

HOLMER SAVASTANO JÚNIOR

**MATERIAIS À BASE DE CIMENTO REFORÇADOS COM
FIBRA VEGETAL: RECICLAGEM DE RESÍDUOS PARA
A CONSTRUÇÃO DE BAIXO CUSTO**

**Tese apresentada a Concurso de Livre-Docência, Junto ao
Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo**

São Paulo

Fevereiro, 2000

To our dear Aussie mates!

RESUMO

Resíduos fibrosos provenientes da agroindústria sisaleira, de banana e de polpa celulósica de eucalipto, são apresentados como matéria-prima para reforço de matrizes cimentícias alternativas, à base de escória de alto-forno moída. O processo de produção envolveu mistura convencional em betoneira, seguida de adensamento por vibração e cura ao ar saturado, e o compósito obtido revelou propriedades físicas e mecânicas aceitáveis nas primeiras idades. Telhas de cobertura de pequenas dimensões fabricadas a partir desse processo simplificado e de baixo custo, foram expostas a intempéries ambientais e experimentaram significativa perda das propriedades mecânicas no longo prazo. Apesar disso, a integridade estrutural e o desempenho físico se mantiveram aceitáveis após 16 meses de exposição. O estudo da microestrutura do material permitiu identificar o mecanismo de degradação das fibras, bem como sua petrificação, como as principais causas do envelhecimento observado.

A produção e a adequação de polpas celulósicas, a partir dos resíduos coletados, conferiu significativo aumento da capacidade de reforço das fibras vegetais. Técnica de dispersão das matérias-primas em solução aquosa, seguida de sucção para drenagem de água e compactação por prensagem, resultaram em materiais de comportamento físico e mecânico superiores aos previamente obtidos. Após três meses sob envelhecimento natural, esses novos compósitos não apresentaram sinais de degradação. Os resultados indicam a potencialidade do componente de cobertura ora em desenvolvimento, com base na melhoria dos processos produtivos.

Palavras-chave: compósitos, fibras vegetais, resíduos fibrosos, polpas celulósicas, escória granulada básica de alto forno, matriz à base de cimento, telhas de cobertura, desempenho mecânico, propriedades físicas, microestrutura

ABSTRACT

Fibrous wastes originated from sisal banana agro-industry and also from eucalyptus cellulose pulp mills are evaluated as raw materials for reinforcement of alternative cementitious matrices, based on ground blast furnace slag. The composite preparation followed a conventional dough mixing method, ordinary vibration and cure at saturated air condition. Physical and mechanical properties were found acceptable at initial ages. This simple and low-cost procedure originated roofing tiles of small dimensions. The exposition of such components under environmental conditions played a significant decay on mechanical properties in the long term. Structural integrity and physical performance relied acceptable after 16 months of weathering. The microstructural analysis identified the degradation mechanisms of the fibres, and also their petrification. The production and appropriation of cellulose pulps from the collected residues provided considerable increase of reinforcement capacity by the vegetable fibres. A slurry vacuum de-watering method for composite preparation followed by press compaction provided materials with physical and mechanical behaviour better than the ones previously obtained. After three months under natural ageing, these new composites did not present degradation tendency. The obtained results signalise the potentiality of low-cost roofing tiles based on optimized fabrication processes.

Keywords: composites, vegetable fibres, fibrous wastes, cellulose pulps, granulated blast furnace slag, cement based matrix, roofing tiles, mechanical performance, physical properties, microstructure

AGRADECIMENTO

O trabalho em equipe tem efeito de alavanca! Quantos progressos, em tão curto espaço de tempo, estamos experimentando em nossa Área de Construções Rurais e Ambiente no Campus da USP de Pirassununga. Nossos bolsistas de iniciação científica, professores colaboradores, colegas de São Paulo, São Carlos, Piracicaba e Santa Bárbara D'Oeste, todos ajudam, com matéria-prima, equipamentos, ensaios laboratoriais e interpretação de resultados. Imaginem, até os colegas australianos, lá de '*down-under*', pararam para nos dar um *help*. Tudo isso, com muita amizade e boa vontade.

O trabalho em equipe parece *iceberg*, devidamente sinalizado para não afundar ninguém... Só uma pequena parte aparece, mas o grande suporte, esforço cotidiano, geralmente é anônimo e pode até passar despercebido. A tantos amigos e amigas, secretárias, ajudantes da limpeza, pessoal da segurança, meu reconhecimento e gratidão.

Pesquisar, como qualquer outra atividade, também tem custos. Um agradecimento especial à Financiadora de Estudos e Projetos, Programa Habitare, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo auxílio à pesquisa e bolsa de estágio no exterior, que fundamentaram as propostas iniciais.

Trabalho precisa de referência. Não só das bibliográficas, mas, sobretudo, das pessoais. Pensamos nelas quando queremos atingir uma nova meta. Admiro muitas pessoas, sob diferentes aspectos. Uma parece incrível na sua capacidade de se auto-superar e nos mostrar novos horizontes. Ao sempre orientador e amigo Vahan, dedico este pensamento.

Quem trabalha precisa se alimentar. Já diziam minhas avós que saco vazio não pára em pé. Alimento de primeira qualidade vamos sempre buscar no celeiro de nossas famílias e amigos, expressão de amor que não espera nada em troca. É o incentivo confiante, a certeza de sempre poder contar com nossos pais, irmãos e amigos. O entendimento de quem vive bem próximo, Cássia, Luísa e Letícia, que sabiamente já constataram que todo esse trabalho e mais trabalho, ufa..., nunca se acaba!

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Objetivos	03
1.2 Conteúdo.....	04
2 FIBRAS VEGETAIS NA CONSTRUÇÃO: EXPERIÊNCIA BRA- SILEIRA	05
2.1 Introdução	05
2.2 Aglomerantes alternativos	05
2.3 Fibras vegetais	07
2.3.1 Microestrutura das fibras vegetais	08
2.4 Microestrutura x desempenho dos compósitos	11
2.4.1 Zona de transição	11
2.4.2 Comportamento mecânico dos compósitos	12
2.5 Durabilidade de compósitos com fibras vegetais	13
2.5.1 Ataque alcalino às fibras	14
2.5.2 Incompatibilidade física	15
2.5.3 Avaliação da durabilidade	15
2.6 Produção de componentes e sistemas construtivos	17
2.6.1 Pesquisa desenvolvida pelo Ceped	18
2.6.2 Experiência do IPT/IDRC	20
3 DISPONIBILIDADE DE RESÍDUOS DE FIBRAS VEGETAIS NO BRASIL	22
3.1 Pesquisa de disponibilidade e classificação de resíduos	23
3.2 Resíduos de uso viável	24
3.2.1 Sisal	28
3.2.2 Piaçava	29
3.2.3 Coco	30
3.2.4 Algodão e polpa de celulose de eucalipto	30
3.2.5 Rami	30
3.2.6 Banana	31
3.2.7 Malva	31
3.2.8 Seleção de resíduos	31
3.3 Propriedades físicas dos resíduos	32

3.4	Análise microestrutural	33
3.5	Comentários adicionais	35
4	MATRIZES CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM FIBRAS RESIDUAIS PARA PRODUÇÃO DE TELHAS DE COBERTURA ...	36
4.1	Compósitos e componentes com matriz à base de cimento Portland	36
4.1.1	Preparação e ensaio dos compósitos	36
4.1.2	Preparação e ensaio das telhas	38
4.1.3	Propriedades dos compósitos	41
4.1.4	Caracterização das telhas	44
4.1.5	Considerações adicionais	48
4.2	Compósitos e componentes com matriz à base de escória de alto- forno	49
4.2.1	Desempenho físico e mecânico dos compósitos	49
4.2.2	Desempenho físico e mecânico das telhas	52
4.2.3	Comentários adicionais	54
4.3	Durabilidade dos produtos à base de escória reforçada com fibra	54
4.3.1	Escolha e caracterização dos materiais	55
4.3.2	Análise da microestrutura do compósito	57
4.3.3	Análise da durabilidade sob envelhecimento natural	62
4.3.4	Avaliação da durabilidade sob envelhecimento acelerado	66
4.4	Testes de incombustibilidade	69
4.5	Análise de conforto térmico	70
4.6	Comentários	74
5	AVALIAÇÃO DE POLPAS CELULÓSICAS PARA REFORÇO DE PRODUTOS À BASE DE CIMENTO	76
5.1	Preparo da matéria-prima	76
5.2	Produção das polpas celulósicas	77
5.2.1	Processo kraft	77
5.2.2	Processo CTMP	79
5.2.3	Procedimento complementares	81
5.3	Caracterização das polpas celulósicas	81
5.3.1	Métodos de ensaio	83
5.3.2	Discussão das propriedades	84

5.4	Análise microestrutural	85
5.5	Comentários finais	95
6	FIBROCIMENTOS DE DESEMPENHO ELEVADO	97
6.1	Matérias-primas	98
6.2	Método de produção dos compósitos	98
6.3	Métodos de ensaio	100
6.4	Compósitos à base de cimento Portland	101
6.4.1	Resistência à flexão e módulo de elasticidade	101
6.4.2	Ductilidade	104
6.4.3	Massa específica e absorção de água	105
6.4.4	Análise microestrutural	106
6.4.5	Comentários adicionais	109
6.5	Avaliação da matriz de escória de alto-forno em compósitos fibrosos	110
6.5.1	Resistência à tração na flexão	110
6.5.2	Ductilidade	115
6.5.3	Comentários adicionais.....	115
6.6	Fibrocimentos alternativos à base de escória	115
6.6.1	Propriedades e microestrutura	121
6.6.2	Comentários adicionais	123
6.7	Durabilidade	123
6.8	Comentários	126
7	COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES	128
7.1	Os resíduos fibrosos	128
7.2	As fibras vegetais como reforço	129
7.3	A telha de cobertura reforçado	132
7.4	Durabilidade	132
7.5	Novas pesquisas e transferência da tecnologia	134
7.6	Conclusões finais	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

MATERIAIS À BASE DE CIMENTO REFORÇADOS COM FIBRA VEGETAL: RECICLAGEM DE RESÍDUOS PARA A CONSTRUÇÃO DE BAIXO CUSTO

1 INTRODUÇÃO

O custo de materiais de construção tradicionais é bastante elevado no Brasil, o que pode ser explicado pelo alto consumo de energia e transporte, além da tendência oligopolista do setor produtivo de materiais básicos.

Fibras naturais, como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios, têm despertado grande interesse nos países em desenvolvimento, por causa de seu baixo custo, disponibilidade, economia de energia e também no que se refere às questões ambientais. Segundo Swamy (1990), o emprego dos compósitos em placas, telhas de cobertura e componentes pré-fabricados, pode representar significativa contribuição para o rápido crescimento da infra-estrutura desses países.

Também nos países desenvolvidos, o uso de fibrocimentos, que utilizam polpa celulósica como reforço, tem sido consagrado, graças a constantes aperfeiçoamentos das matérias-primas, processos produtivos com consumo racionalizado de energia e custos de investimento cada vez menores (Coutts, 1992).

O Fibre Composites Group do Forestry and Forest Products (FFP), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Austrália, aparece como instituição de pesquisa precursora no estudo de materiais cimentícios reforçados com polpa de celulose, já comercializados a partir do início da década de 80 (Coutts, 1986b). Desse modo, a Austrália, imediatamente seguida pela Nova Zelândia, foi o primeiro país a produzir fibrocimentos totalmente livres de amianto.

Atualmente, estima-se que a produção mundial de compósitos cimentícios com reforço de fibras celulósicas, combinadas ou não a fibras plásticas, esteja ao redor de 1,4 milhão de toneladas ao ano (Rongxi, 1995), produção essa localizada, em grande parte, nos EUA, Europa, Oceania, Ásia e África do Sul.

Atualmente, em diversos países, inclusive no Brasil, há uma crescente tendência de rever a utilização de amianto crisotila, especialmente no reforço de matrizes de cimento, segmento responsável por mais de 70% do consumo mundial dessa fibra mineral. Como

suporte para essa conduta, alegam-se graves problemas de saúde, com incidência preocupante sobretudo nos trabalhadores da indústria da construção (Giannasi; Thébaud-Mony, 1997).

Reconhecidamente, o avanço da legislação contrária ao uso do amianto tem sido o principal indutor de novas tecnologias substitutas, as quais, via de regra, têm conseguido manter, com base em soluções tecnológicas inovadoras, a presença dos fibrocimentos no mercado da construção de diversos países. Como existe, no Brasil, uso considerável de fibrocimentos nas coberturas das habitações destinadas à população de baixa renda, em razão do menor custo que outras soluções construtivas (Lee, 2000), torna-se necessário o aprimoramento de uma alternativa durável e tecnicamente compatível com esse mercado consumidor.

O presente trabalho faz parte de uma série de estudos inter-relacionados, a cargo de grupo multidisciplinar de pesquisadores da Universidade de São Paulo, que se dedica, há cerca de 15 anos, à identificação e adequação de resíduos, para uso como materiais de construção de baixo custo, conforme registrado em contribuições disponíveis nos anais do Int. Symp. Nat. Polym. Compos. (1998), do Workshop Reciclagem... (1997) e do Simpósio de Ciências... (1997). No que se refere aos materiais fibrosos, os estudos se revestem de importância ainda maior, por darem origem a produtos reforçados, esbeltos e moldáveis em painéis para usos múltiplos, como é o caso dos componentes de cobertura (Simpósio Ibero-Americano..., 1998).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo central apresentar materiais reforçados com fibras vegetais, direcionados para componentes de cobertura de baixo custo, a partir de matéria-prima residual e processos industriais de produção. Foram assim definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar processos construtivos existentes, na área de fibrocimentos, potencialmente aptos ao emprego de resíduos.
- Selecionar matrizes cimentícias apropriadas para reforço com fibras naturais.
- Encontrar e caracterizar resíduos fibrosos com disponibilidade compatível à escala industrial de produção de componentes construtivos.
- Desenvolver compósitos fibrosos e conhecer seu comportamento.
- Produzir telhas de cobertura, a partir de técnicas simples de fabricação.
- Obter e caracterizar polpas celulósicas, de modo a tornar ótimo o reforço de matrizes cimentícias.
- Produzir fibrocimentos de desempenho mecânico aceitável com o emprego dos resíduos pré-selecionados.
- Estudar o envelhecimento dos diversos materiais produzidos.

Ao longo das diversas fases deste estudo, persistiu a procura por técnicas produtivas de elevada eficiência, porém ajustadas a matérias-primas residuais. Assim, vislumbrou-se uma solução construtiva baseada no uso racional de energia, para obtenção de produtos duráveis e que pudessem oferecer uma opção à demanda crescente por fibrocimentos alternativos, especialmente para cobertura de moradias destinadas à população de baixa renda.

1.2 Conteúdo

O capítulo 2º apresenta diversas pesquisas, até hoje desenvolvidas no Brasil, envolvendo o emprego de fibras vegetais como reforço na construção civil. São ainda analisadas algumas matrizes cimentícias de menor alcalinidade, e portanto menos agressivas às fibras. Além do comportamento físico e mecânico dos materiais fibrosos, faz-se também uma análise de sua microestrutura e de aspectos relacionados à sua durabilidade. Algumas experiências relevantes, que tratam da produção de componentes de baixo custo, também são discutidas.

A partir do capítulo 3º, inicia-se a descrição das etapas experimentais desta pesquisa. Neste capítulo, é discutida a disponibilidade de resíduos fibrosos no Brasil, além de uma sistemática de classificação e seleção daqueles resíduos potencialmente viáveis para reforço de matrizes frágeis. Seis resíduos são pré-selecionados inicialmente, e em seguida determinadas suas principais propriedades físicas e microestruturais.

Passa-se então, no capítulo 4º, ao desenvolvimento de matrizes de cimento reforçadas com as fibras escolhidas. Apresenta-se a metodologia de fabricação das telhas, e os materiais são analisados com base em seu desempenho mecânico, físico e microestrutural, no curto prazo e também após envelhecimento.

O experimento então se direciona para técnicas de melhoria da matéria-prima fibrosa, sendo que o capítulo 5º apresenta processos de polpação químicos e mecânicos, bem como as principais características das fibras obtidas.

A seguir, processos de produção envolvendo melhor dispersão das fibras na matriz e compactidade ótima dos compósitos são descritos no capítulo 6º, com discussão dos resultados obtidos.

Por último, segue o capítulo 7º, com comentários finais, conclusão e perspectivas de prosseguimento dos estudos.

