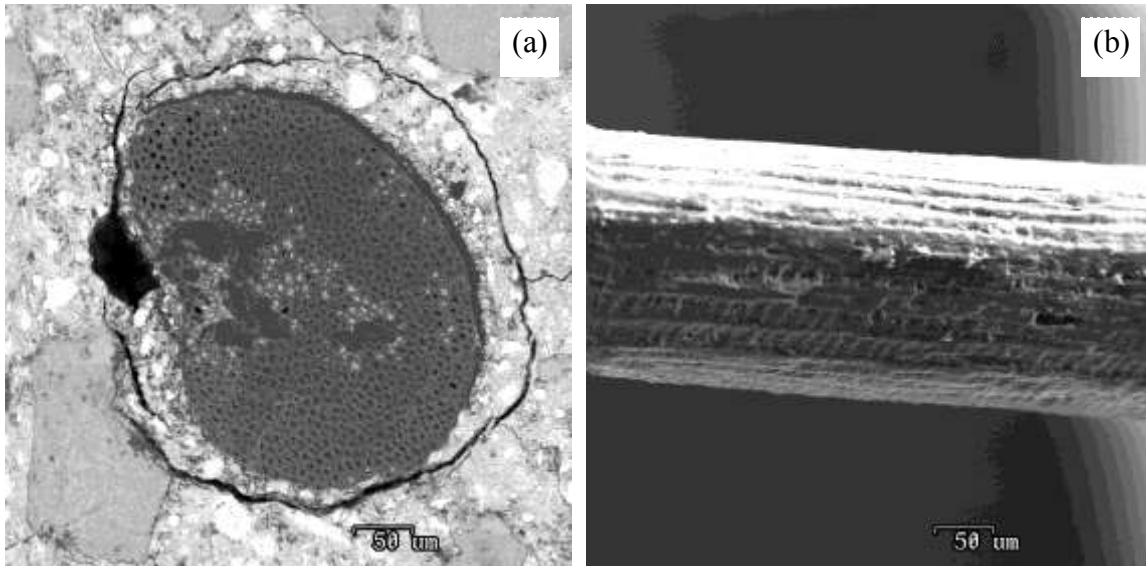


FIGURA 2.3 - (a) Seção transversal de uma fibra de coco com o lúmen das fibro-células visível (b) Superfície longitudinal da fibra de coco (após Tolêdo Filho, 1997).

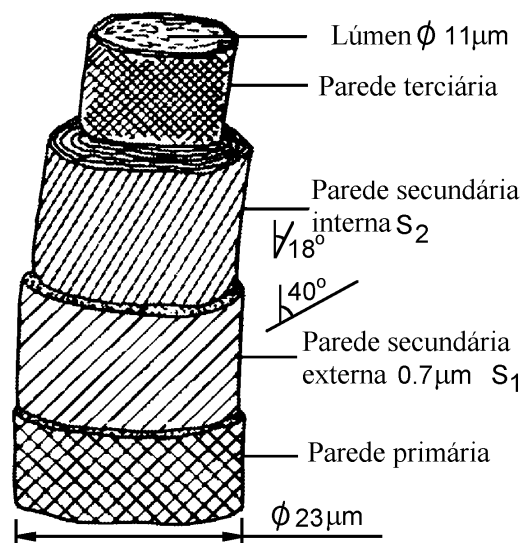


FIGURA 2.4 - Esquema de uma fibro-célula de sisal com dimensões aproximadas (após Gram, 1983).

TABELA 2.1 - Composição química e morfologia das fibras de sisal e coco (após Barkakaty, 1976; Mukherjee e Satyanarayna, 1984; e Gram, 1983)

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Graxas (%)	Ângulo espiral (θ)-(deg)	Comprimento da célula (mm)	Largura da célula (μm)	Espessura da parede (μm)
Sisal	70	12	10	2.0	18-25 média=20	1 - 6 média=2.5	8 - 33 média=25	12.5
Coco	37.0	9	42	-	média=45	média=0.75	média=21	8.0

TABELA 2.2 - Celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, estado polimérico, derivativos moleculares e função (após Dinwoodie, 1981)

	Estado polimérico	Molecular derivatives	Function
Celulose	Molécula cristalina	Glicose	“Fibra”
Hemicelulose	Molécula semi-cristalina	Galactose, Mannose, Xilose	“Matriz”
Lignina	Molécula amorfa	Fenilpropano	“Matriz”
Extrativos	Alguns são poliméricos, outros não.	e.g. Polifenol	“Estranhos”

Para uma melhor compreensão das propriedades mecânicas e durabilidade das fibras, os componentes estruturais das fibras - celulose, hemicelulose e lignina - serão examinados a seguir.

Celulose

Celulose é um polímero derivado da glicose: β-D-glicopiranosose. Glicose é apenas um de um número de monossacarídeos tendo a mesma composição química, C₆H₁₂O₆. Sua estrutura pode ser representada esquematicamente pela fórmula geral [Walker, 1993]:



Por convenção, os átomos de carbono são numerados como acima para fácil identificação. A Figura 2.5 mostra a estrutura da molécula β-D-glicose.

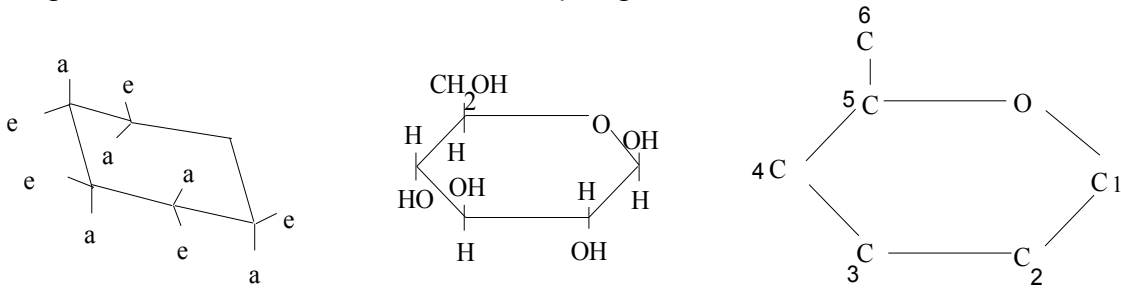


FIGURA 2.5 - Unidade β-D-glicose [após Walker, 1993]

Celulose é um polímero natural formado por milhares de unidades de β-D-glicose ligadas entre si por uniões glicosídicas (C-O-C) nas posições C₁ e C₄ (Figura 2.6a). Cada unidade é rotacionada de 180° com relação às suas vizinhas, de tal forma que a estrutura se repete a cada duas unidades. O par de unidades é chamado de celobiose e considerando-se que a celulose é formada repetindo-se unidades de celobiose, pode-se dizer que ela é, tecnicamente, um polímero de celobiose ao invés de um polímero de β-D-glicose. A celulose contém 10⁴ unidades na cadeia polimérica, e possui um comprimento de cerca de 5 μm [Walker, 1993]. De acordo com Gram [Gram, 1983] o grau de polimerização da fibra de sisal é de cerca de 25000. Nessa área cristalina da fibra, penetração de outras moléculas, tais como aquelas de água ou de outros produtos químicos, é difícil e ela apresenta boa resistência aos álcalis .