2 FIBRAS VEGETAIS NA CONSTRUÇÃO: EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

2.1 Introdução

O reforço de materiais de construção com fibras vegetais é conhecido há milênios, e o emprego de fibras vegetais como reforço do gesso vem desde o Renascimento. Apesar de um grande número de trabalhos de pesquisa comprovarem a eficiência das fibras vegetais como reforço, o seu emprego na produção industrial é ainda muito pequeno, provavelmente em função de eventuais custos para adaptação do processo produtivo, como também pela falta de informações referentes à disponibilidade de fibras vegetais para o mercado da construção.

Este capítulo apresenta inicialmente as características de algumas fibras vegetais adequadas para reforço de matrizes frágeis, na construção civil. A seguir, são discutidos aspectos de durabilidade e microestrutura dos compósitos, além de experiências relacionadas à produção de componentes e sistemas construtivos.

2.2 Aglomerantes alternativos

Para viabilizar o emprego de fibras vegetais como reforço, são de interesse aglomerantes alternativos, à base de escória granulada de alto-forno e de cinza de casca de arroz, por exemplo, que apresentam alcalinidade menor que a do cimento Portland comum.

A escória de alto-forno é subproduto da produção do aço, de composição química similar à do cimento Portland. Submetida a resfriamento brusco, ela se torna granulada e apresenta propriedades aglomerantes. O parque siderúrgico nacional produziu, em 1999, 24,4 milhões de toneladas de ferro-gusa (dados preliminares do Instituto Brasileiro de Siderurgia, informação *on line* obtida no endereço eletrônico <http://www.ibs.org.br> em 24/02/2000), sendo que cada tonelada de ferro-gusa deixa como resíduo aproximadamente 330 kg de escória. Apenas parte dessa escória é consumida pelas indústrias de cimento, que a empregam como adição, sendo o acúmulo desse resíduo, estimado em cerca de 3 milhões de toneladas ao ano, um problema sério. As siderúrgicas vendem a escória básica granulada por menos de US\$ 10,00 a tonelada (John, 1995).

Agopyan et al. (1990) analisaram escórias de três dentre as principais siderúrgicas nacionais (Cosipa, Usiminas e CSN), sendo todas adequadas ao emprego como aglomerante. Após moagem em moinho de cargas esféricas tradicional, até a finura Blaine aproximada de $400 \text{ m}^2/\text{kg}$, apresentaram as propriedades listadas na tabela 2.1. A hidratação da escória ocorre mais rapidamente em meio aquoso alcalino e/ou sob temperatura elevada. Os agentes que aceleram esta hidratação são o cimento Portland, a cal, a soda cáustica, a gipsita ou uma mistura destes. O melhor resultado do referido estudo foi obtido preparando-se um aglomerante com 88% de escória, 2% de cal hidratada e 10% de gipsita moída. A velocidade de endurecimento não teve relação linear com o teor de ativadores adicionados. Argamassa na proporção 1:1,5 (aglomerante:areia em massa), com índice de consistência (*flow table*) de 250 mm no estado recém-misturado, apresentou resistência à compressão axial de 14,4 MPa aos 28 dias de idade.

Tabela 2.1 Propriedade das escórias de alto-forno moídas (Agopyan et al., 1990).

Propriedade	CSN	Cosipa	Usiminas
Massa específica (kg/m^3)	2880	2880	2970
Fase vítrea (%)	97,7	95,3*	97,1
Grau hidráulico (teste de Michelsen)	3 min 36 s	3 min 15 s*	3 min 42 s

(*) Média de duas amostras.

A cinza da casca de arroz é apontada como o resíduo agrícola brasileiro de maior atividade pozolânica. Disponível principalmente nos Estados do Rio Grande do Sul, Maranhão, Goiás e Mato Grosso do Sul, a produção de cascaria pode ser estimada em cerca de 19% da produção nacional de arroz, que está em torno de 11,4 milhões de toneladas por ano (estimativa da safra 1999/2000 pesquisada no endereço eletrônico <http://www.conab.gov.br> em 24/02/2000). A cinza pode ser obtida pela simples queima da casca. No entanto, procurando otimizar, tanto a produção de energia, como a qualidade das cinzas resultantes, foi desenvolvido um processo de queima utilizando fornos de leito fluidizado. Com a cinza produzida em forno de leito fluidizado, foi possível a produção de aglomerante misturando meio a meio a cinza e o cimento Portland comum (Cincotto et al., 1990).

2.3 Fibras vegetais

O estudo sistemático de fibras com finalidade de reforço de matrizes começou na Inglaterra em 1970. No Brasil, a pesquisa pioneira coube ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (Ceped), Camaçari, Bahia, com início em 1980.

Agopyan (1991), em seu abrangente trabalho a respeito do emprego de fibras vegetais como reforço de matrizes frágeis, relacionou 19 fibras potencialmente úteis para a construção civil. A partir de propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura), características físicas, relação entre comprimento e diâmetro, possibilidade de cultivo no Brasil, custo e durabilidade no ambiente natural, selecionou algumas fibras como as mais adequadas. A tabela 2.2 apresenta compilação de características de fibras vegetais já utilizadas como reforço de matrizes à base de cimento, em comparação com fibras de amianto crisotila e polipropileno. Como um produto natural, as características das fibras vegetais apresentam grande variabilidade, com coeficientes de variação frequentemente maiores que 40%.

Assim, as pesquisas, no Brasil e no exterior, concentraram-se nas fibras de coco e sisal (Agopyan, 1991), fartamente disponíveis a preço relativamente baixo. Para o reforço de materiais de construção civil podem ser empregadas fibras de menor comprimento, normalmente rejeitadas pelas indústrias de amarra, estofados e tecelagem, tradicionais consumidoras destas fibras. Embora apresentem elevada resistência à tração (tabela 2.2), o baixo módulo de elasticidade dessas fibras condiciona sua eficiência como reforço a deformações elevadas do compósito à base de cimento.

Tabela 2.2 Características físicas e mecânicas das fibras vegetais, amianto e polipropileno.

Propriedades	Massa espec. real (kg/m ³)	Absorção máxima (%)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elastic. (GPa)
Coco (<i>Cocos Nucifera</i>)	1177	93,8	23,9 a 51,4	95 a 118	2,8
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	1370	110,0	4,9 a 5,4	347 a 378	15,2
Malva (<i>Urena lobata</i>)	1409	182,2	5,2	160	17,4
Celulose para papel imprensa (<i>Pinus elliottii</i> - princ.)	1200 a 1500	400	nd	300 a 500	10 a 40
Bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>)	1158	145	3,2	73 a 505	5,1 a 24,6
Juta (<i>Corchorus capsularis</i>)	nd	214	3,7 a 6,5	230	nd
Piaçava (<i>Attalea funifera</i>)	1054	34,4 a 108	6	143	5,6
Banana (<i>Musa cavendishii</i>)	1031	407	2,7	384	20 a 51
Amianto crisotila	2200 a 2600	-	2	560 a 750	164
Polipropileno comum (filam.)	913	-	22,3 a 26,0	250	2,0

Fontes: Agopyan; Savastano Jr. (1997), Nolasco et al. (1998) e Swamy (1988)

Obs.: nd = informação não disponível.

2.3.1 Microestrutura das fibras vegetais

As fibras vegetais são constituídas por células individuais que, por sua vez, compõem-se de microfibrilas dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação. As microfibrilas são ricas em celulose, polímero vegetal de cadeias longas (grau de polimerização da ordem de 25 000), e estão aglomeradas por hemicelulose amorfa (grau de polimerização entre 50 e 200). As células da fibra têm de 10 µm a 25 µm de diâmetro e, segundo Coutts (1992), são compostas por quatro camadas de microfibrilas (figura

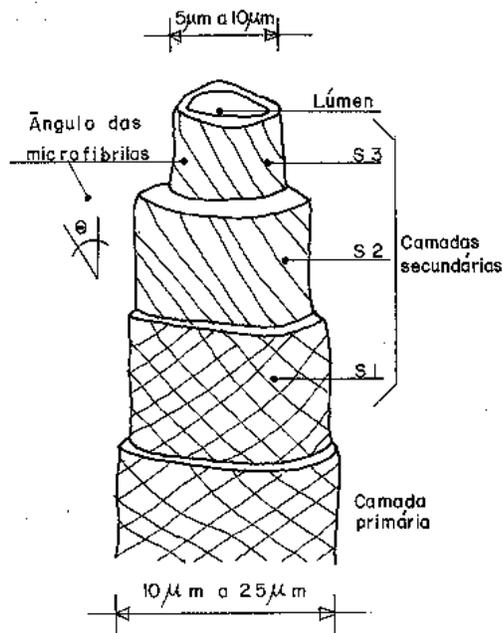
2.1.a): (i) camada primária, mais externa, de estrutura reticulada; (ii) camada secundária S1, de estrutura também reticulada; (iii) camada secundária S2, em que as microfibrilas estão orientadas segundo o ângulo θ , com relação ao eixo longitudinal da célula, em espiral, e (iv) camada secundária S3, mais interna, também com as microfibrilas em forma de espiral. A camada S2 é a de maior espessura e, também, a de maior teor de celulose. No interior da célula, há uma cavidade central de seção elíptica, com dimensão de 5 μm a 10 μm , denominada lúmen.

As diversas células, que compõem a fibra (ou macrofibra, expressão esta utilizada para identificar claramente o feixe de filamentos), encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular, composta de hemicelulose, pectina e principalmente lignina (70%, em média). A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade denominada lacuna. A figura 2.1.b ilustra esquematicamente a seção transversal do aglomerado de células da fibra vegetal.

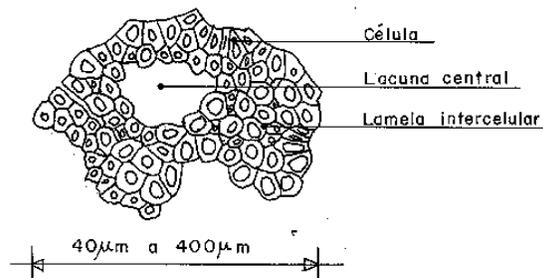
As lacunas e lumens são responsáveis pela grande incidência de poros permeáveis nas fibras, o que acarreta elevada absorção de água e massa específica aparente bastante inferior à real (tabelas 2.2 e 3.3).

Shimizu; Jorillo Jr. (1992) analisaram detalhadamente a estrutura das fibras de coco e afirmaram que cada uma delas pode conter desde 30 até mais de 200 células individuais. Esses pesquisadores registraram, ainda, presença de protuberâncias na superfície lateral das fibras, com diâmetro de 8 μm a 15 μm , que podem incrementar a aderência com matrizes frágeis.

A tabela 2.3 traz, para algumas fibras de interesse, os teores em massa de celulose e de lignina dessas fibras e o ângulo médio θ , formado pelas microfibrilas com o eixo longitudinal da célula. Em comparação com as informações da tabela 2.2, atesta-se que a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras variam diretamente com o teor de celulose e inversamente com o ângulo θ das microfibrilas. Já o alongamento máximo de ruptura aumenta com o ângulo θ , pois é maior o trabalho de fratura necessário para o estiramento das microfibrilas.



a) Célula individual.



b) Macrofibra: aglomerado de células.

Fig. 2.1 Esquema da estrutura de fibra vegetal (sem escala), (Gram, 1988 e Coutts, 1992).

Tabela 2.3 Propriedades da estrutura de fibras vegetais.

Fibra	Celulose (% massa)	Lignina (% massa)	Ângulo das microfibrilas θ (graus)
Malva	76,0	10,0	8
Sisal	78,6	9,9	10 – 22
Coco	53,0	40,8	30 - 49

Fonte: Savastano Jr.; Agopyan (1997).

Outro aspecto importante é o retardamento da pega do cimento, pela presença de substâncias de caráter ácido, liberadas pela fibra vegetal em solução aquosa (Aggarwal; Singh, 1990). Essas substâncias não fazem parte da estrutura da fibra, são genericamente chamadas de extrativos e incluem resinas, polifenóis, óleos e graxas. O mesmo efeito de retardamento pode ser gerado pela presença de açúcares na estrutura vegetal, rapidamente liberados em solução aquosa.

2.4 Microestrutura x desempenho dos compósitos

Para matrizes frágeis reforçadas com fibras de baixo módulo de elasticidade, em que o arrancamento da fibra predomina sobre a ruptura, tem-se a aderência fibra-matriz como principal fator de influência sobre a tenacidade (energia total absorvida) do compósito.

2.4.1 Zona de transição

Em compósitos à base de cimento, a maior aderência fibra-matriz é conseguida por meio do melhor desempenho da zona de transição, fazendo com que as duas fases (fibra e matriz) trabalhem em conjunto efetivamente. A melhor adesão se consegue pela redução da porosidade e pela menor concentração de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) nas proximidades da fibra.

Define-se zona ou auréola de transição como a região da pasta de aglomerante próximo à fibra, com espessura de 10 μm a 100 μm , e que apresenta características diferenciadas do restante da matriz (Savastano Jr. et al., 1994).

A figura 2.2 ilustra a imagem de elétrons retroespalhados de compósito à base de cimento Portland comum com relação água/cimento igual a 0,38 e 7 dias de idade. A fibra de malva, de baixa densidade, aparece na micrografia como uma região mais escura. Há nítido aumento da porosidade nas proximidades da fibra, e as fissuras tendem a atravessar a zona de transição (indicação 3 da figura 2.2).

345 x 15KV WD:25MM S: 00012 P:0023
100µm

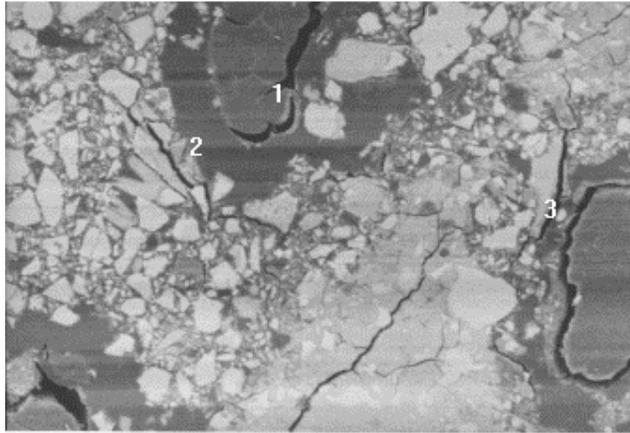


Fig. 2.2 Imagem por elétrons retroespalhados. Compósito com fibras de malva. 1: fibra descolada da matriz; 2: macrocristal de hidróxido de cálcio e 3: microfissuras.

A indicação 2 da mesma figura destaca um macrocristal de portlandita, com espessura aproximada de 40 µm, atravessado por fissura, o que evidencia sua baixa resistência. A espessura da zona de transição chegou a atingir 100 µm.

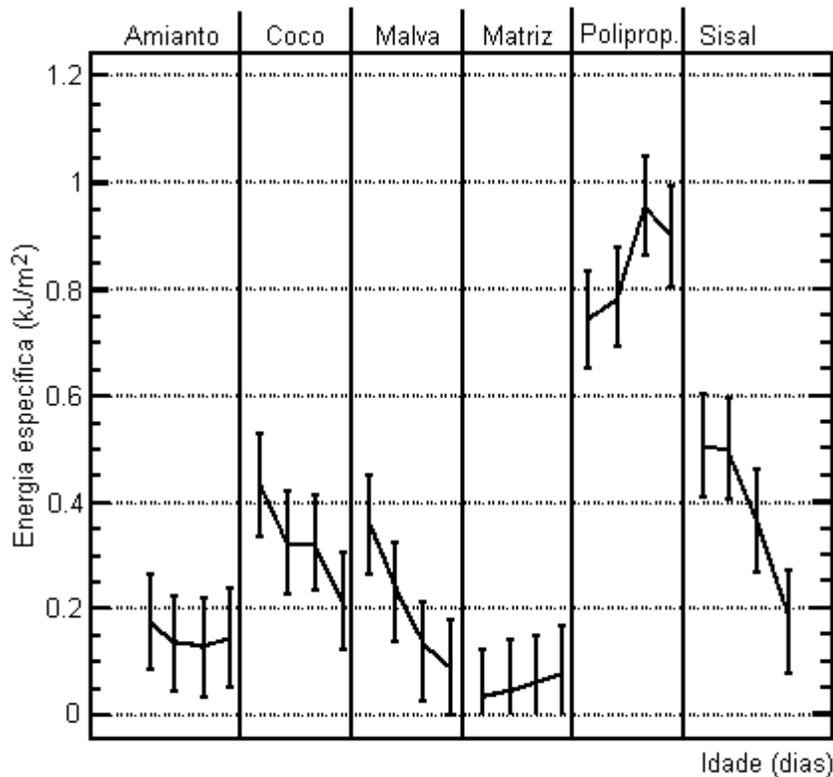
Percebe-se, no caso das fibras vegetais, que a elevada porosidade favorece a formação de grandes cristais de portlandita, que não se formam na superfície da fibra, mas, sim, no interior da zona de transição. Os descolamentos das fibras são visíveis e ocorrem em decorrência de sua variação dimensional, ao perder a água absorvida durante a mistura do compósito. Esses descolamentos, de grande incidência nos compósitos com fibras vegetais, constituem fator adicional para prejudicar a aderência entre as fases.

2.4.2 Comportamento mecânico dos compósitos

Savastano Jr. et al. (1994) apresentaram resultados de ensaios mecânicos de compósitos à base de pastas de cimento Portland, com relação água/cimento igual a 0,38, reforçadas com fibras vegetais (coco, sisal e malva), de amianto e de polipropileno.

O ensaio de tração na flexão utilizou equipamento de quatro cutelos, segundo Rilem (1984). A figura 2.3 mostra o comportamento da energia específica: percebe-se como foi significativa a queda dessa propriedade aos 180 dias de idade, para compósitos com fibras vegetais, em decorrência da degradação dessas fibras em condições severas de

exposição (umidade relativa superior a 95%). O compósito que absorve a maior quantidade de energia é aquele com fibras de polipropileno, cujos resultados chegam a atingir o dobro daqueles com fibras de sisal e de coco. Os compósitos com fibras de amianto e de malva apresentam valores ainda menores, em consequência do pequeno comprimento de ancoragem das fibras. A matriz sem fibras, obviamente, absorve menos energia que todos os compósitos.



Legenda: para cada tipo de fibra, as idades se repetem na seqüência de 7, 28, 90 e 180 dias.

Fig. 2.3 Energia específica do compósito em diversas idades. Relação água/cimento = 0,38, intervalo de confiança = 95%. Ensaio de tração na flexão.

2.5 Durabilidade de compósitos com fibras vegetais

No que diz respeito a novos materiais para a construção civil, a avaliação da durabilidade é de suma importância. Deve-se ter em mente que uma habitação, por exemplo, é o bem de maior valor adquirido por uma pessoa e, também por esta razão, deve apresentar longa vida.

Em compósitos formados por matrizes frágeis e fibras vegetais, dois fatores são determinantes: o ataque alcalino às fibras e a incompatibilidade física entre fibras e matrizes.

A principal fonte de degradação de vegetais no ambiente natural, o ataque biológico através de fungos xilófagos, não representa maiores preocupações, porque as matrizes empregadas apresentam pH alcalino capaz de inibir sua ação.

2.5.1 Ataque alcalino às fibras

As tentativas de produção de argamassas ou pastas de cimento Portland comum reforçadas com fibras vegetais fracassaram. As telhas de cimento-sisal, que foram produzidas na década de 1970 em países em desenvolvimento, como Guatemala, Colômbia e Nicarágua, apresentavam, nas condições ambientais desses países, vida útil entre 2 e 4 anos (Agopyan, 1991).

Uma das principais razões para essa rápida degradação é a elevada alcalinidade da água presente nos poros da matriz de cimento Portland, com pH superior a 13. A região da matriz em torno da fibra (zona de transição) é caracterizada pela porosidade elevada (figura 2.2), permitindo acúmulo de água, e pela presença de grandes quantidades de hidróxido de cálcio, propiciando elevada alcalinidade (Savastano et al., 1994). A elevação da temperatura ambiente provoca uma sensível aceleração na velocidade de degradação.

Para controle desse fator de degradação, diversas soluções são possíveis (John; Agopyan, 1993):

- Emprego de matrizes de baixa alcalinidade, que possuem água do poro com pH inferior ao do cimento Portland comum, como o gesso e o cimento de escória de alto-forno (item 2.2).
- Redução da alcalinidade, por carbonatação acelerada da matriz.
- Proteção das fibras com polímeros, hidro-repelentes (resinas, óleos e asfaltos), ou ainda agentes bloqueadores da reação de decomposição das fibras, como silicatos e sulfatos de sódio e magnésio.
- Impermeabilização da matriz.
- Emprego dos compósitos em locais permanentemente secos.

Algumas dessas soluções apresentam custo elevado, reduzindo assim uma das vantagens das fibras vegetais.

Como a velocidade de degradação é relativamente baixa, compósitos de fibras vegetais e cimento convencional podem ser empregados nas peças em que a resistência a impacto e a ductilidade são necessárias apenas por curto período de tempo, por exemplo, em fôrmas para concretagem ou em peças que necessitem de reforços apenas durante a sua fase de transporte e montagem.

2.5.2 Incompatibilidade física

As fibras vegetais apresentam variações dimensionais, em razão de mudanças no teor de umidade, maiores que as das matrizes de cimento. Assim, os repetidos ciclos de molhagem e secagem introduzem tensões e, progressivamente, vão destruindo a ligação fibra-matriz, reduzindo a ductilidade do material.

2.5.3 Avaliação da durabilidade

Durante o envelhecimento de um compósito, ocorrem, simultaneamente, fenômenos de degradação da fibra e/ou da ligação fibra-matriz, paralelamente aos fenômenos de hidratação da matriz.

A resistência à tração do compósito não é a melhor indicadora da degradação, especialmente nas primeiras idades, não só porque a hidratação da matriz tende a elevá-la, mas também porque as fibras vegetais nem sempre conseguem melhorar a resistência à tração do compósito. É sempre bom lembrar que fibras de baixo módulo de elasticidade destinam-se predominantemente a melhorar o desempenho dos compósitos no estado pós-fissurado, frente a esforços dinâmicos. Embora mais difícil de realizar, a medida da energia dissipada, durante o ensaio de flexão, é um indicador de degradação mais preciso, porque é menos afetada pelo crescimento da resistência mecânica da matriz e mais sensível, tanto à ligação fibra-matriz, quanto à resistência mecânica das fibras. A resistência a impactos é um ensaio de grande variabilidade e, portanto, de difícil aplicação (Agopyan, 1991).

Por outro lado, a observação direta da degradação das fibras e da interface fibra-matriz é difícil. As fibras removidas da matriz sofrem degradação mecânica durante o processo de extração, o que dificulta a avaliação de sua resistência à tração. Por outro lado, a superfície da fibra geralmente apresenta-se coberta por produtos de hidratação do cimento, o que dificulta a sua observação em microscópios, sendo necessário o desenvolvimento de técnica para dissolução dos compostos hidratados sem afetar as fibras. Uma solução útil para observação da degradação da ligação fibra-matriz, mas pouco eficiente para observação do ataque à fibra, é a análise em microscópio eletrônico de varredura (imagem de elétrons retroespalhados) das seções transversais de fibras embutidas na matriz, conforme já exposto no item 2.4.

Ensaio de envelhecimento acelerado apresentam normalmente resultados apenas comparativos e permitem conclusões muito limitadas. Os ensaios de molhagem-secagem, como o QCT (abreviatura para *quick condensation test*), em compósitos, aceleram a hidratação e modificam a forma e a quantidade dos produtos hidratados da matriz. O aumento da hidratação provoca redução na porosidade da zona de transição fibra-matriz (Savastano Jr. et al., 1994), o que pode minimizar o efeito da degradação da aderência fibra-matriz. Por outro lado, mesmo ciclos bastantes agressivos com etapas de 8 h de molhagem e 8 h de secagem, por 680h consecutivas, não conseguem simular 6 meses de envelhecimento natural (figura 2.4).

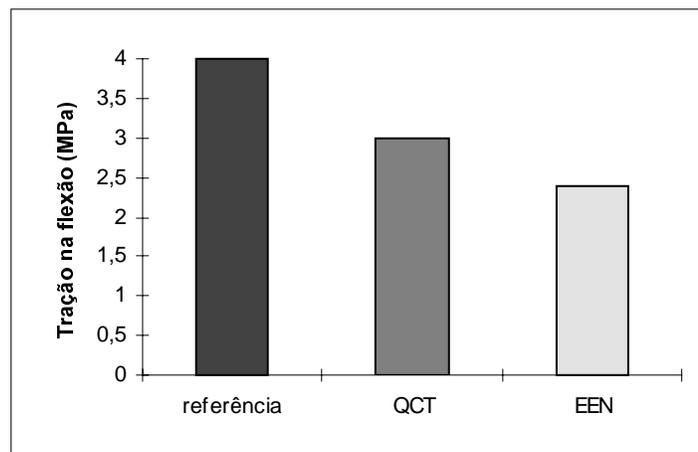


Fig. 2.4 Comparação entre ensaio acelerado (QCT) e envelhecimento natural (EEN) (IPT,1989).

O tamanho dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de envelhecimento também influencia os resultados. Corpos-de-prova de menores dimensões sofrem maiores variações dimensionais, por perda e ganho de água, bem como por variações de temperatura, e, conseqüentemente, a degradação é mais acentuada. Nos estudos relatados em IPT (1989), corpos-de-prova de (10 x 50 x 200) mm³, expostos ao ambiente de São Paulo, Brasil, com inclinação 30° e orientação norte, apresentaram, após um ano, lixiviação e perda de dureza superficiais. No entanto, em painéis na escala 1:1, sob condições idênticas, os mesmos fenômenos ocorreram em intensidade bem menor, mesmo após quatro anos de exposição. Já na edificação protótipo (ver item 2.6.2), em que painéis externos estão protegidos por beiral e três demãos de pintura emulsão PVA, só foi possível observar lixiviação nas regiões expostas, por longo período de tempo, a gotejamento contínuo de água.

2.6 Produção de componentes e sistemas construtivos

O trabalho pioneiro do Ceped, após avaliação das fibras disponíveis, concentrou-se no estudo do reforço de matrizes de cimento com fibras de sisal e coco. Exaustivos experimentos relacionados à influência do teor e comprimento das fibras e dos processos de moldagem foram realizados. A partir desses resultados, foram desenvolvidos e avaliados componentes habitacionais, como telhas tipo canal (ver item 2.6.1), calhas, pias de cozinha, pequenas caixas d'água, produzidos por processo simplificado de construção e com matrizes de cimento Portland. Embora o desempenho da telha tipo canal de 1,5 m de comprimento e 1 cm de espessura tenha sido excelente no curto prazo, o Ceped não recomendou o seu uso em tetos, até que estivessem concluídos os estudos sobre a durabilidade do compósito, hoje desativados. Os demais componentes são considerados viáveis técnica e economicamente, pois as fibras são solicitadas mais intensamente durante a fabricação, transporte e assentamento. No Ceped, também se estudou a melhoria da durabilidade do compósito, por meio da impregnação das fibras com resinas (Guimarães, 1990).

O Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco (Itep), do Recife, PE, desenvolveu pesquisas de reforço de matrizes de gesso com fibras de coco e sisal (Pires Sobrinho, 1992). No âmbito da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP), foram

desenvolvidos diversos trabalhos de pesquisa, em nível de mestrado e doutorado, conforme mencionado por Agopyan (1991) e Savastano Jr. et al. (1994). No Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), foram investigados compósitos de pasta de cimento e gesso reforçados com jornal desintegrado, pasta de gesso reforçada com sisal, e argamassas de cimentos especiais reforçadas com fibra de coco (ver item 2.6.2).

Alguns trabalhos realizados na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), têm desenvolvido compósitos à base de cimento com teores elevados (geralmente superiores a 20% da massa de aglomerante) de resíduos de madeira (Beraldo, 1997b e Beraldo et al., 1997), bambu (Beraldo, 1997a) e bagaço de cana-de-açúcar (Ramírez Sarmiento, 1996), para uso em construções rurais.

2.6.1 Pesquisa desenvolvida pelo Ceped

O trabalho do grupo de pesquisadores do Programa de Tecnologias de Habitação (Thaba) pode ser considerado, em nível internacional, como um dos mais amplos e consistentes no seu âmbito, e merece destaque em qualquer revisão bibliográfica.

Foram produzidos corpos-de-prova prismáticos com 300 mm de comprimento e seção quadrada de 50 mm de lado. A matriz empregada foi de argamassa de cimento e areia, no traço de 1:1, em volume, e o fator água/cimento, de 0,43. Fibras de coco, sisal e piaçava, com volumes e comprimentos variáveis, foram adicionadas manualmente. Apenas os compósitos com fibras longas (comprimento aproximado de 270 mm) de sisal e piaçava apresentaram resistência mecânica superior à da matriz sem reforço. Por essa razão, para os compósitos com fibras de sisal, tentaram-se outras técnicas de moldagem, que foram: adensamento em duas camadas, compactação com pressão variando de 1,9 MPa a 3,1 MPa, e adensamento em mesa vibratória por até três minutos. Pelos ensaios mecânicos, a melhor técnica foi a de compactar com pressão de 2,2 MPa, com a qual se obteve resistência à tração na flexão de 6,2 MPa.

O produto de maior repercussão foi a telha tipo canal, o “telhão”, com comprimento de 1,80 m, largura aproximada de 41 cm e espessura de 1,5 cm. A metodologia foi apresentada em uma cartilha destinada aos usuários finais, que produziriam as telhas para o seu próprio consumo (Bahia, 1985). A matriz empregada foi uma argamassa de

cimento e areia no traço 1:3 em volume, com fator água/cimento de 0,7 e reforçada com 2% em volume de fibras picadas (comprimento médio de 4 cm) de coco.

Inicialmente, uma placa plana era moldada sobre folha plástica, fixa num esquadro de madeira. Essa placa era feita de duas camadas de argamassa, e as fibras, colocadas manualmente entre elas. Após a modelagem da placa, o esquadro de madeira era removido e a placa, colocada em cavaletes, adquirindo o seu formato de canal. Esse processo muito simples (ver figura 2.5), podia ser executado por trabalhadores sem nenhuma qualificação, e sem equipamentos especiais. Os problemas conhecidos, foram decorrentes da má distribuição das fibras entre camadas, e do emprego de volumes de reforço menores que o estipulado. Para minorar esses riscos, o Ceped passou a recomendar a adição das fibras na argamassa, antes da moldagem.

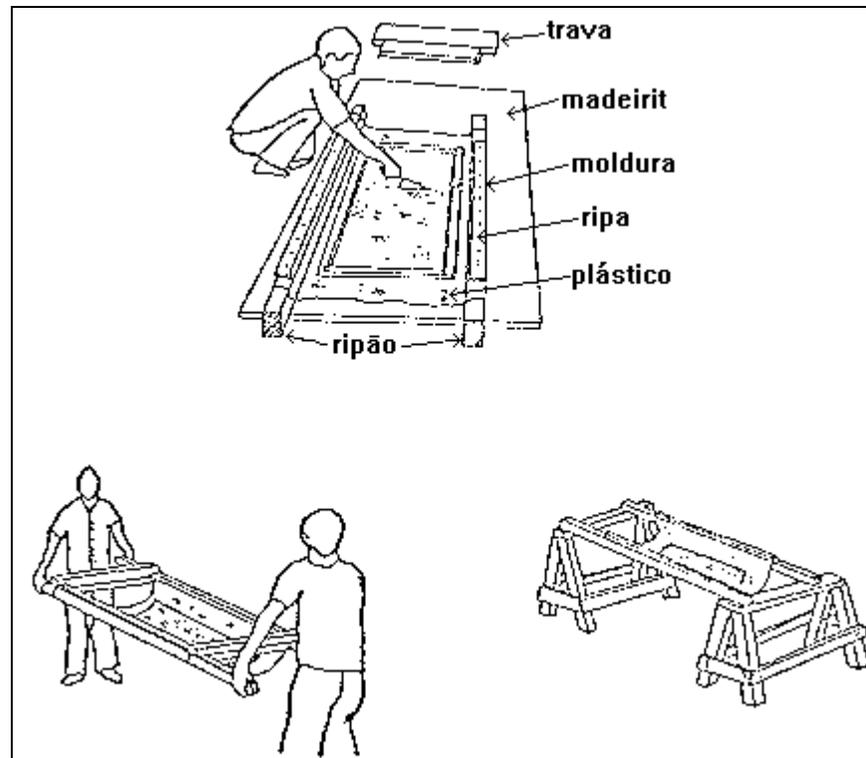


Fig. 2.5 Moldagem das telhas de argamassa de cimento Portland reforçada com fibras de coco (Bahia, 1985).

2.6.2 Experiência do IPT/IDRC

O IPT, com suporte financeiro do International Development Research Centre (IDRC), Canadá, desenvolveu componentes empregando compósito de argamassa de cimento de escória de alto-forno (ver item 2.2) reforçada com 2% em volume de fibras de coco.

Os componentes foram desenvolvidos levando em conta que eles devem ser facilmente produzidos, em canteiro ou em pequena indústria de pré-moldados, e montados sem o emprego de equipamentos. O trabalho concentrou-se em painéis para paredes estruturais, mas alguns experimentos foram realizados visando placas para forros, neste caso, preferindo-se empregar pastas reforçadas com papel de imprensa desintegrado (Agopyan, 1991).