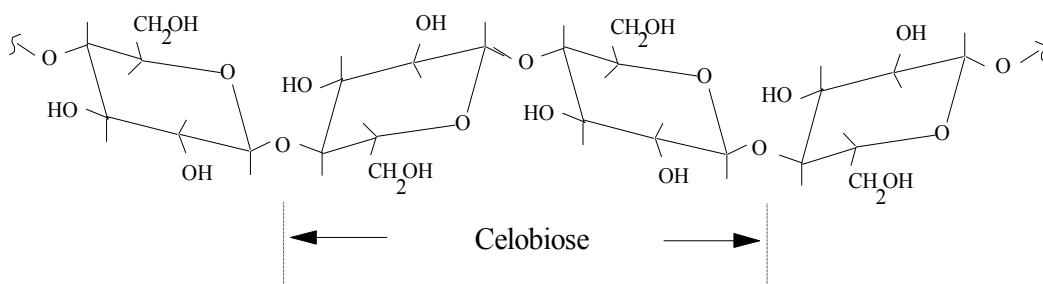


FIGURA 2.6a

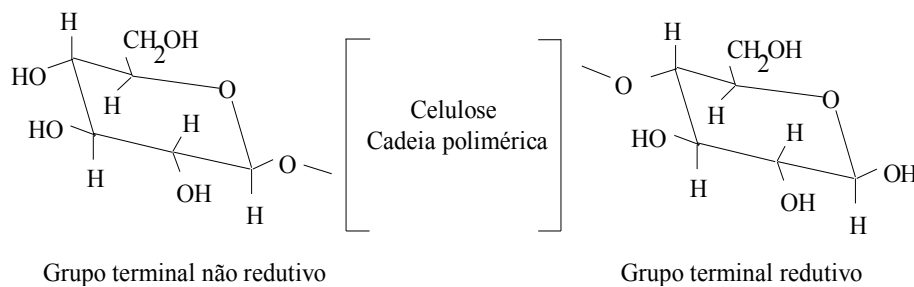


FIGURA 2.6b

FIGURA 2.6 - Estrutura da celulose.

Hemicelulose

A hemicelulose é também um polímero de açúcares (tais como galactose e manose) raramente, ou nunca, cristalino [Walker, 1993]. Ela apresenta baixo grau de polimerização e são solúveis em álcalis. De acordo com Gram [Gram, 1983] a hemicelulose está presente principalmente na parede primária e seu grau de polimerização para a fibra de sisal varia de 50 a 200.

Lignina

A lignina é uma substância aromática cuja estrutura ainda não foi completamente demonstrada [Walker, 1993]. De acordo com Gram [Gram, 1983] e Velpari *et al* [Velpari *et al*, 1980] a lignina pode ser dissolvida ou lixiviada em meios alcalinos. Cerca de 25% do total de lignina está localizada nas lamelas intermediárias. Considerando-se que as lamelas intermediárias são muito finas, a concentração de lignina é conseqüentemente alta (cerca de 70%).

Relação entre microestrutura e propriedades mecânicas

Equações de regressão correlacionando os parâmetros estruturais e as propriedades mecânicas (tensão e deformação de ruptura) das fibras naturais vegetais foram determinadas por Mukherjee e Satyanarayana [Mukherjee e Satyanarayana, 1986]. Eles consideraram quinze tipos de fibras oriundas das folhas, do talo e da superfície das plantas. Parâmetros tais como forma e arranjo das fibro-células foram inicialmente considerados além dos três principais parâmetros estruturais: teor de celulose (X_c), ângulo microfibrilar (θ) e dimensões das fibro-células (comprimento - $l_{células}$, diâmetro - $d_{células}$) para cada tipo de fibra com o objetivo de obter as equações de regressão. Uma vez que a forma e o arranjo da células não mostraram significantes variações nas propriedades, as análises seguintes foram executadas usando apenas os parâmetros estruturais. Dos estudos de regressão a análise final demonstrou que uma única equação poderia ser usada para todos os tipos de fibra. As duas equações de regressão mais importantes para a tensão e deformação de ruptura foram:

$$\sigma_{fu} = 1050.1 X_c \cos^2\theta - 97.5 \quad (\text{MPa}) \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\epsilon_{fu} = 11.60[\tan\theta / X_c (l_{célula}/d_{célula})^{1/4}] + 1.92 \quad (\%) \dots\dots\dots (2.2)$$

Uma equação para o módulo de elasticidade foi obtida por Mcaughlin e Tait [Mcaughlin e Tait, 1980] usando a regra das misturas como base:

$$E_f = X_c E_{cel} \cos^2\theta + (1-X_c)E_{nc} \quad (\text{GPa}) \dots\dots\dots (2.3)$$

onde, E_{cel} e E_{nc} são o módulo de elasticidade das regiões cristalinas e não-cristalinas assumidas como sendo, respectivamente, 45 GPa e 3 GPa para as fibras de origem vegetais. Mcaughlin e Tait também derivaram uma equação de regressão entre módulo de elasticidade e tensão de ruptura:

$$\sigma_f = 17.48 \times 10^{-9} E_f + 128.3 \quad (\text{MN/mm}^2) \dots\dots\dots (2.4)$$

II.3 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais vegetais

Nesta seção serão apresentadas as propriedades físicas e mecânicas das seguintes fibras naturais vegetais: sisal, coco, juta, piaçava, bambu, bagaço-de-cana e linho. Uma larga faixa de valores será observada, uma vez que tais propriedades dependem da idade da planta, do local de cultivo, das condições climáticas e da microestrutura da fibra. Além disso, não existe uma metodologia estabelecida internacionalmente e que seja seguida por todos os pesquisadores. Nas tabelas seguintes, apresenta-se faixas de valores das seguintes propriedades: diâmetro, comprimento, peso específico, teor de umidade natural, absorção de água, resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação de ruptura das fibras. A propriedade comprimento das fibras vegetais indica, na verdade, o tamanho máximo de fibra que se pode obter a partir de cada espécie. As tabelas mostram também o local de origem da fibra e o primeiro autor da publicação.

- **diâmetro**

TABELA 2.3 - Diâmetro das fibras de sisal, coco, juta, piaçava, bambu, bagaço-de-cana e linho.

Diâmetro (mm)							
	Sisal	Coco	Juta	Piaçava	Bambu	Bagaço-de-cana	Linho
Origem: Brasil Ref.: Agopyan, 1990	0,2-0,3	0,2-0,4	-	-	-	-	-
Origem: Ásia Ref.: Aziz, 1987	-	0,1-0,4	0,1-0,2	-	-	-	-

TABELA 2.3 - continuação

Origem: Ref.: Cook, 1984	-	0,24	-	-	-	-	-
Origem: Ref.: Chand, 1988	0,05-0,3	0,1-0,4	0,4	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: Ghavami, 1985	-	0,2-0,6	-	-	-	-	-
Origem: Índia Ref.: Jindal, 1986	-	-	-	-	0,35	-	-
Origem: Índia Ref.: Mukherjee, 1986	0,1-0,3	0,1-0,4	-	-	-	-	-
Origem: Ref.: Nilsson, 1975	0,3-0,5	-	-	-	-	-	-
Origem: Ref.: Racines, 1978	-	-	-	-	-	0,2-0,4	-
Origem: Índia Ref.: Paramasivam, 1984	-	0,3	-	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: Tolêdo Filho, 1990	0,08-0,3	0,1-0,5		0,15-1,0			

- **comprimento**

TABELA 2.4 - Comprimento das fibras de sisal, coco, juta, piaçava, bambu, bagaço-de-cana e linho.

Comprimento (cm)							
	Sisal	Coco	Juta	Piaçava	Bambu	Bagaço-de-cana	Linho
Origem: Brasil Ref.: Agopyan, 1990	-	10-20	-	-	-	-	-
Origem: Ásia Ref.: Aziz, 1987	-	5-35	18-80	-	-	-	-
Origem: Ref.: Cook, 1984	-	10-20	-	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: Ghavami, 1985	-	5-20	-	-	-	-	-
Origem: Índia Ref.: Jindal, 1986	-	-	-	-	22-27	-	-
Origem: Ref.: Racines, 1978	-	-	-	-	-	5-30	-
Origem: Brasil Ref.: Tolêdo Filho, 1990	38-94	6-23	-	17-218	-	-	-

- **peso específico**

TABELA 2.5 - Peso específico das fibras de sisal, coco, juta, piaçava, bambu, bagaço-de-cana e linho.

Peso específico (kN/m ³)							
	Sisal	Coco	Juta	Piaçava	Bambu	Bagaço-de-cana	Linho
Origem: Brasil Ref.: Agopyan, 1990	12-13	9-11	-	-	-	-	-
Origem: Ásia Ref.: Aziz, 1987	-	11-12	10	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: CEPED, 1982	12,7	10,8	-	10,5	-	-	-
Origem: Ref.: Cook, 1984	-	14	-	-	-	-	-
Origem: Ref.: Chand, 1988	14,5	11,5	-	-	-	-	-
Origem: Índia Ref.: Mukherjee, 1986	14,5	11,5	-	-	-	-	-
Origem: Índia Ref.: Paramasivam, 1984	-	11,4	-	-	-	-	-
Origem: Brasil							

Ref.: Tolêdo Filho, 1990	7,5-11	6,7-10		8,0-11	-	-	-
--------------------------	--------	--------	--	--------	---	---	---

- **absorção de água**

TABELA 2.6 - Absorção de água das fibras de sisal, coco, juta, piaçava, bambu, bagaço-de-cana e linho.

Absorção de água (%)							
	Sisal	Coco	Juta	Piaçava	Bambu	Bagaço-de-cana	Linho
Origem: Brasil Ref.: Agopyan, 1990	123-137	117-171	-	-	-	-	-
Origem: Ásia Ref.: Aziz, 1987	-	130-180	25-40	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: CEPED, 1982	240	127	-	-	-	-	-
Origem: Ref.: Cook, 1984	-	67	-	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: Dantas, 1987			214.1	34-108	-	-	-
Origem: Ref.: Racines, 1978	-	-	-	-	-	70-75	-
Origem: Brasil Ref.: Tolêdo Filho, 1990	190-250	85-135	-	38	-	-	-

- **resistência à tração**

TABELA 2.7 - Resistência à tração das fibras de sisal, coco, juta, piaçava, bambu, bagaço-de-cana e linho.

Resistência à tração (MPa)							
	Sisal	Coco	Juta	Piaçava	Bambu	Bagaço-de-cana	Linho
Origem: Brasil Ref.: Agopyan, 1990	374-378	95-118	-	-	-	-	-
Origem: Ásia Ref.: Aziz, 1987	-	120-200	250-350	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: CEPED, 1982	458	180	-	143	575	-	-
Origem: Ref.: Cook, 1984	-	60	-	-	-	-	-
Origem: Nova Zelândia Ref.: Coutts, 1983	-	-	-	-	-	-	1000
Origem: Ref.: Chand, 1988	530-640	131-175	240	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: D'Almeida, 1987	-	-	270	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: Ghavami, 1985	-	105-198	-	-	-	-	-
Origem: Índia							

Ref.: Jindal, 1986	-	-	-	-	270	-	-
Origem: Índia Ref.: Mukherjee, 1986	530-630	106-175	550	-	-	-	-
Origem: Ref.: Pakotiprapha, 1983	-	-	-	-	442	-	-
Origem: Ref.: Nilsson, 1975	620	-	-	-	-	-	-
Origem: Ref.: Racines, 1978	-	-	-	-	-	170-290	-
Origem: Índia Ref.: Paramasivam, 1984	-	70	-	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: Tolêdo Filho, 1990	227-1002	108-174		50-90			

- **deformação na ruptura**

TABELA 2.8 - Deformação na ruptura das fibras de sisal, coco, juta, piaçava, bambu, bagaço-de-cana e linho.

Deformação na ruptura (%)							
	Sisal	Coco	Juta	Piaçava	Bambu	Bagaço-de-cana	Linho
Origem: Brasil Ref.: Agopyan, 1990	5-5,5	24-51	-	-	-	-	-
Origem: Ásia Ref.: Aziz, 1987	-	10-25	2-3	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: CEPED, 1982	4,2	29	-	6	3,2	-	-
Origem: Nova Zelândia Ref.: Coutts, 1983	-	-	-	-	-	-	1,8-2,2
Origem: Ref.: Chand, 1988	3-7	15-40	1,2	-	-	-	-

TABELA 2.8 - continuação

Origem: Brasil Ref.: D'Almeida, 1987	-	-	1,3	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: Ghavami, 1985	-	16	-	-	-	-	-
Origem: Índia Ref.: Mukherjee, 1986	4,3	15	1,5	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: Tolêdo Filho, 1990	2,1-4,2	13,7-41		4-6			

- **módulo de elasticidade**

TABELA 2.9 - Módulo de elasticidade das fibras de sisal, coco, juta, piaçava, bambu, bagaço-de-cana e linho.

Módulo de elasticidade (MPa)							
	Sisal	Coco	Juta	Piaçava	Bambu	Bagaço-de-cana	Linho
Origem: Ásia Ref.: Aziz, 1987	-		26-32	-	-	-	-
Origem: Brasil							

Ref.: CEPED, 1982	15,2	2,8	-	5,6	28,8	-	-
Origem: Ref.: Cook, 1984	-	2,0	-	-	-	-	-
Origem: Nova Zelândia Ref.: Coutts, 1983	-	-	-	-	-	-	100
Origem: Ref.: Chand, 1988	9-22	4-6	17,4	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: D'Almeida, 1987	-	-	21,8	-	-	-	-
Origem: Índia Ref.: Jindal, 1986	-	-	-	-	270	-	-
Origem: Índia Ref.: Mukherjee, 1986	17-22	3-6	-	-	-	-	-
Origem: Ref.: Pakotiprapha, 1983	-	-	-	-	37	-	-
Origem: Ref.: Racines, 1978	-	-	-	-	-	15-19	-
Origem: Índia Ref.: Paramasivam, 1984	-	2,0	-	-	-	-	-
Origem: Brasil Ref.: Tolêdo Filho, 1990	11-27	2,5-4,5	-	-	-	-	-

III - CONCRETO¹ REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS VEGETAIS

Produção tecnológica

Duas técnicas podem ser utilizadas para produzir materiais compósitos reforçados com fibras naturais: (i) reforçar a matriz à base de cimento com fibras curtas e descontínuas aleatoriamente distribuídas (ii) reforçar a matriz com fibras longas e orientadas. Na primeira técnica, as fibras descontínuas são misturadas com a matriz numa betoneira como se as mesmas fossem um constituinte extra no método usual de produzir concreto. Nessa técnica de mistura a fração volumétrica normalmente usada situa-se entre 1% e 5% para que se possa garantir uma trabalhabilidade adequada à mistura. Mais de 25 países usam essa técnica para produzir componentes de cobertura [Evans, 1986]. No segundo método, as fibras longas são alternadas manualmente nos moldes com camadas de argamassa (ou pasta de cimento). O volume de fibras pode superar 5% nesse método. Em ambas as técnicas, a mistura deve ser vibrada ou comprimida para produzir um material denso e com boa dispersão de fibras na matriz. Uma dispersão uniforme de fibras distribui as tensões e aumenta a resistência à fissuração e à cargas de impacto, além de aumentar a capacidade de absorver energia da matriz.

Propriedades no estado fresco

A trabalhabilidade do concreto fibroso deve ser determinada usando-se um método de ensaio baseado em condições dinâmicas uma vez que embora as fibras tornem a mistura rígida em condições estáticas ela responde bem à vibração. Portanto, o ensaio de consistência (“slump” test) deve ser evitado como medida de trabalhabilidade para materiais compósitos. O VB teste (proposto pela norma britânica BS 1881: Parte 104) e o método do tempo de fluxo através do cone invertido proposto pela ASTM (ASTM C995) que incorporam efeitos de vibração têm demonstrado serem métodos mais realistas para

¹ O termo “concreto” usado nesse capítulo inclui também pasta de cimento e argamassa.

medirem a trabalhabilidade dos concretos fibrosos [Bentur e Mindess, 1990; Balagaru e Shah, 1992].

Uma relação entre “VB time” e o índice de reforço ($V_f l/d$) é mostrado na Figura 2.7 para argamassas reforçadas com fibras de sisal e coco. V_f representa o volume de fibras, e l/d a relação de aspecto (comprimento/diâmetro) da fibra.