Os painéis verticais eram vazados (figura 2.6), com pé-direito de 2,4 m (exceto sob as janelas). O projeto foi definido, levando-se em consideração os problemas de juntas e a possibilidade de transporte por duas pessoas. As fôrmas foram feitas com madeira compensada, com furos produzidos por tubos de aço, de modo a garantir fácil desmoldagem. Entre duas e três horas após a moldagem, os tubos de aço foram removidos. Com 18 horas, as laterais das fôrmas puderam ser retiradas. Após 40 horas, os painéis foram movimentados, apoiados nas extremidades. Durante 28 dias, os painéis foram mantidos úmidos.

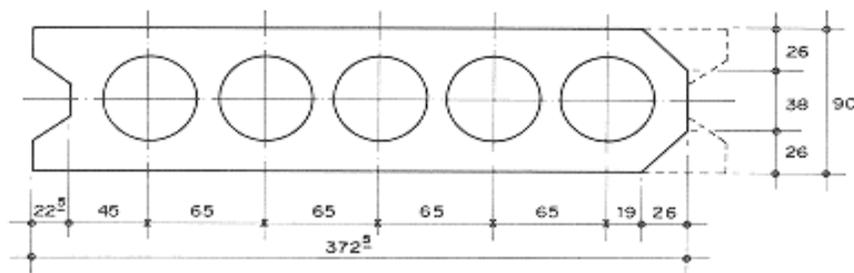


Fig. 2.6 Seção transversal dos painéis (Agopyan, 1991).

Com o objetivo de realizar avaliação de desempenho pós-ocupação, foi construído pela Cohab-SP, em 1989, com supervisão do IPT, um protótipo em escala real, no conjunto habitacional da Vila Nova Cachoeirinha, na cidade de São Paulo, (figura 2.7). O protótipo já foi usado como creche, moradia e centro comunitário, e

avaliações recentes (John et al., 1998) confirmaram que suas paredes externas e internas permaneciam em perfeitas condições após mais de 8 anos de exposição.



Fig. 2.7 Vista do protótipo construído em Nova Cachoeirinha, São Paulo.

3 DISPONIBILIDADE DE RESÍDUOS DE FIBRAS VEGETAIS NO BRASIL

A geração de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais, está associada principalmente aos seguintes elementos:

- Características intrínsecas às plantas e aos processos de obtenção das fibras vegetais. No caso de plantas fibrosas, são exemplos a porcentagem de fibra existente na parte explorada (folha, caule ou fruto) e o método utilizado no desfibramento.
- Mercado extremamente seletivo e restrito, com respectiva baixa produtividade de itens comercializáveis. Alguns mercados (indústria madeireira, por exemplo) trabalham com especificações técnicas (dimensões mínimas exigidas para madeira serrada, no caso acima) que geram índices elevados de rejeição das matérias-primas.
- Perecimento dos produtos.
- Poucas informações disponíveis para destinação de resíduos a utilizações alternativas. É quase inexistente a prática dos chamados bancos de resíduo, para alocação desses materiais em outros mercados.

Um material deixa de ser resíduo pela sua valorização como matéria-prima, para obtenção de novos produtos. Neste caso, o resíduo passa a ser tratado como subproduto do processo produtivo (Valle, 1995). Em países tropicais, os resíduos gerados pela agroindústria da fibra vegetal podem constituir importante fonte de matéria-prima para a produção de componentes construtivos, dependendo das quantidades disponíveis e da dispersão geográfica, haja vista os custos de coleta e transporte (John, 1997).

No caso dos países em desenvolvimento, em que a escassez de habitações e de edifícios para fins públicos, comerciais e industriais é enorme, a aplicação desses materiais na construção pode contribuir para acelerar a produção de edificações com desempenho adequado. Com essa finalidade, as fibras vegetais residuais são apresentadas como opção para reduzir o custo da produção dos compósitos, procurando-se, ao mesmo tempo, solucionar os problemas advindos do uso dessas fibras, notadamente a baixa durabilidade em meios alcalinos (ver item 2.5).

Conforme salientado por Tolêdo Filho (1997), muitos estudos ainda são necessários, tanto para caracterização da matéria-prima fibrosa, como no desenvolvimento de novos produtos e métodos de produção. Algumas experiências de sucesso (Swamy, 1988)

empregaram polpas celulósicas como reforço e modelo Hatschek de produção, seguido de cura úmida ou por autoclave, com melhoria do desempenho mecânico do compósito de cimento, especialmente quanto a resistência à tração na flexão e ductilidade, porém com significativo aumento dos custos produtivos.

O presente capítulo tem por objetivo o estudo de disponibilidade e a seleção prévia de resíduos e subprodutos de outros usos comerciais, provenientes da agroindústria de fibras vegetais, tendo em vista sua aplicação como reforço de matrizes cimentícias, para produção de componentes de cobertura de baixo custo.

3.1 Pesquisa de disponibilidade e classificação de resíduos

Foram realizadas visitas técnicas, no período de janeiro a agosto de 1997, aos principais centros brasileiros produtores e/ou processadores de oito diferentes tipos de fibra vegetal, conforme tabela 3.1. A polpa celulósica de eucalipto, neste caso, foi proveniente de diversos estágios dos processos kraft e branqueamento. Todas as demais fibras foram obtidas na forma de fios ou macrofibras, isto é, feixes de células individuais (ver figura 2.1).

A partir das informações obtidas em campo, junto a cerca de vinte empresas, procedeu-se à classificação dos resíduos e subprodutos agroindustriais, com base nos seguintes critérios: identificação da cadeia agroindustrial geradora de resíduos (região produtora, produtos, quantidades e operações envolvidas); identificação dos resíduos (relação com produtos principais, processos e/ou operações); quantidade disponível de resíduos (outras opções de uso, com respectivas demandas); dispersão espacial dos resíduos gerados (aptidão a soluções regionalizadas e custos de transporte) e valor de mercado do resíduo. Realizou-se ainda documentação fotográfica, além de coleta de amostras para caracterização física dos resíduos de maior interesse.

Tabela 3.1 Fibras vegetais de interesse.

Fibra	Nome botânico	Parte da planta	Centros produtores e/ou processadores visitados
Sisal	<i>Agave sisalana</i> Perrine	Folha	Semi-árido da Bahia e da Paraíba
Piçava	<i>Attalea funifera</i> Mart.	Bainha foliar	Região de Valença, BA
Coco	<i>Cocos nucifera</i> Linn.	Mesocarpo do fruto	Região de Recife, PE, e Aracaju, SE
Algodão	<i>Gossypium herbaceum</i> Linn.	Semente	Campina Grande, PB
Celulose de eucalipto	<i>Eucalyptus grandis</i> - clones	Tronco	Aracruz, ES
Rami	<i>Boemmeria nivea</i> Gaud.	Caule	Região de Londrina, PR
Banana cultivar nanicão	<i>Musa cavendishii</i>	Pseudocaule	Vale do Ribeira, SP
Malva	<i>Urena lobata</i> Linn.	Caule	Amazônia

3.2 Resíduos de uso viável

A Tabela 3.2 (Savastano Jr. et al., 1997a e 1997b) apresenta vinte tipos de resíduo, oriundos do processo agroindustrial de obtenção das fibras vegetais comerciais em estudo, conforme itens seguintes.

Tabela 3.2 Resíduos do processamento de fibras vegetais.

Fibra	Produto principal	Resíduo				
		Denominação	Aproveitamento para outros fins	Valor de mercado (US\$/t)*	Quantidade - abrangência (t/ano)	Rel. (%) (resíduo/ prod. princ.)
Sisal	Fibra verde antes da secagem	Bucha verde (já separada do bagaço) - umidade aprox.: 120% em massa	Uso potencial para produção de celulose	Nulo	30000 - Apaeb	300 ⁽¹⁾
	Fibra beneficiada	Refugo/bucha	Reforço de gesso, produção de fios e celulose	90 - 125	10000 - Brasil	6 ⁽²⁾
	Fios e cordas	Bucha branca (sem tratamento)	Produção de celulose (uso total)	180	25 - Crispim	1,5 ⁽³⁾
		Fibras curtas (menos de 3 cm)	Combustível e adubo (uso desprezível)	Nulo	25 - Crispim	1,5 ⁽³⁾
	<i>Baler twine</i> (fio agrícola)	Bucha (tingimento com anilina e mistura com óleo mineral)	Reprocessamento (uso total)	80	290 - Brasil	0,8 ⁽⁴⁾
		Fibras curtas (impregnadas c/ anilina e óleo mineral)	Combustível (uso total)	0,50	2900 - Brasil	8 ⁽⁴⁾
	Tapetes	Retalhos de fios (tingimento a quente)	Uso potencial para produção de celulose	Nulo	54 - Cosibra	6 ⁽⁴⁾
Piaçava	Fibra limpa e penteada	Mistura de fibras e palha (refugo)	Nenhum	Nulo	1000 - Valença	30 ⁽⁵⁾
	Fibra para produção de vassouras	Fibras fora de padrão	Reprocessamento (parcial)	270	12 - Valença	10 - 15 ⁽⁵⁾

(continua)

Tabela 3.2 Alguns resíduos oriundos do processamento de fibras vegetais (continuação).

Fibra	Produto principal	Resíduo				
		Denominação	Aproveitamento para outros fins	Valor de mercado (US\$/t)*	Quantidade - abrangência (t/ano)	Rel. (%) (resíduo/ prod. princ.)
Coco	Fibras longas e médias	Fibras curtas (1 - 3 cm)	Parcial: filtros, mantas, tapetes e substrato agrícola	270	3000 - Brasil	40 ⁽⁶⁾
	Fibras longas	Pó residual não peneirado – umidade aproximada: 80% em massa	Desprezível	90 (máximo)	4500 - Cofib	2880 ⁽⁷⁾
		Fibra curta	Parcial	900	36 - Cofib	23 ⁽⁷⁾
		Refugo de fibra longa	Nulo	2170	31 - Cofib	20 ⁽⁷⁾
	Fibras longas e curtas	Pó misturado com fibrinhas - umidade aproximada: 80% em massa	Parcial: o pó (50% em massa) é utilizado como substrato agrícola	90	3000 - Diniz	200 ⁽⁸⁾
Algodão	Fios para tecelagem	microfibras: 85% algodão e 15% poliéster	Enchimento para almofadas e colchões	90	270 - Cirne	15 ⁽⁹⁾
Polpa de eucalipto	Produção de papel	Rejeito - umidade aproximada: 60% em massa	Papel de qualidade inferior	15	17000 - Aracruz	0,5 ⁽¹⁰⁾
Rami	Fibra bruta de 1ª para tecelagem	Resíduo do amaciamento	Substrato de uso agropecuário	Nulo	250 - Brasil	5 ⁽¹¹⁾
	Fibra bruta de 2ª para tecelagem	Resíduo do amaciamento	Substrato de uso agropecuário	Nulo	140 - Brasil	20 ⁽¹¹⁾

(continua)

Tabela 3.2 Alguns resíduos oriundos do processamento de fibras vegetais (continuação).

Fibra	Produto principal	Resíduo				
		Denominação	Aproveitamento para outros fins	Valor de mercado (US\$/t)*	Quantidade - abrangência (t/ano)	Rel. (%) (resíduo/ prod. princ.)
Banana	Fruta de mesa e para a indústria	Fibra do pseudocaule - base seca	Substrato de uso agrícola	Nulo	95000 - Vale do Ribeira	8 ⁽¹²⁾
Malva	Fibra bruta limpa	Fibra tipo 4	Tecelagem e fiação, com baixo rendimento	340	1180 - Brasil	20 ⁽¹³⁾

Fontes: (1) Apaeb – Valente, BA; (2) Cobefe – Cuité, PB; (3) Crispim – Queimadas, PB; (4) Cosibra - João Pessoa, PB; (5) Indústria de Vassouras de Valença, BA; (6) Ficobras - Abreu e Lima, PE; (7) Aracaju Fibras (Cofib) – Aracaju, SE; (8) Diniz S.A. – Aracaju, SE; (9) Indústria Cirne - Campina Grande, PB; (10) Aracruz Celulose – Aracruz, ES; (11) Imperial Fibras – Uraí, PR; (12) Magário – Registro, SP; (13) CTC- Castanhal, PA

* US\$ 1,00 = R\$ 1,755 (cotação média do câmbio paralelo em 9/4/1999)

3.2.1 Sisal

A produção brasileira total, em 1997, foi de 116 mil toneladas (Silva; Beltrão, 1999), sendo 89 mil toneladas destinadas à exportação (estimativa da FAO, 1996). Os resíduos mais abundantes acontecem no desfibramento; cada tonelada de fibra verde (antes da posterior secagem, que reduz a sua massa a menos da metade) a ser comercializada, dá origem a três toneladas de bucha, assim chamada a fibra de menor comprimento, que se concentra na base da folha do sisal. Este resíduo, praticamente sem uso nas regiões visitadas, encontra-se disperso nas pequenas unidades de produção, a maior parte delas culturas entre 30 ha e 100 ha; além disso, requer a separação do bagaço (mucilagem) rico em substâncias aquosas, que consiste opção viável para alimentação animal nos períodos de estiagem (Carvalho et al., 1994). Outros resíduos de interesse para a construção civil, denominados refugo, bucha branca e fibras curtas, são aqueles resultantes do beneficiamento e da produção de fios e cordas: trata-se de fibras de diversos comprimentos, quase isentas de pó, sem tratamento químico e consideradas subprodutos, em decorrência do baixo valor de mercado (tabela 3.2). Já a fabricação de *baler twine* (fio agrícola para exportação), cuja produção em 1996 pelas sete maiores empresas do setor ultrapassou a marca de 36 mil toneladas (fonte: Cosibra, João Pessoa, PB), origina outro tipo de bucha e fibras muito curtas (menos de 1 cm de comprimento) impregnadas com emulsão à base de óleo mineral na proporção de 16% em massa de fibra. Para uso em componentes construtivos, esse tratamento tem o aspecto positivo de reduzir a absorção de água pela fibra, porém estudos são necessários quanto à observação das condições de aderência fibra-matriz, interferência na hidratação de aglomerantes e combustibilidade. A produção de tapetes, um nicho de mercado promissor para o sisal brasileiro, também é fonte de resíduos sem qualquer valor comercial e com potencialidade de aproveitamento como reforço, por estarem livres de pó e com permeabilidade reduzida (fibras previamente submetidas a processo de impregnação a quente). A figura 3.1 mostra fibras em gaiola metálica, durante processo de tingimento, na fábrica de tapetes da Associação dos Pequenos Agricultores do Município de Valente (Apaeb) na Bahia.



Fig. 3.1 Fibras de sisal sob tingimento, à base de anilina.

3.2.2 Piaçava

Alguns dados da região agrícola de Valença, BA, em 1996: produção momentânea extrativa de 3,3 mil toneladas, 140 unidades produtivas e produtividade média anual de 480kg de fibra bruta por hectare. Na fase de limpeza e penteadura manual da fibra (figura 3.2) cerca de 30% de refugo, atualmente queimados ao ar livre, podem ser aproveitados, desde que separados da palha. Isto poderia constituir complementação de receita para os colhedores de piaçava, que recebem o equivalente a US\$ 0,55/kg de fibra limpa. Outro resíduo de fácil aproveitamento advém das fábricas de vassoura, em que se descartam fibras com menos de 50 cm de comprimento.



Fig. 3.2 Penteadura e limpeza de fibras de piaçava.

3.2.3 Coco

A agroindústria brasileira dessa fibra, com produção de artigos têxteis superior a 5,4 mil toneladas em 1995 (Textília, 1996) pode originar fibras de 1 a 3 cm (comprimento considerado ideal para reforço de matrizes cimentícias) hoje pouco direcionadas a outras aplicações. É notória a ociosidade da capacidade instalada de produção de fibras, com indústrias paradas ou trabalhando com menos da metade de seu potencial produtivo. Na figura 3.3 observam-se as cascas do coco sendo aspergidas com água, para posterior desfibramento mecanizado, por maceração com marteletes rotativos, em indústria de trinchas e pincéis, localizada em Aracaju, SE.



Fig. 3.3 Mesocarpo do fruto do coco amontoado, antes do desfibramento.

3.2.4 Algodão e polpa de celulose de eucalipto

As fibras residuais são bastante curtas (comprimento inferior a 5 mm) o que as direciona para reforço de pastas; além disso, são disponíveis a preço relativamente baixo e de forma concentrada geograficamente, junto aos grandes centros geradores.

3.2.5 Rami

Os resíduos de amaciamento, apesar de sem valor comercial, são utilizados como adubo orgânico nas próprias lavouras de produção. Assim, o aproveitamento dessa fibra deverá

ser acompanhado de reformulação das práticas de cultivo. Por outro lado, a agroindústria do rami carece de utilizações alternativas para seus produtos e subprodutos, haja vista a grande concorrência de fibras sintéticas e naturais importadas.

3.2.6 Banana

Conforme reportado por Nolasco (1997), o potencial produtivo dessas fibras de excelente qualidade é muito grande, e as regiões geradoras estão relativamente próximo de grandes centros populacionais, no sul e sudeste do país. No entanto, a fibra ainda não é extraída do pseudocaule, em escala comercial, o que indica que sua utilização, para reforço de componentes construtivos, é viável apenas a médio prazo.

3.2.7 Malva

A produção, segundo estimativa de técnicos do Instituto de Fomento à Produção de Fibras Vegetais da Amazônia (Ifibram) varia atualmente entre 6000 e 8000 t/ano, quase exclusivamente oriunda dos Estados do Pará e Amazonas. Diversos subprodutos (denominação técnica: tipo 4, bucha, *cutting* e aparas; valor de mercado: de US\$ 340,00/t a US\$ 900,00/t) já enfrentam forte concorrência de produtos sintéticos.

3.2.8 Seleção de resíduos

Com base nas informações anteriormente apresentadas, foram pré-selecionados seis resíduos vegetais listados a seguir:

- Bucha verde de campo do sisal. Aspectos positivos: grande disponibilidade, interesse comercial quase nulo e possibilidade de complementação de renda dos produtores agrícolas. Aspectos negativos a serem contornados: necessidade de limpeza da fibra e grande dispersão geográfica.
- Bucha de máquina da produção de *baler twine*. Pontos fortes: fibras praticamente livres de pó residual e grande produção concentrada em pequeno número de empresas processadoras. Ponto fraco: tratamento à base de óleo mineral, que pode

afetar as propriedades mecânicas da fibra, além de interferir na sua aderência com a matriz.

- Fibrinhas extraídas do pó residual do coco. Pontos fortes: reduzido valor de mercado, aproveitamento atual desprezível e grande potencial de produção; além disso, características microestruturais (ver item 3.4 e Savastano Jr. et al., 1994) justificam a superioridade da fibra de coco, no que se refere à durabilidade em meios alcalinos. Ponto fraco: necessidade de separação do pó e secagem.
- Rejeito de polpa celulósica de eucalipto. Vantagens: valor de mercado quase nulo e grande quantidade disponível. Desvantagem: fibras muito curtas e necessidade de secagem, para barateamento do transporte.
- Fibra do pseudocaule da bananeira. Grande disponibilidade e baixo custo de produção, desde que extraída por processos elementares. Possível fonte alternativa de renda, para produtores de banana do Vale do Ribeira, região de pouco desenvolvimento econômico do Estado de São Paulo, e ao mesmo tempo perto de grandes centros urbanos.
- Malva tipo 4: subproduto que alcança preços relativamente altos (tabela 3.2), porém com boa potencialidade de uso futuro, na construção civil, tendo em vista a tendência de redução em sua participação no mercado têxtil.

3.3 Propriedades físicas dos resíduos

As principais propriedades físicas dos resíduos selecionados nesta fase da presente pesquisa foram determinadas e estão listadas na tabela 3.3. Para efeito de referência, seguem, na tabela 2.2, propriedades mecânicas de fibras similares, a partir de resultados apresentados por Nolasco et al. (1998), Agopyan; Savastano Jr. (1997) e Swamy (1988). As fibras utilizadas no reforço de matrizes à base de cimento (ver capítulo 4^o) foram picadas com guilhotina (do tipo empregado para corte de papel) e seus comprimentos determinados com o auxílio de uma régua de precisão 0,5 mm. A fibra da polpa de celulose, muito mais curta, teve seu comprimento determinado pelo equipamento Kajaani FS-200, um analisador óptico automatizado usual na determinação de propriedades físicas de fibras curtas (com menos de 7 mm de comprimento). Já o diâmetro de todas as fibras foi encontrado por intermédio de microscópio eletrônico de

varredura DSM940A-Zeiss, com as amostras previamente metalizadas em ouro por 120 s num metalizador Balzers Union, MED-010. Os mesmos equipamentos e processo de preparo foram utilizados para obtenção de micrografias dos resíduos pré-selecionados, conforme exposto no item 3.4.

Tabela 3.3 Propriedades físicas dos resíduos pré-selecionados.

Fibra	Comprimento médio* (mm)	Diâmetro médio* (µm)	Massa espec. real** (kg/m ³)	Massa espec. aparente** (kg/m ³)	Vol. vazios permeáveis** (%)	Absorção máxima** (%)
Sisal bucha verde	22,0	187	1104	280	77,3	201
Sisal bucha <i>baler twine</i>	23,8	204	1387	400	72,4	151
Coco pó residual	20,6	223	1165	370	73,1	146
Rejeito de polpa de eucalipto	0,66	10,9	1609	230	89,2	643
Banana	19,1	154	1031	170	84,5	407
Malva	23,8	42,6	1374	254	81,5	377

(*) Desvios padrão da ordem de 50% das médias

(**) NBR-9778

3.4 Análise microestrutural

A micrografia da bucha verde do sisal (figura 3.4) mostra a fibra recoberta por mucilagem (que pode atuar como retardador da pega de aglomerantes hidráulicos) e ainda com fibrilas e estrias no sentido longitudinal. A bucha de *baler twine*, vista na figura 3.5, já apresenta grande alteração superficial da fibra, em vista dos processos mecânicos e do tratamento com óleo mineral. A fibra de coco (figura 3.6) possui formato cilíndrico e com protuberâncias superficiais, que auxiliam a ancoragem da fibra nas matrizes reforçadas; além disso, constata-se a existência de estrutura fechada, em que as células estão protegidas por camada celulósica externa. Por último, o rejeito de celulose (ver figuras 5.13 e 5.14) apresenta morfologia diferenciada, com fibras semelhantes a fitas retorcidas e bastante alteradas pelos processos químicos associados à produção da polpa.

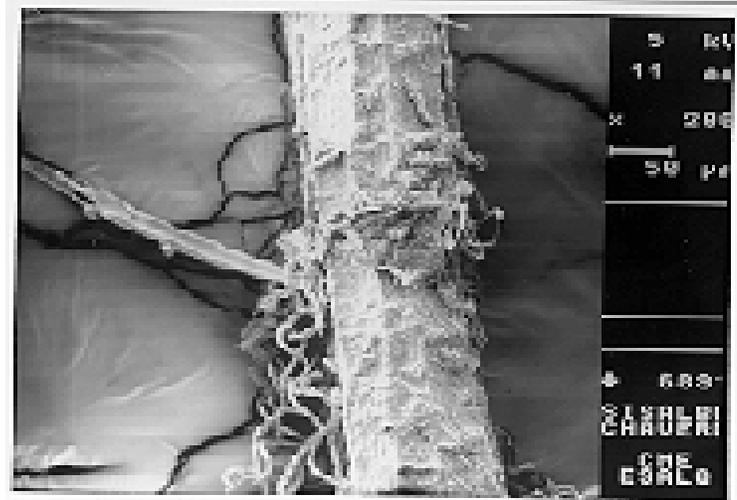


Fig. 3.4 Bucha verde de campo do sisal.

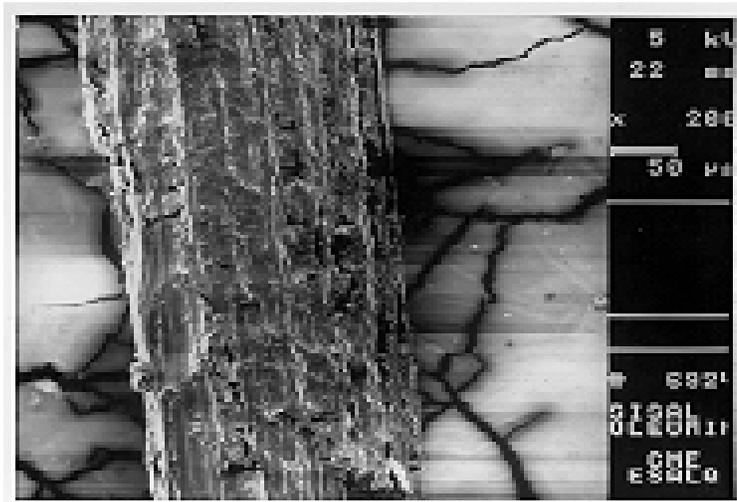


Fig. 3.5 Bucha de máquina da produção de fio agrícola (*baler twine*).

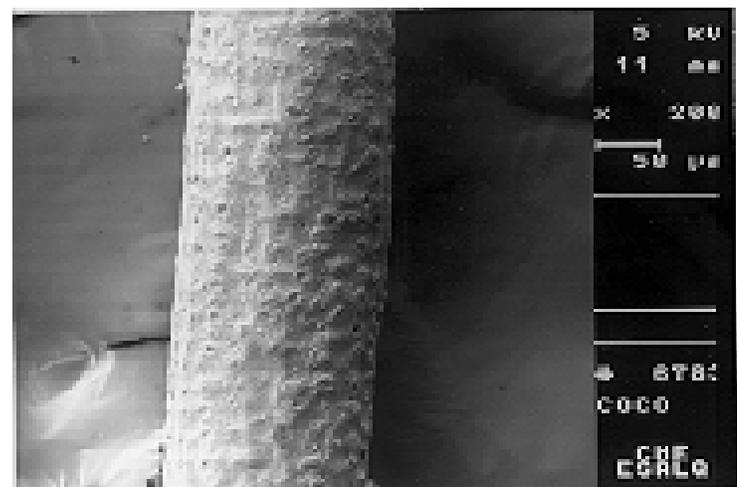


Fig. 3.6 Fibrinhas do pó residual de coco.

3.5 Comentários adicionais

As avaliações de disponibilidade confirmaram a existência de seis resíduos com maior potencial de aproveitamento e preços competitivos frente a outras fibras substitutas (preço internacional de polipropileno por volta de US\$ 900/t). Além disso, ganha-se com a menor poluição ambiental, maior receita para o setor produtivo e utilização de fibras consideradas não nocivas à saúde do trabalhador da indústria da construção civil.

4 MATRIZES CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM FIBRAS RESIDUAIS PARA PRODUÇÃO DE TELHAS DE COBERTURA

Existem, no Brasil, diversas experiências do uso de matrizes à base de cimento reforçado com fibras naturais, para produção de componentes construtivos, como telhas, painéis de vedação vertical, caixas d'água e pias de cozinha, conforme já abordado no capítulo 2º. Em todo o mundo, esses fibrocimentos alternativos já fazem parte de programas de transferência tecnológica, especialmente no que se refere a sistemas de cobertura de baixo custo, como reportado por Delvasto et al. (1995), Gram; Gut (1994) e Saxena et al. (1992). Iniciativas dessa natureza encontram grande interesse econômico e ambiental, nas situações direcionadas à construção rural (Swift, 1985) e ao aproveitamento de resíduos (Soroushian et al., 1995b e Basin-Ras, 1994).

No presente capítulo, são apresentados resultados físicos, mecânicos, microestruturais e de durabilidade de produtos à base de cimento reforçados com fibras residuais, de acordo com pré-seleção exposta no capítulo 3º.

4.1 Compósitos e componentes com matriz à base de cimento Portland

4.1.1 Preparação e ensaio dos compósitos

Na primeira etapa da pesquisa, com o objetivo de avaliação dos resíduos fibrosos, foram produzidos compósitos com matriz de argamassa de cimento Portland CPII-32F (composto) e areia lavada de rio (módulo de finura = 2,12, dimensão máxima característica = 2,4 mm) segundo os seguintes procedimentos:

- Relação cimento:areia: 1:1,5.
- Relação água/cimento: 0,5 e 0,4.
- Teor em volume de fibra: 2%.
- Tipos de fibra: sisal (bucha de campo e bucha de *baler twine*), pó residual não peneirado de coco, rejeito de polpa celulósica de eucalipto, banana, malva “tipo 4” e padrão sem fibra.

- Mistura e moldagem manual do compósito. Adensamento com golpes de soquete metálico com 25 mm de diâmetro (4 camadas e 30 golpes por camada, no caso de corpos-de-prova cilíndricos). Cura por imersão em água, durante 7 dias, e ao ar (ambiente de laboratório) até a data dos ensaios aos 28 dias de idade (ou 42 dias, no caso do ensaio de flexão).

A relação água/cimento igual a 0,5 foi necessária para garantir a homogeneidade dos compósitos, durante a mistura, em decorrência do emprego das fibras e da sua elevada absorção de água. Já no caso do padrão sem fibra, a relação água/cimento pôde ser mantida mais baixa, igual a 0,4, com índice de consistência adequado à moldagem dos corpos-de-prova e das telhas.

As fibras residuais utilizadas como reforço foram pré-selecionadas, preparadas e caracterizadas conforme exposto nos itens 3.2 a 3.4.

Em uma das séries, fibra de coco e polpa celulósica de eucalipto foram usadas em conjunto, em volumes iguais (2% em volume da matriz, para cada uma), o que representou o dobro do volume de fibra usado nas outras misturas. Isso foi possível em razão do pequeno comprimento das fibras da polpa celulósica (~0,7 mm), apesar da homogeneização particularmente difícil desta formulação.

Para caracterização dos compósitos na condição recém-misturada, optou-se pela determinação da massa específica e do índice de consistência (mesa de consistência ou *flow-table*). Os ensaios na condição endurecida, cada um deles com seis repetições por série, foram, por seu turno: tração na flexão com quatro cutelos (vão inferior de 270 mm), utilizando-se corpos-de-prova prismáticos de 300 mm x 150 mm x 5 mm (Rilem, 1984), compressão axial (corpos-de-prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura) e tração por compressão diametral (corpos-de-prova idênticos aos do ensaio de compressão axial). O equipamento utilizado para todos os testes mecânicos apresentados acima foi uma máquina universal de ensaios Emic DL 30000, com velocidade de carregamento igual a 5 mm/min e monitorização pelo programa computacional M-Test, versão 1.01/96. A célula de carga empregada foi de 5 kN, para ensaio de flexão, e de 300 kN para os demais.

4.1.2 Preparação e ensaio das telhas

A seguir, foram moldadas três telhas por série, conforme a mesma dosagem já descrita no item 4.1.1. Seu formato, similar ao das telhas cerâmicas tipo “romana”, apresenta as dimensões (medidas do quadro de moldagem) de 487 mm x 263 mm. Na fabricação, utilizou-se equipamento da Parry Associates, Reino Unido, para moldagem e adensamento por vibração das telhas, procedendo-se inicialmente ao ajuste dos principais fatores produtivos envolvidos, conforme exposto a seguir. Tal equipamento consiste numa simples mesa vibratória, acionada por motor elétrico de 736W de potência, à qual se acopla o quadro metálico, assentado sobre um filme plástico removível, este último com a função de facilitar a retirada da placa recém-moldada. A seguir, o quadro é suspenso (figura 4.1) e o conjunto plástico-placa arrastado para uma fôrma ondulada, que confere à telha seu formato final (figura 4.2). Após 24 horas, as telhas foram desformadas e os filmes plásticos destacados de suas superfícies (aquelas em contato com as fôrmas), seguindo as telhas para cura úmida em atmosfera saturada por 7 dias. Por fim, as telhas foram conservadas em ambiente de laboratório, até a data dos testes.

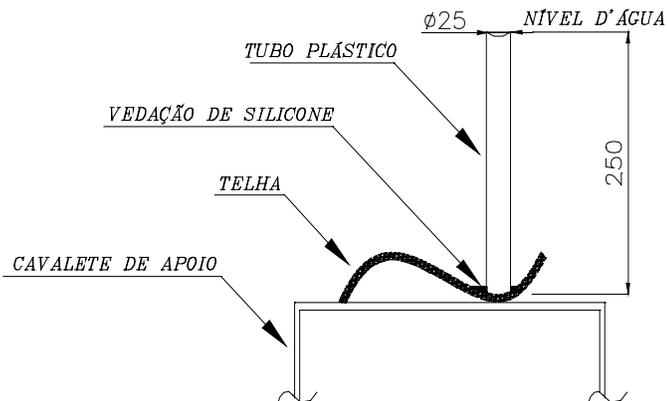


Fig. 4.1 Produção da telha. Placa recém-moldada e vibrada.