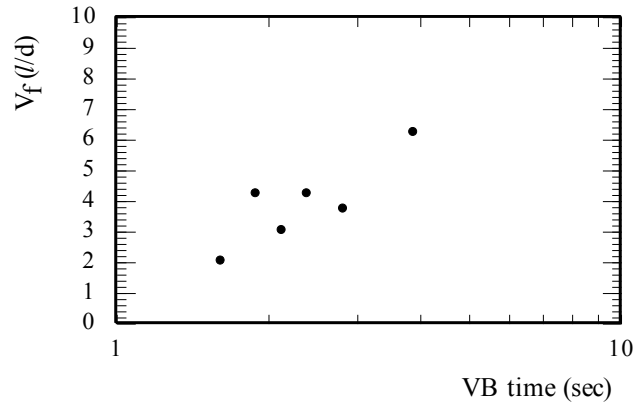


FIGURA 2.7 - Relação entre índice de reforço e log (VB time) para argamassas reforçadas com fibras de sisal e coco (após Tolêdo Filho, 1997).

Os resultados mostram que um acréscimo no índice de reforço decresce a trabalhabilidade da mistura. O decréscimo em trabalhabilidade é devido, principalmente, a alta capacidade de absorção de água das fibras naturais e a área superficial, tamanho e forma das fibras em relação aos outros constituintes da mistura. O uso de altos volumes de fibras naturais como reforço deve ser considerada com cautela. Se o volume de fibras for excessivo (acima de 5%), pode ocorrer a formação de “bolas de fibras” que não se separam facilmente durante a concretagem resultando em misturas com baixo trabalhabilidade e com alta porosidade. O tamanho de fibra também afeta as propriedades das misturas no estado fresco. Fibras muito longas adicionadas aleatoriamente às misturas reduzem a trabalhabilidade das mesmas.

Propriedades mecânicas

Resistência à compressão

A adição de fibras naturais ao concreto reduz sua resistência à compressão em cerca de 10% a 30% dependendo do tipo, comprimento e fração volumétrica de fibra, bem como do tipo e traço da matriz. O módulo de elasticidade da matriz é ligeiramente reduzido e o coeficiente de Poisson não apresenta variações significantes. Por outro lado, as fibras confinam o material e portanto retardam a propagação da primeira fissura, aumentando a tenacidade pós-carga de pico [Tolêdo Filho, 1997]. Esses fatos podem ser observados nas curvas tensão-deformação apresentadas na Figura 2.8.

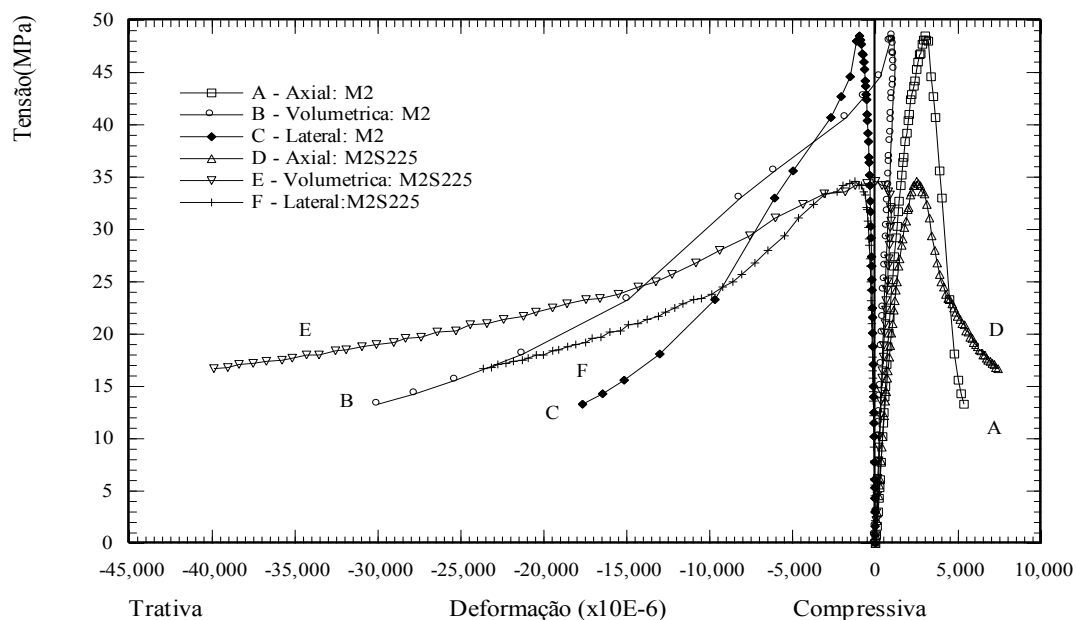


FIGURA 2.8 - Curva tensão-deformação em compressão para argamassa reforçada com fibras de sisal (após Tolêdo Filho, 1997).

A Tabela 2.10 mostra resultados de resistência à compressão (f'_c), módulo de elasticidade (E_c) e coeficiente de Poisson (ν) observados para pastas de cimento reforçadas com bagaço-de-cana [Racines e Pama, 1978], pastas e argamassas reforçadas com fibras de juta [Mansur e Aziz, 1982] e para argamassas reforçadas com fibras de coco e sisal [Tolêdo Filho, 1997].

TABELA 2.10 - Influência do tipo e comprimento de fibra, da fração volumétrica e do traço da matriz no comportamento em compressão de compósitos reforçadas com fibras naturais [após Racines e Pama, 1978; Mansur e Aziz, 1982; Tolêdo Filho, 1997].

Traço da matriz (cimento:areia:a/c)	Tipo de fibra	Volume de fibras (%)	Comprimento de fibra	f'_c (MPa)	E_c (GPa)	ν
1:0:0,25	Bagaço-de-cana	10	25	21,83	13,86	0,25
	“	20	25	12,26	9,99	0,26
	“	30	25	6,26	6,78	0,28
1:0:0,33	Juta	0	-	31,44	15,54	-
	“	1	25	35,69	14,37	-
	“	2	25	30,00	12,30	-
	“	3	25	37,44	12,84	-
	“	4	25	35,00	13,12	-

TABELA 2.10 - continuação

1:1:0,33	juta	0	-	38,42	14,80	-
	“	2	12	37,43	14,30	-
	“	2	18	32,44	14,30	-
	“	2	25	32,76	12,50	-
	“	2	38	27,97	8,50	-
1:2:0,33	juta	0	-	34,96	12,20	-
	“	2	12	27,97	10,00	-

	“	2	18	28,72	13,41	-
	“	2	25	32,46	14,22	-
	“	2	38	24,97	15,25	-
1:1:0,40	sisal	0	-	70,10	29,80	0,23
	“	2	25	51,30	28,00	0,23
	“	3	25	47,80	26,10	0,21
	“	3	15	47,30	24,80	0,23
	coco	2	25	57,20	29,40	0,23
	“	3	25	49,80	28,20	0,23
1:2:0,52	sisal	0	-	46,90	26,50	0,21
	“	2	25	34,00	22,50	0,23

Resistência à tração

Racines e Pama [Racines e Pama, 1978] realizaram testes de tração direta em pastas de cimento reforçadas com fibras de bagaço-de-cana e observaram um decréscimo na resistência à tração direta (f_t) e no módulo de elasticidade da matriz (E_t) com o aumento da fração volumétrica de fibras e um acréscimo na tenacidade pós-fissuração. Mansur e Aziz [Mansur e Aziz, 1982] observaram, para pastas e argamassas reforçadas com fibras de juta, que a resistência à tração primeiro aumenta com o tamanho de fibra e que, após atingir um valor máximo, a mesma começa a decrescer devido ao efeito adverso de se aumentar o volume de vazios no compósito. A Tabela 2.11 sumariza os resultados obtidos pelos pesquisadores.

TABELA 2.11 - Comportamento de compósitos reforçados com fibras naturais quando submetidos à tração direta [após Racines e Pama, 1978; Mansur e Aziz, 1982].

Traço da matriz (cimento:areia:a/c)	Tipo de fibra	Volume de fibras (%)	Comprimento de fibra	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

Resistência à 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. A Figura 2.9 mostra exemplos de curvas carga-deslocamento obtidas por Tolêdo Filho [Tolêdo Filho, 1997] para argamassas reforçados com fibras de sisal. Nesta Figura a curva A

representa a matriz, a curva B compostos reforçados com fibras curtas, a curva C compostos reforçados com fibras longas e alinhadas e a curva D compostos reforçados com fibras curtas e longas.

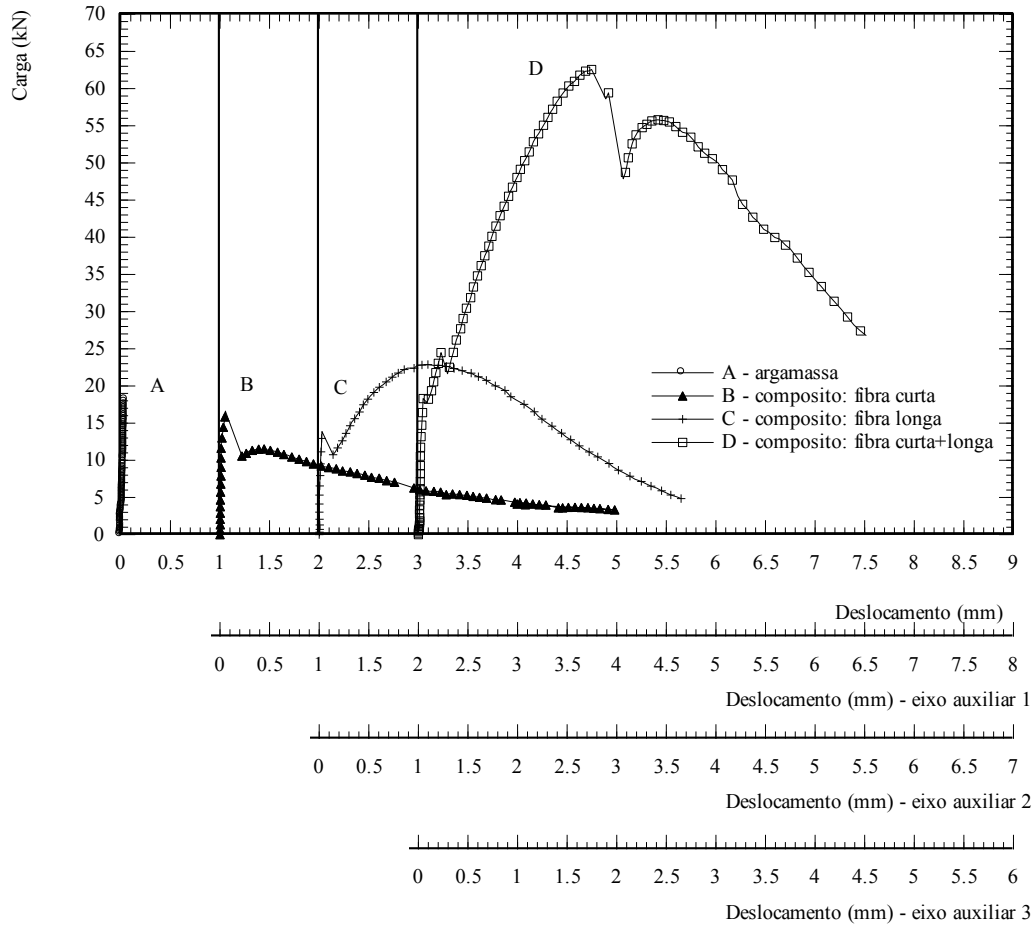


FIGURA 2.9 - Exemplos de curvas carga-deslocamento para compostos de argamassa reforçada com fibras de sisal [após Tolêdo Filho, 1997].

Das curvas acima, pode-se ver que, em geral, os compostos apresentam um comportamento quase que perfeitamente elástico até o surgimento da primeira fissura. Após fissurar, a capacidade de suportar carga é instantaneamente reduzida e então pode aumentar ou decrescer dependendo do comprimento, volume e arranjo de fibras.

Para compostos reforçados com fibras muito curtas ou com pequena fração volumétrica, a ruptura se dará como mostrada na curva B. Para efeito de projeto, o módulo de ruptura do composto será então o limite elástico da argamassa. A presença da fibra muda o modo de ruptura do material (a ruptura não é instantânea como observada para a matriz) e aumenta a sua capacidade de absorver energia. Para compostos reforçados com fibras longas (ou curtas numa combinação ótima de fração volumétrica e comprimento), a carga máxima pode quase que triplicar a carga de primeira fissura como se observa na curva D.

As curvas carga-deslocamento dos compostos reforçados com fibras naturais podem, portanto, serem divididas em duas partes: a) zona elástica até a primeira fissura e b) zona inelástica até a fratura. Na zona elástica considera-se que apenas a matriz suporta carga. Como o módulo de elasticidade das fibras naturais é baixo comparado com o da matriz, elas não são eficientes para prevenir a fissuração. Na zona inelástica, apenas as fibras suportam as tensões trativas (como no caso do concreto armado). No caso dos composto reforçados com fibras longas, essa região pode ser sub-dividida em três partes: (i) região onde a carga é

transmitida da matriz para as fibras (caracterizada pela redução da carga após a primeira fissura), (ii) região onde as fibras suportam as forças de tração e aumentam a capacidade de carga do material (trecho ascendente da curva carga-deslocamento) e (iii) a região onde a capacidade de suportar carga do compósito decresce devido a ruptura ou deslizamento das fibras até a fratura do material (trecho descendente da curva carga-deslocamento). Compósitos com fibras curtas ou com pequeno volume de fibras não apresentam a região (ii).

Propriedades térmicas

As propriedades térmicas dos materiais incluem a condutividade e difusividade térmica, o calor específico e o coeficiente de expansão térmica. Destas, as três primeiras estão inter-relacionadas. A Tabela 2.12 mostram valores de condutividade térmica obtidos por Paramasivam *et al* [Paramasivan *et al*, 1984] para placas corrugadas de argamassa reforçadas com fibras de coco. Condutividade térmica de 0,33 W/m °K foi observada por Lewis e Mirihaglia [Lewis e Mirihaglia, 1979] para placas de pasta de cimento de 300 mm x 300 mm e 7,5 mm de espessura reforçadas com fibra de “elephant-grass” (capim elefante).

TABELA 2.12 - Condutividade térmica de placas corrugadas reforçadas com fibras de coco [após Paramasivan *et al*, 1984].

Traço da matriz (cimento:areia:a/c)	Tipo de fibra	Volume de fibras (%)	Comprimento de fibra	Espessura da placa (mm)	Condutividade e térmica (W/m °K)
1:0.5:0,35	coco	2	25	25,4	0,62
	“	3	25	“	0,63
	“	4	25	“	0,61
	“	5	25	“	0,68

Propriedades acústicas

Duas propriedades acústicas dos materiais de construção são mais importantes: absorção e transmissão de som. Lewis e Marighalia [Lewis e Marighalia, 1979] testaram placas planas, secas, de 300 mm x 300 mm e 7,5 mm de espessura feitas de pasta de cimento reforçadas com fibras de capim elefante (elephant-grass) e obtiveram resultados de transmissão de som de 22% (para um sinal de 833 Hz). Valores de coeficiente de absorção de som obtidos por Paramasivam *et al* [Paramasivan *et al*, 1984] para placas corrugadas de argamassa reforçada com fibras de coco são apresentados na Tabela 2.13.