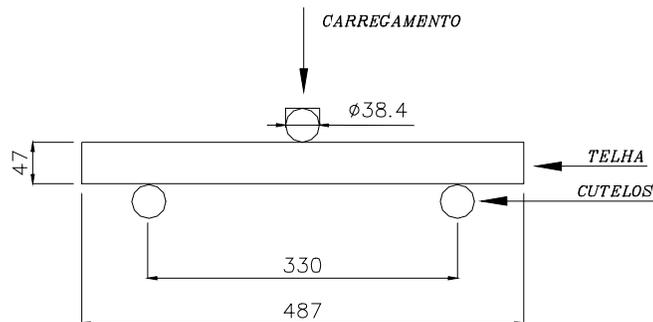
Fig. 4.2 Telha sendo transferida para fôrma ondulada.

Os principais ensaios na condição endurecida, aos 28 dias de idade, foram: empenamento (ao ser apoiada em um plano horizontal, afastamento entre qualquer ponto de contato da telha e esse plano), permeabilidade (ver esquema do ensaio na figura 4.3), absorção de água e desempenho mecânico à flexão com três cutelos (velocidade de carga de 100 ± 10 N/s, equipamento Emic DL 30000 com célula de carga de 5kN e programa de controle M-Test v.1.01/96), conforme esquema do ensaio na figura 4.4. O ensaio de flexão, realizado com as telhas saturadas de água, era interrompido ao se constatar redução de 70% da carga máxima de ruptura, para efeito do cálculo da energia absorvida (área sob a curva no gráfico carga x deformação).



Legenda: vista frontal sem escala, medidas em mm

Fig. 4.3 Esquema de ensaio de permeabilidade de telhas (NBR 13858-2).



Legenda: vista lateral sem escala, medidas em mm

Fig. 4.4 Dispositivo de ensaio de flexão para telhas, com três cutelos retilíneos (NBR 13858-2).

4.1.3 Propriedades dos compósitos

Na condição recém-misturada, os compósitos mostraram massa específica inferior à da matriz de referência (tabela 4.1), justificável pela presença das fibras, que possuem reduzida massa específica aparente (tabela 3.3), além de agirem como agentes incorporadores de ar. As fibras ocasionaram, também, a redução da trabalhabilidade dos compósitos, o que se percebe pelos menores índices de consistência (tabela 4.1), mesmo com o emprego de relação água/cimento maior do que para a matriz sem fibra.

Tabela 4.1 Propriedades físicas e mecânicas dos compósitos à base de cimento Portland.

Fibra	Massa espec. - condição recém- misturada (kg/m ³) ⁽¹⁾	Índice de consistência (mm) ⁽²⁾	Resist. à tração na flexão aos 42 dias (MPa) ⁽³⁾	Energia de fratura na flexão aos 42 dias * (N.mm) ⁽³⁾	Resist. à compressão aos 28 dias (MPa) ⁽⁴⁾	Res. à tração aos 28 dias (MPa) ⁽⁵⁾
Padrão sem fibra	2148	316	5,84	283	37,3	4,61
Sisal bucha de campo	2024	220	3,44	237 **	19,8	2,82
Sisal bucha de <i>baler twine</i>	1996	240	5,20	4097	17,7	3,88
Coco pó residual	2056	259	4,48	440	25,8	3,95
Rejeito de polpa de eucalipto	2042	156	5,32	417	23,2	3,68
Banana	2036	288	4,54	341	22,5	3,48
Malva tipo 4	2067	182	4,75	1338	16,1	3,69
Coco + polpa de eucalipto	1794	256	3,11	478	12,5	3,34

(*) Ensaio interrompido ao se atingir 70% de redução da carga máxima

(**) Ensaio interrompido ao se atingir 50% de redução da carga máxima

Normas de ensaio: (1) NBR-9833; (2) NBR-7215; (3) Rilem (1984); (4) NBR-5739; (5) NBR-7222

Os resultados das propriedades mecânicas (tabela 4.1) mostraram que o padrão sem fibra atingiu as resistências mais elevadas, tanto à tração como à compressão, o que pode ser explicado pela menor relação água/cimento empregada para o padrão, com aumento da compactidade do material. Com exceção da formulação com fibras de sisal bucha do campo, todas as demais apresentaram absorção de energia superior à da matriz de referência.

Os comportamentos descritos acima foram compatíveis aos de compósitos estudados em outros experimentos. No caso de pastas reforçadas com papel desagregado, Agopyan (1991) apresentou valores de resistência à tração na flexão, aos 7 dias de idade, da ordem de 5 MPa, para teor de 2% em volume de fibras, aproximadamente a metade da resistência registrada para o padrão sem fibra. Resultados apresentados por Tolêdo Filho (1997), para argamassas de cimento reforçadas com fibras naturais permeáveis, também permitem associar baixas resistências mecânicas ao maior volume de vazios, porém com a compensação de aumento da energia absorvida pelas fibras, durante o processo de fissuração da matriz frágil.

Os compósitos com reforço de fibra de sisal bucha de campo apresentaram fraco desempenho, pela presença elevada de extrativos e impurezas (mucilagem, p. ex.) que devem interferir, de modo negativo, na hidratação do cimento Portland, especialmente perto da interface fibra-matriz (Savastano Jr.; Agopyan, 1999). Esses resultados indicam a necessidade de tratamentos prévios da fibra, como lavagem e/ou fervura, uso de técnicas de "mineralização" (Ramírez Sarmiento; Freire, 1997), ou mesmo sua delignificação (Coutts; Warden, 1992). O compósito contendo combinação de dois tipos diferentes de fibra (coco e polpa de eucalipto) apresentou, também, baixas resistências (sob solicitações de tração e compressão) o que deve ser associado ao volume excessivo (4% no total) de fibras, com conseqüente distribuição heterogênea no interior da matriz.

A fibra de sisal bucha de *baler twine* originou compósito com elevada absorção de energia (14,5 vezes maior que a da matriz sem fibra) no ensaio de flexão, isso demonstrando bom desempenho do fibrocimento na condição pós-fissurada, com predomínio de arrancamento das fibras, em lugar de sua ruptura frágil, o que é justificável pela junção de diversas características dessa fibra em particular (tabelas 2.2 e 3.3): elevada resistência mecânica, tratamento para impermeabilização recebido

durante processamento e relação comprimento/diâmetro adequada (em torno de 100, conforme sugerido por Coutts, 1988). Para esse mesmo compósito, a resistência à tração na flexão (10% inferior à do padrão) e à tração por compressão diametral (15% inferior à do padrão) estão entre as melhores registradas para os compósitos estudados.

O compósito reforçado com fibras de malva também apresentou absorção de energia elevada, quase 5 vezes maior que o padrão. Neste caso particular, é possível que o aspecto fibrilado da fibra tenha colaborado para a maior superfície de contato com a matriz e aumentando, assim, a dissipação de energia.

4.1.4 Caracterização das telhas

As telhas apresentaram propriedades físicas (tabela 4.2) consideradas satisfatórias, segundo critérios da NBR-13858-2:

- O empenamento, importante na avaliação do encaixe das telhas, foi inferior a 3 mm, ponto favorável do processo de fabricação empregado, exceto no caso da formulação com fibra de banana.
- A permeabilidade não ultrapassou a manifestação de mancha, na face inferior da telha, após 24h sob pressão de coluna d'água de 250 mm, o que também é aceitável segundo Gram; Gut (1994).
- Conforme observado na condição recém-misturada, a inclusão de fibras contribuiu para tornar as telhas mais leves, tanto pela reduzida massa específica aparente da fibra (tabela 3.3) como, também, pela incorporação de ar durante a mistura dos compósitos. De acordo com a justificativa anterior, e levadas em consideração as diferentes espessuras das telhas, mostraram-se mais leves aquelas reforçadas com fibras de sisal e banana, com massa cerca de 20% inferior ao padrão. Em caso de necessidade, frente ao efeito do vento, o sistema de fabricação prevê um dispositivo para amarração das telhas.
- A absorção de água, após imersão por 24 horas, mostrou-se sempre inferior a 15%, o que é aceitável pela NBR-7581 (especificação para telha ondulada de fibrocimento). A menor absorção foi registrada para o padrão sem fibra, com menor volume de vazios capilares e também maior massa específica.

Tabela 4.2 Propriedades físicas e mecânicas das telhas à base de cimento Portland, aos 28 dias de idade (NBR-13858-2).

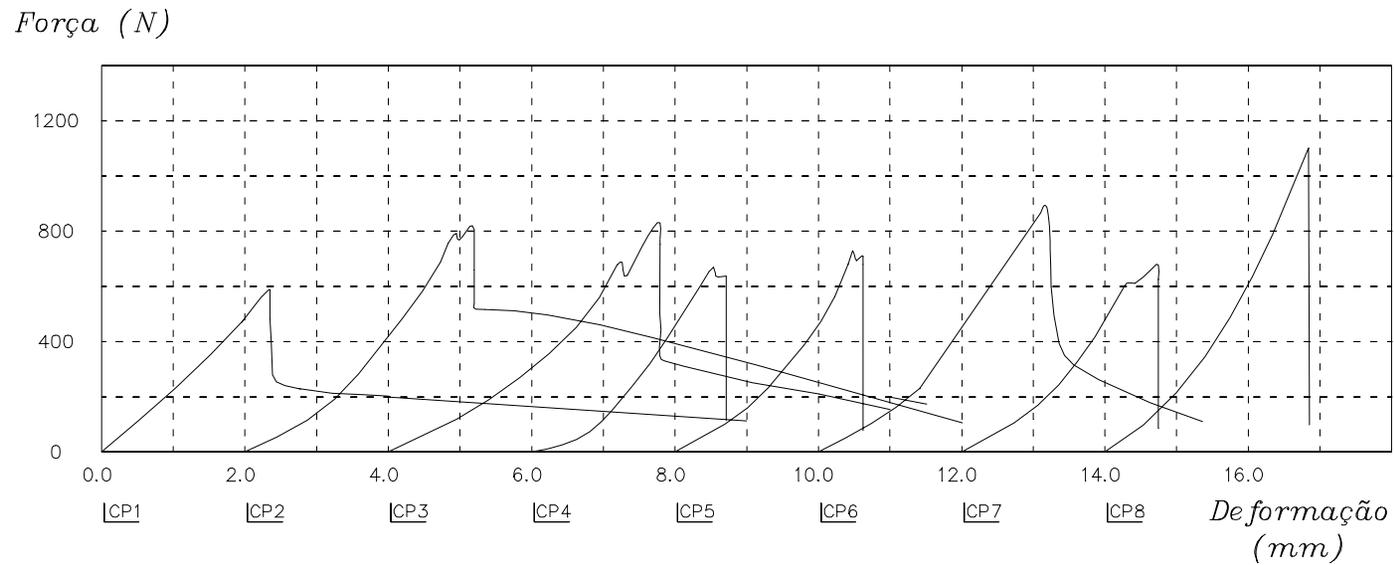
Fibra	Empenamento (mm)	Permeabilidade	Absorção de água em massa (%)	Massa seca em estufa a 100°C (g)	Espessura (mm)	Força de ruptura na flexão (N)	Energia específica (J/m ²)
Padrão sem fibra	2,02	Nada	10,7	2700	10,9	1012	433
Sisal bucha de campo	0,95	Mancha	13,6	2547	12,0	607	451
Sisal bucha de <i>baler twine</i>	0,85	Nada	13,4	2605	12,3	864	854
Coco pó residual	2,10	Nada	13,4	2594	11,8	845	470
Rejeito de polpa de eucalipto	2,05	Nada	12,3	2555	11,5	768	348
Banana	3,23	Nada	13,7	2611	12,2	681	273
Malva fibra tipo 4	0,60	Mancha	13,5	2763	12,9	804	435
Coco + polpa de eucalipto	1,90	Nada	12,8	2490	10,6	717	393

O desempenho mecânico (tabela 4.2) diferenciou positivamente alguns tipos de fibra empregados, no que se refere à energia específica (energia de fratura dividida pela área da seção transversal da telha). As telhas reforçadas com fibras de sisal, coco e malva, atingiram energia à flexão, na condição pós-fissurada, superior ao padrão sem fibra, além da vantagem de ausência de ruptura frágil do componente. Como discutido para os compósitos no sub-item anterior (tabela 4.1), a maior absorção de energia foi alcançada com o reforço de fibra de sisal *baler twine*, quase o dobro da matriz de referência.

A figura 4.5 ilustra curvas de força x deformação do teste de flexão para telhas com diversos tipos de fibra, tomando-se por base que a curva apresentada para cada corpo-de-prova (CP) seja representativa das demais repetições da mesma série. Na primeira fase do ensaio, após acomodações do dispositivo de carregamento, observa-se zona aproximadamente elástica, até que a primeira fissura da matriz seja atingida. Em alguns casos (CP 2 e CP 3, p. ex.), ocorre a breve manutenção ou mesmo acréscimo da força aplicada, pelo efeito de reforço das fibras que atravessam a região das microfissuras recém-iniciadas na matriz. Conforme apontado por Tolêdo Filho (1997), esse comportamento do compósito resulta da combinação ótima entre fração volumétrica e comprimento das fibras.

Após fissuração da matriz, mesmo com significativa redução da força suportada, as telhas reforçadas com fibras de sisal, coco e malva mostraram capacidade suplementar de absorção de energia, em lugar do colapso instantâneo observado para os demais compósitos e matriz sem reforço.

Os resultados de força máxima no ensaio de flexão, foram comparados às especificações propostas por Gram; Gut (1994), segundo as quais telhas produzidas por meio de processo semelhante ao do presente estudo, devem resistir a carregamento mínimo de 680 N (85% de 800 N, para telhas saturadas e com espessura em torno de 10 mm) no referido ensaio adotado. Com exceção das telhas reforçadas com fibras de sisal bucha de campo, as demais apresentaram comportamento aceitável, apesar do melhor desempenho do padrão sem fibra.



Legenda dos tipos de reforço: CP1 = sisal bucha de campo, CP2 = sisal bucha de *baler twine*, CP3 = coco, CP4 = polpa de eucalipto,

CP5 = banana, CP6 = malva, CP7 = coco + polpa de eucalipto, CP8 = padrão sem fibra.

Fig. 4.5 Curvas de força x deformação das telhas ensaiadas à flexão.

Em experimento análogo reportado na literatura (RAS Technical Bulletin, 1994), telhas de argamassa de cimento reforçadas com 1% em volume de fibras cortadas de sisal, sofreram redução de 30% da resistência à tração na flexão, em relação ao padrão, aos 14 dias de idade. No mesmo caso, a capacidade de absorção de energia, em ensaio de impacto, chegou a triplicar pela presença das fibras.

4.1.5 Considerações adicionais

A partir dos resultados obtidos até o momento, a presente pesquisa manterá a mesma linha de substituição de materiais convencionais por resíduos de baixo custo, porém com adaptações no processo produtivo que permitam a redução da relação água/cimento e da porosidade do compósito.

Com exceção das telhas reforçadas com fibra de sisal bucha de campo (capacidade de carga inferior a 680 N) e fibra de banana (empenamento superior a 3 mm), as demais telhas produzidas a partir dos compósitos em estudo, atenderam às especificações de normas técnicas pertinentes, apesar do maior suporte de carga e menor absorção de água apresentada pelo padrão sem fibras. Dos resíduos selecionados, as fibras de sisal bucha de *baler twine* apresentaram a melhor capacidade de reforço da telha à base de cimento Portland, com destaque para a elevada absorção de energia na condição pós-fissurada.

Estudos futuros são necessários para melhoria do desempenho mecânico dos componentes, que deverão incluir tratamento prévio das fibras e adensamento mais eficiente dos compósitos, porém mantido o compromisso de baixo custo de produção.

4.2 Compósitos e componentes com matriz à base de escória de alto-forno

4.2.1 Desempenho físico e mecânico dos compósitos

Em conjunção com a etapa experimental exposta no item 4.1, bem como a partir de informações de experimentos reportados na bibliografia consultada (Agopyan, 1991 e John, 1995), optou-se por compósitos com matriz de argamassa à base de escória de alto-forno, reforçados com fibras vegetais, segundo os procedimentos abaixo.

- Relação aglomerante:areia grossa: 1:1,5.
- Relação água/aglomerante: 0,5.
- Teor em volume de fibra: 2%.
- Tipos de fibra: conforme resultado da pré-seleção (item 3.2) e da sua disponibilidade para testes laboratoriais. Todas as fibras foram cortadas em comprimentos médios em torno de 20 mm (ver tabela 3.3), exceto o rejeito da polpa de celulose.
- Aglomerante: cimento de escória básica granulada de alto-forno (composição química na tabela 4.3 e fase vítrea = 99,5% em massa, determinado por microscopia óptica), procedente da Companhia Siderúrgica Tubarão (CST), Espírito Santo, e moído até finura Blaine média de 500 m²/kg, utilizando-se um moinho laboratorial de cargas esféricas. Com base em estudos anteriores (Bijen, 1996, John et al., 1990 e Regourd, 1986), optou-se pela ativação química da escória, por produtos alcalinos: fosfogipso (sulfato de cálcio diidratado, composto de SO₃ - 41,3%, CO₂ - 0,26% e água combinada - 18,7%) resíduo de indústria de fertilizantes em Cubatão, SP; e hidróxido de cálcio tipo CH1 (classificação conforme NBR-7175), marca Supercal (composição química na tabela 4.4). A composição do aglomerante seguiu a proporção 0,88:0,10:0,02 (escória:fosfogipso:cal).
- Mistura, adensamento e cura dos compósitos produzidos, conforme apresentado no item 4.1.1. Idem para ensaios no estado recém-misturado e endurecido.

Tabela 4.3 Composição química da escória granulada de alto-forno (% em massa)
(Oliveira et al., 1999).

Perda ao fogo	1,67	Na ₂ O	0,16
SiO ₂	33,78	K ₂ O	0,32
Al ₂ O ₃	13,11	S ²⁻	1,14
Fe ₂ O ₃	0,51	CaO livre	0,10
CaO	42,47	Resíduo insolúvel	0,53
MgO	7,46	CO ₂	1,18
SO ₃	0,15		

Tabela 4.4 Composição química provável da cal hidratada (% em massa).

Ca(OH) ₂	91,00	SiO ₂	1,50
Mg(OH) ₂	0,56	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	0,89
CaSO ₄	0,49	Água livre	0,36
CaCO ₃	5,60	Óxidos totais na base não volátil	92,00

Seguem, na tabela 4.5 (Savastano Jr. et al., 1998), informações referentes a ensaios físicos (estado recém-misturado) e mecânicos (28 e 42 dias de idade). A resistência à tração na flexão do compósito reforçado com fibras de celulose residual de eucalipto foi 30% superior à do padrão. A energia de fratura na flexão corresponde ao total de energia absorvida, até a redução do carregamento equivalente a 70% da carga máxima: esse resultado mostra o grande diferencial dos compósitos fibrosos, em relação à matriz sem fibras, no estado pós-fissurado.

Tabela 4.5 Propriedades físicas e mecânicas dos compósitos à base de escória de alto-forno.

Fibra	Massa espec. - condição recém- misturada (kg/m ³) ⁽¹⁾	Índice de consistência (mm) ⁽²⁾	Resist. à tração na flexão aos 42 dias (MPa) ⁽³⁾	Energia de fratura na flexão aos 42 dias (N.mm) ⁽³⁾	Resist. à compressão aos 28 dias (MPa) ⁽⁴⁾	Res. à tração aos 28 dias (MPa) ⁽⁵⁾
Padrão sem fibra	2094	322	3,41	173	20,38	2,72
Sisal bucha de campo	2052	192	4,32	515	22,32	3,39
Coco pó residual	2021	235	3,85	602	24,56	2,83
Rejeito de polpa de eucalipto	2068	164	4,46	567	15,12	2,92
Banana	1985	281	4,26	382	7,13	1,53

Normas de ensaio: (1) NBR-9833; (2) NBR-7215; (3) Rilem (1984); (4) NBR-5739; (5) NBR-7222

Observa-se ainda que a energia total absorvida pelos compósitos fibrosos à base de escória de alto-forno (tabela 4.1), no ensaio de flexão, é maior que aquela correspondente aos compósitos à base de cimento Portland (tabela 4.5), o que pode ser parcialmente explicado pela menor resistência da matriz de escória.

4.2.2 Desempenho físico e mecânico das telhas

Um tópico importante do presente estudo foi a produção de telhas à base de escória de alto-forno reforçada com fibras vegetais, nos mesmos moldes como já apresentado no item 4.1.4.

Alguns ajustes na dosagem - relação água/aglomerante igual a 0,40 e teor em volume médio de fibras de 2,5% -, empregados, nesta fase, à procura de melhoria do desempenho mecânico dos componentes, prejudicaram a homogeneidade da mistura e, por isso, passaram por novas alterações (ver item 4.3). Esse fato pode ser comprovado, ao se comparar propriedades das telhas com reforço de polpa de celulose, para relação água/aglomerante variando de 0,40 a 0,50, em que houve nítida vantagem do componente com maior relação água/aglomerante (tabela 4.6).

Em uma das séries, optou-se pelo uso conjunto de fibras de banana e polpa de eucalipto (1,25% em volume da matriz, em média, para cada uma), tendo em vista um possível efeito sinérgico entre fibras de diferentes comprimentos.

Foram testadas 6 telhas por série, segundo a dosagem descrita no item 4.2.1. Foi utilizado equipamento da Parry Associates, Reino Unido, para moldagem e adensamento por vibração das telhas, conforme já exposto no item 4.1.2.

A tabela 4.6 contém resultados dos ensaios realizados, conforme procedimentos da norma brasileira NBR 13858-2 (telhas de concreto – requisitos e métodos de ensaio):

- O empenamento foi sempre inferior a 3 mm, o que constitui ponto favorável do processo de fabricação empregado.
- Para as telhas sem fibra, com reforço de polpa de celulose (relação água/aglomerante = 0,50) ou de coco, a permeabilidade não ultrapassou a manifestação de mancha, após 24 h sob pressão de coluna d'água de 250 mm, o que é aceitável.
- A absorção de água, após imersão por 24 horas, mostrou-se sempre inferior a 20%, o que é aceitável pela NBR 7581.

Tabela 4.6 Propriedades físicas e mecânicas das telhas à base de escória de alto-forno, segundo NBR 13858-2.

Fibra	Empenamento (mm)	Permeabilidade	Absorção de água em massa (%)	Massa seca em estufa a 100°C (g)	Espessura (mm)	Força de ruptura na flexão (N)	Energia específica (J/m ²)
Padrão sem fibra	1,15	Nada	13,7	1550	7,15	342	361
Sisal - bucha de campo	2,35	Gota	13,7	1792	7,78	534	713
Coco- pó residual	1,60	Nada	13,5	1560	7,21	454	936
Polpa de celulose de eucalipto (x = 0,50)	1,13	Mancha	16,8	1410	6,62	379	435
Polpa de celulose de eucalipto	1,18	Gota	14,4	1730	8,01	298	262
Banana + polpa de celulose	1,94	Gota	14,1	1503	7,01	302	289

Obs.: Relação água/cimento (x) igual a 0,40, exceto indicação contrária.

As telhas reforçadas com fibras de sisal, polpa de celulose (relação água/aglomerante = 0,50) e coco atingiram energia à flexão, no estágio pós-fissurado, pelo menos 20% superior ao padrão sem fibra. O ensaio, realizado com as telhas saturadas de água, era interrompido ao se constatar redução de 70% da carga máxima de ruptura.

A força máxima na flexão foi analisada com base em especificações propostas por Gram; Gut (1994) para componentes similares de cobertura, que fixam carregamento mínimo de 425 N para telhas com 8 mm de espessura e saturadas. Nesse ensaio, os resultados da telha reforçada com sisal foram, em média, 50% superiores aos da telha padrão.

4.2.3 Comentários adicionais

Em vista dos resultados apresentados, pode-se resumir que os materiais reforçados com fibras vegetais são de produção tecnicamente possível e economicamente viáveis, nas regiões em que a matéria-prima é abundante.

A partir dos resultados apresentados neste item 4.2, novos ajustes foram implantados no processo produtivo, para análise do desempenho físico, mecânico e quanto à durabilidade dos componentes à base de matriz de escória de alto-forno, conforme exposto no tópico 4.3.

4.3 Durabilidade dos produtos à base de escória reforçada com fibra

A substituição do amianto por fibras vegetais para construções de baixo custo é justificada principalmente pelo preço competitivo e origem de fontes renováveis destas últimas. Como observado por Coutts (1988), países desenvolvidos atingiram produtos de celulose-cimento de alto desempenho pela adoção de tecnologias elaboradas à base de processos com consumo de energia mais elevado (similares às técnicas expostas no capítulo 6^o). Por outro lado, pesquisas em países em fase de desenvolvimento (Agopyan, 1988) concentraram-se predominantemente no uso de macrofibras (conjunto de células individuais) e processos simplificados de produção, por sua vez associados a sérias preocupações relativas à durabilidade.

Conforme já discutido no item 2.5, a presença de fibras sem proteção em meios agressivos, como é o caso de matrizes à base de cimento, pode levar à deterioração das macrofibras e à perda de ductilidade das células individuais de celulose, como também observado por Bentur; Akers (1989). O uso de cimentos com baixa alcalinidade, polpas celulósicas e regimes de cura acelerada (autoclave, p. ex.) são fatores capazes de conferir melhora do desempenho dos compósitos a longo prazo, no caminho para tornar viáveis os materiais reforçados com fibras vegetais.

Cimentos de escória de alto-forno reforçados com fibras de coco foram estudados por John et al. (1998) (ver item 2.6.2), com o desenvolvimento de painéis para uso externo com desempenho aceitável, mesmo após oito anos de exposição às intempéries e de uso efetivo. As principais vantagens reconhecidas nesses painéis foram alta resistência ao impacto, bom isolamento térmico e custo reduzido.

No presente estudo, com base nos resultados preliminares obtidos nos itens 4.1 e 4.2, foram feitos ajustes, tanto nos compósitos fibrosos, como no processo produtivo, e passou-se à produção de maior quantidade de telhas (cerca de 300 unidades, no total), de modo a permitir a análise de sua durabilidade.

Tendo em vista o enfoque social deste trabalho, manteve-se o uso de telhas delgadas e de pequenas dimensões (ver descrição no item 4.1), com ênfase em processos produtivos simplificados, de baixo consumo de energia e submetidos a cura ao ar. A análise microestrutura do material ajudou o entendimento da interação entre as fases envolvidas. Foram avaliados resultados físicos e mecânicos dos materiais após envelhecimento natural e acelerado, com a obtenção de informações valiosas para etapas futuras do desenvolvimento destes componentes de cobertura.

4.3.1 Escolha e caracterização dos materiais

Areia lavada de rio e cimento de escória de alto-forno foram os mesmos utilizados nas etapas preliminares da pesquisa, com descrições disponíveis respectivamente nos itens 4.1.1 e 4.2.1. A ativação da escória foi feita com fosfogipso e cal hidratada, nas proporções em massa de respectivamente 86%, 10% e 4%. O acréscimo no teor de cal, em relação à formulação previamente empregada no item 4.2, deveu-se a uma tentativa

de incrementar a ativação química da escória e, por conseguinte, o seu desempenho físico e mecânico.

Resíduos fibrosos escolhidos para esta etapa foram fibrinhas extraídas do pó residual de coco, bucha verde de campo do sisal e rejeito de polpa celulósica de eucalipto, cujas principais propriedades físicas constam da tabela 3.3. A escolha seguiu critérios de seleção anteriormente definidos no capítulo 3º, além de desempenho físico e mecânico aceitáveis, comparativamente aos demais resíduos em análise. Do ponto de vista da durabilidade dos compósitos a serem produzidos, pesaram ainda na escolha o fato de a fibra de eucalipto já se apresentar na forma de polpa química (proveniente de diversas etapas do processo kraft e branqueamento subsequente), com a esperada redução dos teores de componentes não-celulósicos da fibra, especialmente lignina (reduzida a cerca de 0,5% em massa, conforme Fordos, 1988). Igualmente, a escolha da fibra de coco teve o aval de experiências de sucesso reportadas no item 2.6.2. Para evitar interferência negativa no processo de hidratação da matriz de cimento, conforme detectado no item 4.1, a bucha de campo do sisal foi inicialmente fervida por 30 min, na concentração de 100g de fibra por litro de água, e, a seguir, seca em estufa a 65°C até constância de massa. Fibras de coco e sisal foram ainda cortadas mecanicamente (vide comprimentos médios resultantes na tabela 3.3).

A formulação da argamassa foi de 1:1,5 (cimento de escória:areia) em massa, com teor de fibras igual a 3,6% da massa de cimento (equivalente aproximadamente a 2% em volume do compósito). Uma das séries adotou simultaneamente as fibras de sisal e polpa de eucalipto (em volumes iguais, equivalentes a 1% em volume para cada uma), procurando-se aproveitar o bom desempenho mecânico do sisal junto à matriz de escória (ver tabela 4.6), porém na tentativa de reduzir a permeabilidade do compósito.

A relação água/cimento variou de 0,40 a 0,50 procurando-se atingir consistências próximas umas das outras e, ao mesmo tempo, adequadas ao processo de fabricação das telhas.

Durante a mistura, as matérias-primas foram homogeneizadas por aproximadamente 10 min em uma batedeira laboratorial de eixo vertical e movimento planetário.

A caracterização do compósito foi feita com base em procedimentos previamente descritos no item 4.1. No estado endurecido, aos 28 dias de idade, foram priorizados

ensaios de tração na flexão e de compressão axial, igualmente detalhados no item 4.1. Os resultados seguem na tabela 4.7 (Savastano Jr. et al., 1999).

A seguir, foram moldadas as telhas de cobertura correspondentes às formulações apresentadas neste item, e com base nos procedimentos de produção constantes do item 4.1.2. Aproximadamente 48 h após a produção, as telhas foram retiradas dos moldes e submetidas, por 7 dias, a cura úmida ao ar saturado. A seguir, os componentes foram mantidos ao ar ambiente, em laboratório, até a data dos testes, aos 28 dias de idade, no caso das séries referenciais, ou até o início dos ensaios de envelhecimento (itens 4.3.3 e 4.3.4).

4.3.2 Análise da microestrutura do compósito

Fragmentos das telhas produzidas foram analisados em microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philips XL-30, usando imagem de elétrons retroespalhados (BSEI, abreviatura para *backscattering electron image*) e espectroscopia de raio X por energia dispersiva (EDS, abreviatura para *energy dispersive X-ray spectroscopy*). Esse tipo de imagem é apropriado para análise de superfícies planas e permite o contraste entre as diversas fases do compósito, pela diferença dos números atômicos: quanto menos denso o material, mais escura a imagem. Já a análise por EDS permite a rápida obtenção qualitativa da composição química de uma região selecionada (Padilha; Ambrozio Filho, 1985). A preparação dos corpos-de-prova observou recomendações feitas por Savastano Jr.; Agopyan (1999) e envolveu impregnação por resina epóxi, lixamento seguido de polimento da superfície e aplicação a vácuo de camada condutora de carbono.

A figura 4.6 ilustra a seção transversal de uma macrofibra de coco em argamassa de cimento de escória. As células celulósicas individuais aparecem intactas, mas com fissuras radiais intermediárias, como efeito de retração por secagem. A análise pontual por EDS na lacuna central da macrofibra (figura 4.7) indica a incidência de diversos elementos químicos provavelmente provenientes de fases relacionadas à matriz de cimento, colaborando com a suposição de ocorrência do fenômeno de "petrificação" das fibras (Bentur; Akers, 1989).

Tabela 4.7 Propriedades da argamassa de escória de alto-forno reforçada com fibras vegetais (estudos suplementares).

Fibra	Escória : fosfogipso : cal : areia ; x	Massa específica - condição recém- misturada (kg/m ³)	Índice de consistência (mm)	Absorção de água (% em massa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Energia específica (J/m ²) *	Resistência à compressão (MPa)
Padrão sem fibra (Referência 1)	0,88 : 0,10 : 0,02: 1,5 ; 0,48	2107	303	nd	3,32	56	nd
Padrão sem fibra (Referência 2)	0,86 : 0,10 : 0,04 : 1,5 ; 0,40	2113	212	8,8	3,37	75	33,8
Coco pó residual	0,86 : 0,10 : 0,04 : 1,5 ; 0,48	2142	273	11,2	3,92	105	21,0
Rejeito de polpa de eucalipto	0,86 : 0,10 : 0,04 : 1,5 ; 0,48	2041	173	12,2	3,87	141	31,1
Sisal (1%) + polpa de eucalipto (1%)	0,86 : 0,10 : 0,04 : 1,5 ; 0,48	2077	201	11,2	3,02	148	25,3

x = relação água/cimento

nd = informação não disponível

(*) = ensaio interrompido ao se atingir 70% de redução da carga máxima

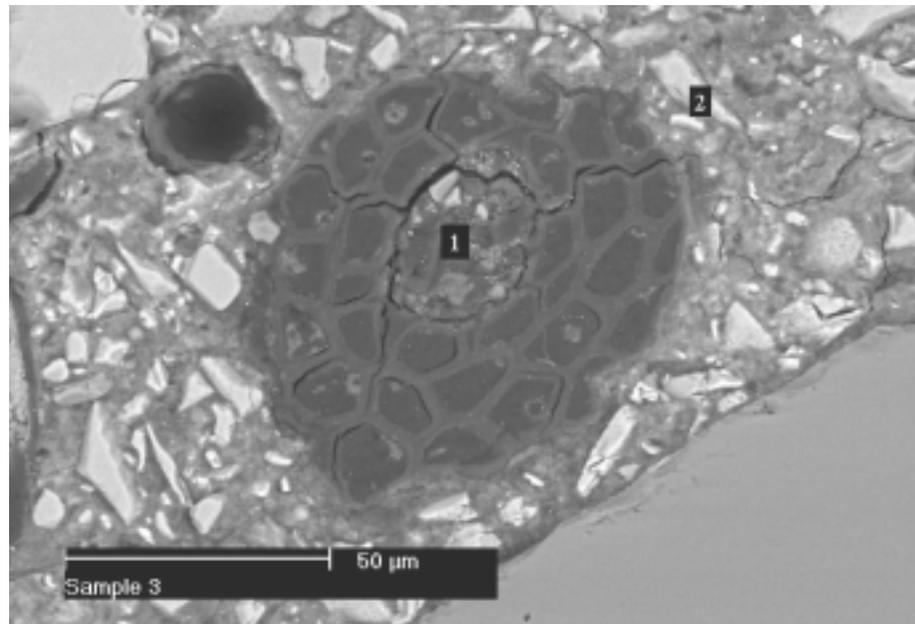


Fig. 4.6 BSEI de fibra de coco-escória. Ponto 1: lacuna central da fibra; ponto 2: grão de cimento anidro. Idade de hidratação: 42 dias.