Os resultados mostram uma variação do coeficiente de absorção de som de 2,5% a 8,0% para baixas frequências e de 12,0% a 48,0% para altas frequências e que a fração volumétrica e a espessura da placa não afetam significativamente o coeficiente de absorção de som do material.

TABELA 2.13 - Coeficiente de absorção de som para placas de argamassa reforçada com fibras de coco [após Paramasivan *et al*, 1984].

Volume de fibras (%)	Espessura da placa (mm)	Coeficiente de absorção de som (%) para frequência de					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
2	13	2,5	4,5	6,0	3,5	13,5	48,0
	10	2,5	6,0	6,0	5,5	12,0	44,0
	5	3,0	5,0	2,5	3,5	10,5	15,0
3	13	3,5	4,5	5,5	5,5	18,5	27,5
	10	3,0	4,5	5,5	6,0	16,0	45,0
	5	3,0	4,0	2,5	5,5	14,0	26,0
4	13	4,0	4,5	3,0	6,0	22,0	23,0
	10	4,0	5,0	4,0	13,5	19,5	31,0
	5	4,5	5,0	7,5	7,5	14,0	43,0

Permeabilidade e absorção de água

De acordo com Aziz *et al* [Aziz *et al*, 1984] um valor típico para a permeabilidade de concretos reforçados com fibras naturais é de 3×10^{-6} cm/s dependendo da natureza da fibra, da fração volumétrica e do processo de fabricação. Segundo os autores a absorção de água desses compósitos varia de 15% a 30% mas uma pintura superficial pode reduzir essa absorção de água para valores entre 2% e 7%.

Degradação das fibras naturais em meios alcalinos

As fibras naturais podem sofrer vários graus de degradação quando expostas a ambiente alcalino. A intensidade do ataque, determinado pela perda de resistência da fibra, depende do tipo de fibra e do tipo de solução alcalina. Os mecanismos de degradação alcalina das fibras naturais foram discutidas por Gram [Gram, 1983] com particular referências às fibras de sisal. Os seguintes mecanismos de decomposição foram assumidos:

- “Peeling-off efeito” na qual o fim da cadeia molecular é desprendida e os grupos terminais são continuamente liberados. Isso ocorre como resultado da reação entre o terminal redutivo da cadeia e os íons OH⁻. De acordo com Gram [Gram, 1983] o grau de polimerização da celulose nas fibras de sisal é alto e esse mecanismo não é muito perigoso.
- Hidrólise alcalina que provoca a divisão da cadeia molecular e reduz o grau de polimerização da celulose. Considerando que a divisão da cadeia molecular expõe novos terminais redutivos, o mecanismo de “peeling-off” pode ser iniciado. A hidrólise alcalina não ocorre em grande proporções em temperaturas inferiores a 100° C [Gram, 1983].

A Figura 2.10, partes (a) e (b), mostra o efeito alcalinidade do meio na resistência à tração das fibras de sisal e coco com o tempo. As fibras foram submetidas aos seguintes ambientes por 420 dias:

- Fibras imersas em água de torneira de pH 8.3 (tratamento 1);
- Fibras imersas em uma solução de hidróxido de cálcio de pH 12 (tratamento 2); e
- Fibras imersas em uma solução de hidróxido de sódio de pH 11 (tratamento 3);

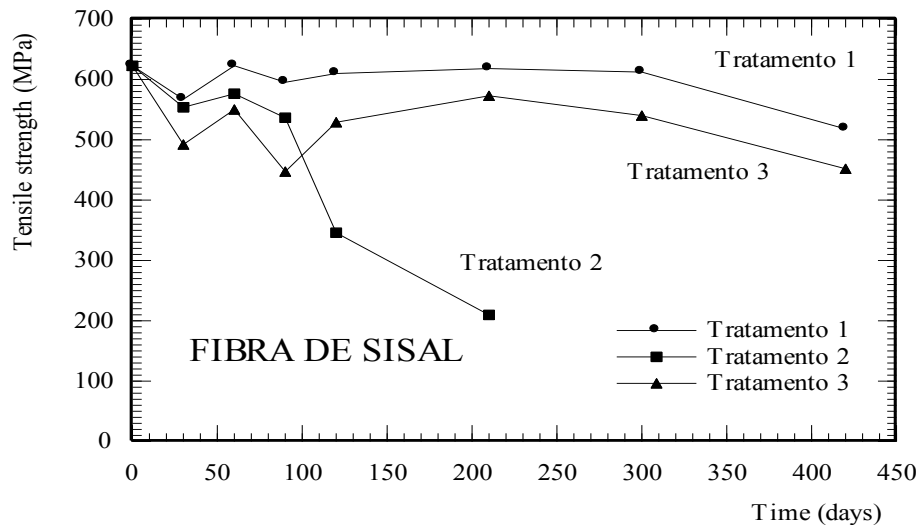


FIGURA 2.10a - Durabilidade das fibras de sisal submetida a diferentes soluções alcalina (após Tolêdo Filho, 1997).

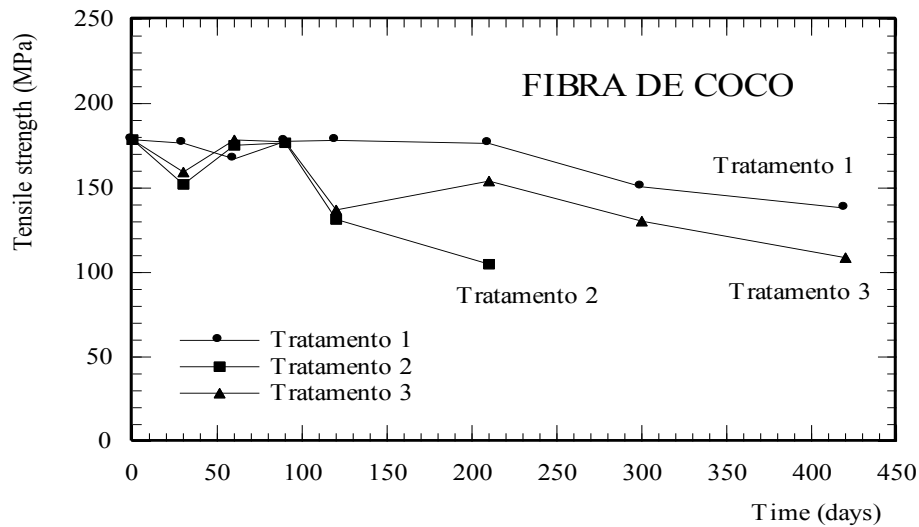


FIGURA 2.10b - Durabilidade das fibras de coco submetida a diferentes soluções alcalinas (após Tolêdo Filho, 1997).

Uma significativa redução na resistência das fibras de sisal e coco pode ser notada para as fibras condicionadas em solução de hidróxido de cálcio. Após 300 dias de imersão, as fibras, quando secas, perderam completamente sua flexibilidade e podiam ser rompidas facilmente quando solicitadas manualmente pela força dos dedos. A mineralização das fibras está provavelmente associada com a cristalização da cal no lúmen e nas paredes das fibro-células. Resultados similares foram obtidos por diversos pesquisadores para estas e outras fibras naturais [Castro e Naaman, 1981; Gram, 1983; Singh, 1985; Agopyan *et al*, 1989; Kawiche, 1991 e Shimizu e Jorillo, 1992].

Durabilidade dos compósitos reforçados com fibras naturais

Uma das maiores preocupações com relação ao uso de fibras naturais como reforço de sistemas à base de cimento está relacionada com a durabilidade dos compósitos que podem perder resistência e tenacidade com o tempo. Tem sido sugerido que este fato está associado com um decréscimo do tamanho de “pull-out” da fibra devido a uma combinação do ataque dos álcalis à lignina e hemicelulose e da mineralização das fibras devido a migração de hidróxido de cálcio da matriz para o lúmen e paredes das fibro-células [Gram, 1983; Tolêdo Filho, 1997].

A Figura 2.11 mostra curvas carga-deslocamento, em flexão, para argamassas reforçadas com fibras de sisal sujeitas a ciclos de molhagem e secagem. Cada ciclo tinha a duração de 7 dias e consistia de 1 dia imerso em água ($t = 18^{\circ} \text{C}$) e 6 dias de secagem em laboratório condicionado ($t = 23^{\circ} \text{C}$ e R.H = 41%)

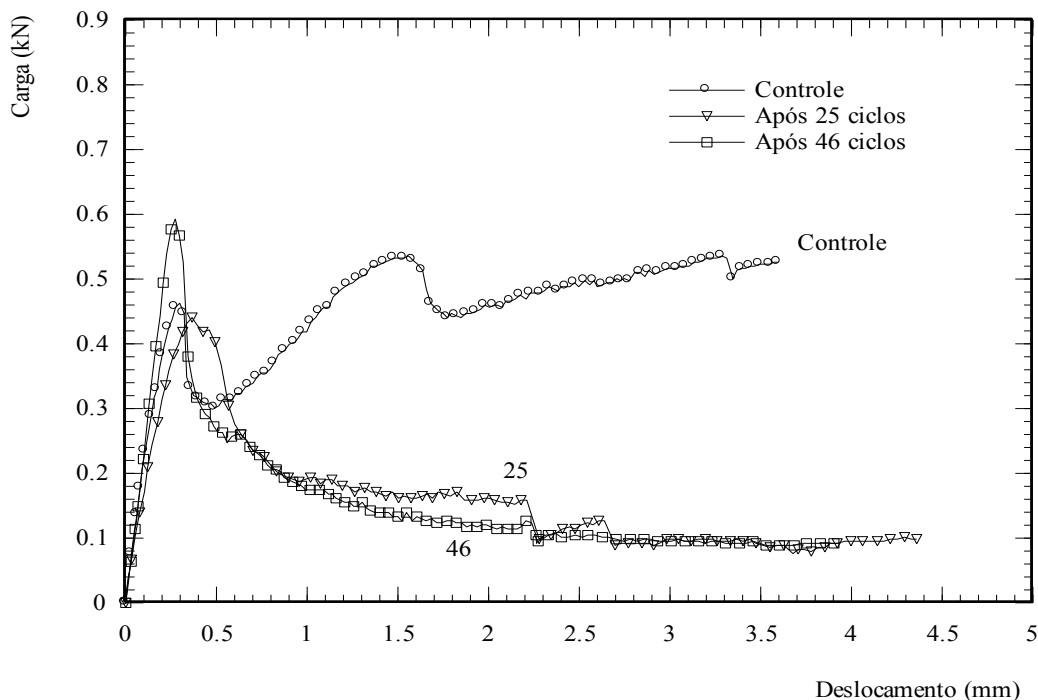


FIGURA 2.11 - Curvas carga-deslocamento para argamassas reforçadas com fibras de sisal e submetidas a ciclos de molhagem e secagem [após Toledo Filho, 1997]

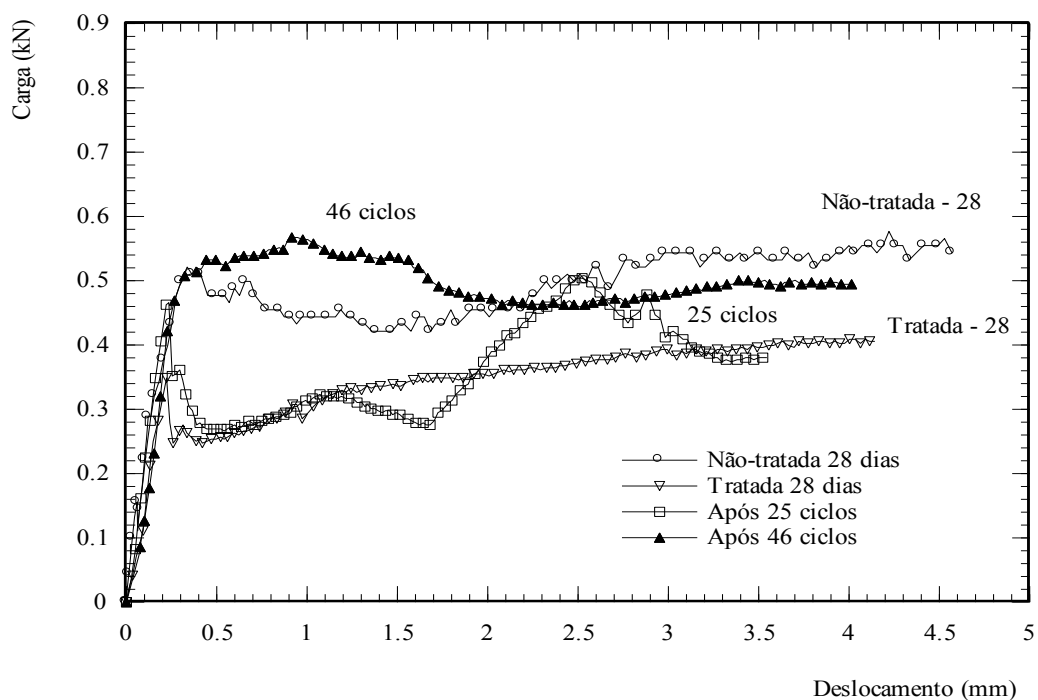
Os resultados mostram que ductilidade do material foi significativamente reduzida devido aos ciclos de molhagem e secagem. Para melhorar a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras naturais várias alternativas têm sido estudadas incluindo:

- a) Proteção superficial das fibras;
- b) Redução da alcalinidade da matriz;
- c) Selar os poros da matriz
- d) Combinação das alternativas acima.

Tratamentos das fibras de sisal com produtos tais como silicato de sódio, sulfato de sódio, sulfato de magnésio, etc. foram estudados por Gram [Gram, 1983] mas nenhum garantiu a durabilidade da fibra na matriz de cimento. A impregnação das fibras com agentes repelentes de água também foi estudada por Gram e excetuando o uso do ácido esteárico e do “formine”, que retardaram a tendência de perda de ductilidade do material, todos os demais tratamentos não impediram a fibra de ser mineralizada.

Adicionar cera ou estearato de zinco em pó à mistura fresca ou impregnar o produto endurecido com enxofre com o objetivo de selar os poros da matriz mostraram resultados promissores [Gram, 1983]. Tratar a matriz para reduzir a sua alcalinidade também foi estudado por Gram. Os produtos estudados incluem: cimento de alumina e a substituição do cimento Portland por micro-silica, escória de alto forno “fly ash” e pozolanas naturais. A substituição de 45% em peso de cimento Portland por micro-silica eliminaram a perda de tenacidade do compósito com o tempo.

Dentre os estudos realizados por Tolêdo Filho [Tolêdo Filho, 1997] para melhorar a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras de sisal e coco dois apresentaram resultados bastante promissores: i) carbonatação da matriz em um ambiente rico em CO_2 e ii) imersão das fibras em micro-silica líquida antes das mesmas serem adicionadas à matriz. A Figura 2.14 mostra curvas carga-deslocamento, em flexão, para argamassas reforçadas com fibras de sisal tratadas com micro-silica líquida.



IGURA 2.14 - Curvas carga-deslocamento para argamassas reforçadas com fibras de sisal imersas em micro-sílica líquida e submetidas a ciclos de molhagem e secagem [após Toledo Filho, 1997]

IV - CONCLUSÕES

Concreto reforçado com fibras naturais é um material com uma grande variedade de usos potenciais. Produtos tais como telhas, placas planas e corrugadas (para revestimento e cobertura), painéis divisórios, tubos, caixas-d'água, silos, etc. podem ser produzidos usando mão-de-obra local e ferramentas simples.

A grande vantagem dos compósitos com fibras naturais é que as fibras são disponíveis em abundância a nível de propriedade rural. Considerando que os países em desenvolvimento apresentam, em geral, uma infra-estrutura rural insuficiente e inadequada para atender às necessidades das suas populações no que se refere a obras de apoio à produção agrícola, habitação, saneamento, educação, e lazer e que uma das principais dificuldades para a construção dessa infra-estrutura é o baixo poder aquisitivo das populações rurais, o uso das fibras naturais (e de outros materiais locais) pode desempenhar um papel fundamental para a mudança dessa realidade.

Existe, no entanto, a necessidade de se continuar estudando as propriedades desse novo material de construção. É importante que se estude mais detalhadamente as seguintes características desse material: (i) estrutura da fibra e sua interação com as diversas matrizes à base de cimento; (ii) propriedades de longa duração do material exposto a condições naturais e submetidos a ensaios acelerados de durabilidade; (iii) desenvolvimento de produtos e métodos de produção; (iv) estudo das propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas, resistência química e durabilidade dos produtos.

V - REFERENCIAS

Agopyan, V., Cincotto, M.A. and Derolle, A. (1989), "Durability of Vegetable Fibre Reinforced Materials", CIB Congress, 11, Quality for Building Users Throughout the World, Paris, Vol. I, pp. 353-363.

Agopyan, V., Jonh, V. M. and Derolle A. (1990), "Construindo com Fibras Vegetais". *A Construção*, São Paulo, abril, nº 203, pp. 21-24.

ASTM C 995 - 91 (1991), "Standard Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone", ASTM Annual Book, Vol. 04.02, ASTM, Philadelphia.

Aziz, M. A. Paramasivam, P. and Lee, S.L. (1987), "Natural Fibre Reinforced Composite Building Materials for Low-income Housing". Symposium on Building Materials for Low-income- Housing. Bangkok, Tailândia, Jan. 20-26, pp. 129-137.

Balaguru, P. N. and Shah, S.P. (1992), - "Fiber-Reinforced Cement Composites", McGraw-Hill, New York, USA, 530 pp.

Barkakaty, B.C. (1976), "Some Structural Aspects of Sisal Fibres." Journal of Applied Polymer Science, Vol.20, pp. 2921-2940.

Bentur, A., and Mindess, S. (1990), - "Fibre Reinforced Cementitious Composites", Elsevier Applied Science, U.K, 449 pp.

BS 1881: Part 104. (1983), "Methods for Determination of Vebe Test", British Standard Association, London .

Castro, J. and Naaman, A.E. (1981), "Cement Mortar Reinforced with Natural Fibres." ACI Journal, Jan-Feb, 69-78.

Chand, N., Tiwary, R. K. and Rohatgi, P. K., (1988), "Bibliography Resource Structure Properties of Natural Cellulosic Fibres - An Annotated Bibliography". Journal of Materials Science, n° 23, pp. 381-387.

CEPED (1982), "Utilização de Fibras Vegetais no Fibro-Cimento e no Concreto-Fibra". BNH-DEPEA, Rio de Janeiro.

Cook, D.J. (1980), "Concrete and Cement Composites Reinforced with Natural Fibres", Concrete International, Ci80, Fibrous Concrete. The Concrete Society, the Construction Press, UK, 99-114

Cook, D. J., Pama, R. P. and Weerasinghe, H. S. L. D. (1984), "Coir Fibre Reinforced Cement as a Low Cost Roofing Material". Building and Environment, Vol. 13, pp. 193-198.

Coutts, R.S.P. (1983), "Flax Fibres as a Reinforcement in Cement Mortars." The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 5, No. 4, November, 75-82.

Coutts, R.S.P. (1988), "Wood Fibre Reinforced Cement Composites", Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete, Vol. 5, Edited by R.N.Swamy, Blackie and Son Ltd, London, pp. 1-62.

D'Almeida, J. R. (1987) - "Propriedades Mecânicas das Fibras de Juta". Ciência e Cultura, 39(11), Novembro, pp. 1023-1025.

Dinwoodie, J.M. (1981), "Timber - Its Nature and Behaviour", Van Nostrand Reinhold. Company.

Evans, B. (1986), "Understanding Natural Fibre Concrete - Its Application as Building Material", IT Publications Ltda.

Ghavami, K. and Veloso, R. F. R (1985), "Análise Microscópica do Bambu e Comportamento Mecânico das Fibras de Coco". RI 03/85, DEC-PUC-Rio.

Gram, H.E. (1983), "Durability of Natural Fibres in Concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo. 1:83, 225 pp.

Gram, H.E. (1988), "Natural Fibre Concrete Roofing", Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete, Vol. 5, Edited by R.N.Swamy, Blackie and Son Ltd, London, pp. 256-285.

Jindal, U.C. (1986), "Development and Testing of Bamboo-Fibres Reinforced Plastic Composites". Journal of Composites and Materials, Vol. 20, Jan.

Kawiche, G.M. (1991), "Estudio de Morteros Reforzados com Fibras de Sisal", Ph.D. Thesis, Universidad de Madrid, Spain.

Kulkarni, A.G., Satyanarayana, K., Sukumaran, K. and Rohatgi, P.K. (1981), "Mechanical Behaviour of Coir Fibres under Tensile Load", Journal of Materials Science 16, pp. 905-914.

Lewis, G. and Mirihagalia, P. (1979), "A Low-Cost Roofing Material for Developing Countries." Building and Environment, Vol. 14, 131-134.

Mansur, M.A. and Aziz, M.A. (1982), "A Study of Jute Reinforced Cement Composites." The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 4, No. 2, May, 75-82

Mukherjee, K.G. and Satyanarayana, K.G. (1984), "Structure and Properties of some Vegetable Fibres. Part 1: Sisal Fibre", Journal of Materials Science 19, pp. 3925-3934.

Mukherjee, K.G. and Satyanarayana, K.G. (1986), "An Empirical Evaluation of Structure-property Relationships in Natural Fibres and their Fracture Behaviour", Journal of Materials Science 21, pp. 4162-4168.

Nilsson, L. (1975), "Reinforcement of Concrete with Sisal and other Vegetable Fibres". Swedish Council for Building Research, Document No D-14, Stockolm.

Pakotiprapha, B., Pama, R.P. and Lee, S.L. (1983), "Behaviour of a Bamboo Fibre-Cement Paste Composite." Journal of Ferrocement, Vol. 13, No. 3, July, 235- 248.

Paramasivam, P., Nathan, G. K. and Das Gupta. N.C. (1984), "Coconut Fibre Reinforced Corrugated Sabs". The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 6, n° 1, Fev, pp. 19-27.

Racines, P.G. and Pama, R.P. (1978), "A Study of Bagasse Fiber-Cement Composite as Low Cost Construction Material", International Conference on Materials of Construction for Developing Countries, Bangkok, Thailand, August, pp. 191-205.

Shimizu, G. and Jorillo Jr, P. (1992), "Coir Fibre Reinforced Cement Based Composite. Part 1: Microstructure and Properties of Fibre Mortar", 4th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete, Sheffield. Published by E & FN Spon, London.

Sing, S.M. (1985), "Alkali Resistance of Some Vegetable Fibre and their Adhesion with Portland Cement", Research and Industry, 15, pp. 121-126.

Tolêdo Filho, R.D., Barbosa, N.P. and Ghavami, K. (1990), "Applications of Sisal and Coconut Fibres in Adobe Blocks". Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Vegetable Plants and Their Fibres as Building Material, Salvador, Brazil, Set. 17-21, pp. 139-149

Tolêdo Filho, R.D. (1997), "Natural Fibre Reinforced Mortar Composites: Experimental Characterisation", Ph.D Thesis, DEC-PUC-Rio/DEC-Imperial College, London, U.K., 472pp.

Velpari, V., Ramachandran, B.E., Bashkaron, T. A., Pai, B.C. and Balasubramanian, N. (1980), "Alkali Resistance of Fibres in Cement", Journal of Materials Science., 15, pp. 1579-1584

Walker, (1993), "Primary Wood Processing: Principles and Practice", Chapman and Hall, 595 pp.