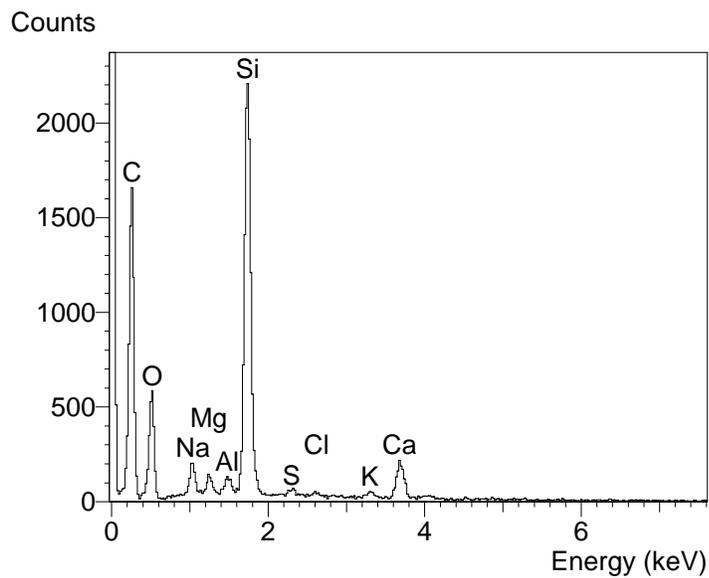


Fig. 4.7 Análise de EDS da lacuna central da fibra de coco (ponto 1 na Figura 4.6).

A figura 4.8 está relacionada ao ponto 2 da mesma micrografia e mostra o espectro de EDS de um grão anidro de escória (grãos cinza-claros na figura 4.6). Embora nenhuma medida quantitativa possa ser inferida dessa análise, os picos registrados correspondem

aos componentes principais da escória de alto-forno, em consonância com a análise química apresentada na tabela 4.3.

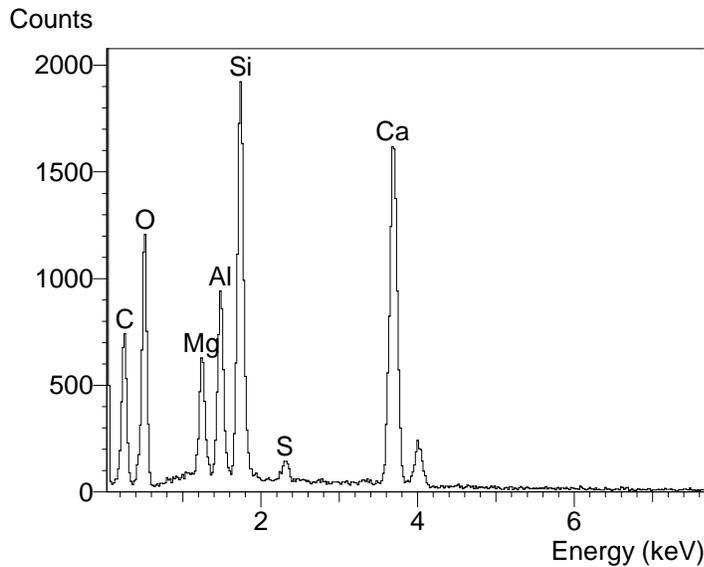


Fig. 4.8 Análise de EDS de grão anidro de escória (ponto 2 na Figura 4.6).

A imagem da figura 4.9 mostra seção longitudinal de fibra de eucalipto com uma camada maciça de produtos da hidratação do cimento em sua superfície. O espectro de EDS obtido dessa região (marca "X") é apresentado na figura 4.10 com relação $Ca/Si \sim 1,1$, o que sugere a ausência de alta concentração de cal livre perto da superfície da fibra, configurando uma vantagem das matrizes à base de escória. Em estudo similar referente à pasta de cimento Portland comum reforçada com macrofibras vegetais, Savastano Jr.; Agopyan (1999) apontaram zonas de transição com aumento localizado de porosidade e concentração de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) como fatores fundamentais relacionados ao declínio do desempenho dos compósitos no longo prazo.

A figura 4.11 focaliza uma macrofibra de sisal (região cinza-escuro), com espessura da ordem de 170 μm , imersa em matriz de cimento e com alguns grãos de areia (tom cinza-médio) nas proximidades. Em razão de sua significativa variação volumétrica, a fibra apresenta-se parcialmente desligada da matriz, como também reportado por Savastano Jr.; Agopyan (1999). O desligamento observado deve ainda ter sido agravado pelos procedimentos de secagem durante a preparação dos corpos-de-prova, bem como no

interior da câmara de alto vácuo do MEV. Tais condições de secagem não são esperadas sob situações normais de utilização do material. Fibras de eucalipto são pouco visíveis na micrografia como pontos cinza-escuros com dimensões da ordem de 20 μm .

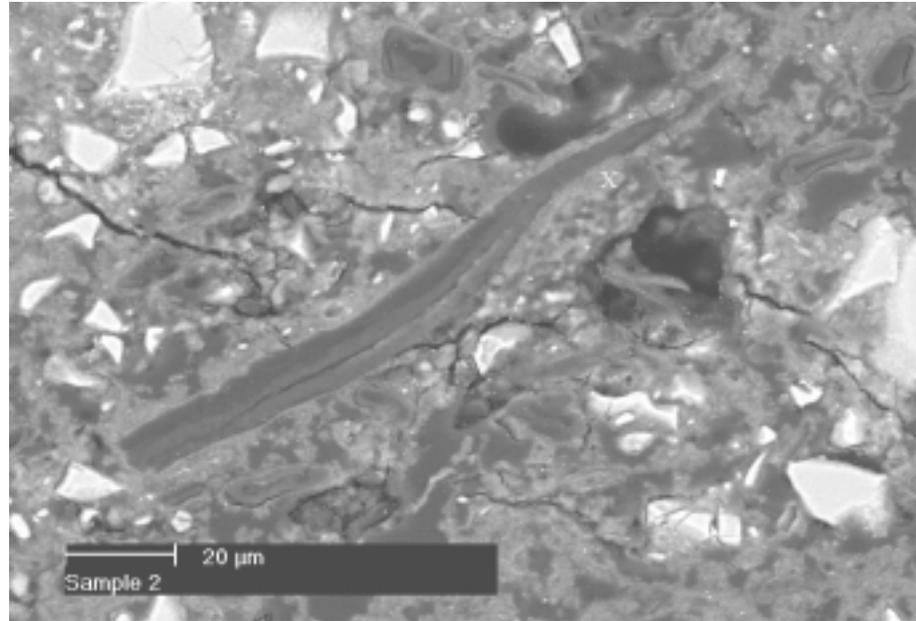


Fig. 4.9 BSEI de fibra de polpa de eucalipto em matriz de escória. O "X" marca o ponto da análise EDS da figura 4.10. Idade de hidratação: 38 dias

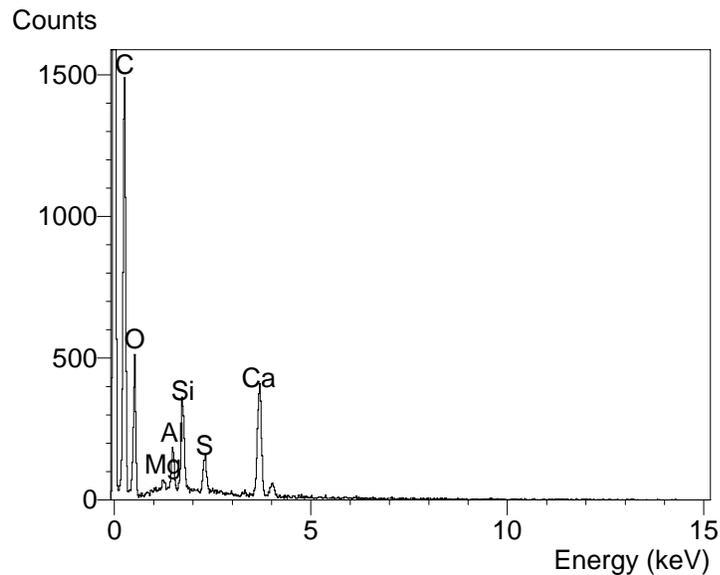


Fig. 4.10 Espectro de EDS de zona de transição entre fibra de celulose e cimento (ponto "X" na Figura 4.9).

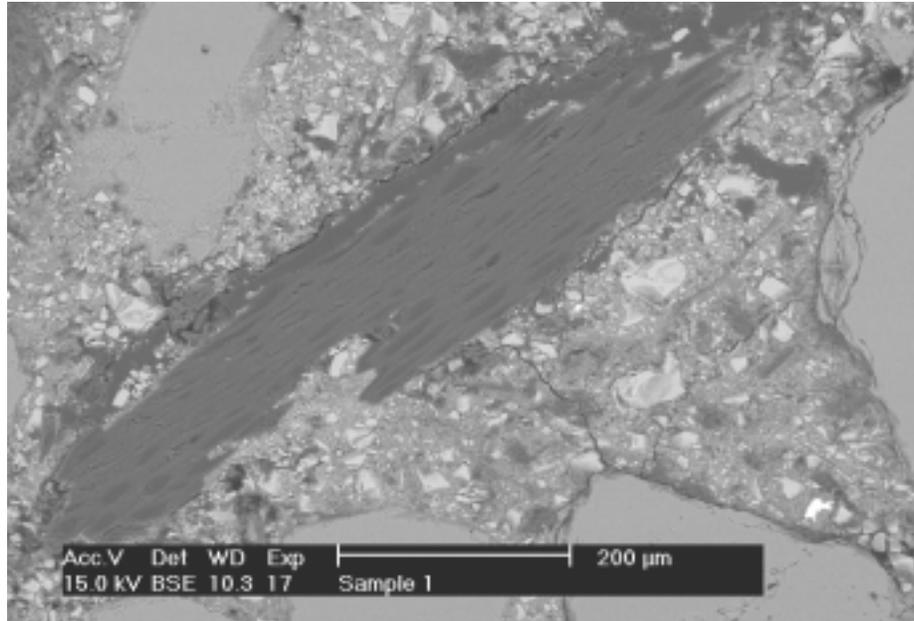


Fig. 4.11 BSEI de matriz reforçada com macrofibra de sisal e polpa celulósica de eucalipto. Idade de hidratação: 32 dias.

Em todas as três figuras apresentadas com imagem de elétrons retroespalhados, núcleos anidros de grãos de escória mostram arestas vivas e pouco atacadas, como evidência de reações químicas de pequena intensidade. Futuros estudos deverão, desse modo, considerar o emprego de ativação química e/ou térmica mais efetiva, no sentido de melhorar o desempenho físico e mecânico dos compósitos fibrosos à base de escória.

4.3.3 Avaliação da durabilidade sob envelhecimento natural

Com idades entre 60 e 70 dias a contar da produção, pelo menos 20 telhas de cada uma das três formulações de compósito, descritas na tabela 4.7, foram submetidas a envelhecimento natural, em Pirassununga, SP (latitude 21°59'S), numa bancada inclinada de 30° em relação à horizontal e voltada para a direção norte (figura 4.12). O período de efetiva exposição, avaliado até o momento, foi de 16 meses, desde julho de 1998, até novembro de 1999. As principais características climáticas do período foram: temperatura média máxima em jan./fev.99 = 27,3°C, temperatura média mínima em jul.98 = 17,6°C, umidade relativa média máxima em fev.99 = 86,6%, umidade relativa média mínima em ago.99 = 54,5% e precipitação média no período = 1514 mm/ano.



Fig. 4.12 Bancada de envelhecimento natural no Câmpus da USP de Pirassununga SP.

Para observação das propriedades mecânicas, adotou-se teste de flexão de três cutelos (vão inferior = 350 mm, velocidade de carregamento = 55 mm/min), adaptado de Gram; Gut (1994), conforme ilustra a figura 4.13. Para tanto, adotou-se máquina universal de ensaios da Emic, modelo DL-30000, sendo as telhas previamente imersas em água por pelo menos 24 h. As propriedades físicas (empenamento, permeabilidade e absorção de água) foram determinadas em conformidade com a norma NBR-13852-2, para telhas de concreto.

A tabela 4.8 apresenta os resultados físicos e mecânicos, estes últimos com coeficientes de variação da ordem de 30%, por causa das características e distribuição heterogênea das fibras residuais empregadas.

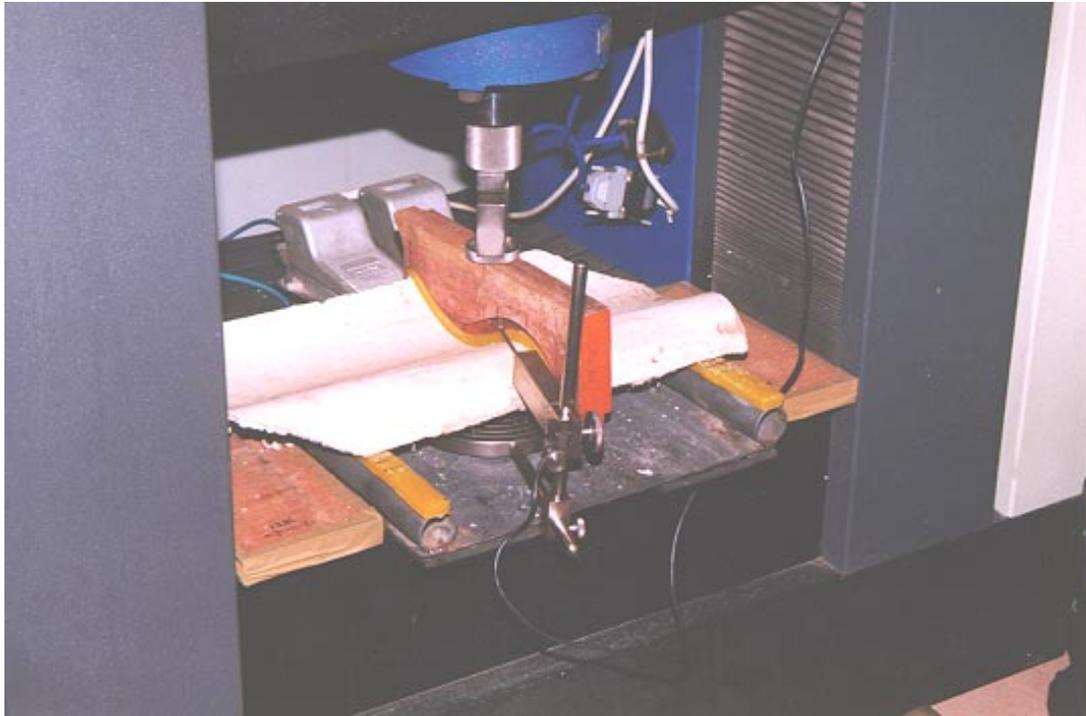


Fig. 4.13 Teste de flexão de três cutelos, para telhas, adaptado de Gram; Gut (1994).

Notar que o cutelo superior se ajusta à ondulação da telha ensaiada.

Tabela 4.8 Efeito do envelhecimento nas propriedades das telhas à base de escória de alto-forno.

Fibra	Referência sem fibra	Coco		Polpa de eucalipto		Sisal (1%) + eucalipto (1%)	
Relação água/cimento	0,40	0,45		0,48		0,50	
Idade (meses)	1	1	16	1	16	1	16
Condição	Cura ao ar	Cura ao ar	Envelhe - cimento	Cura ao ar	Envelhe - cimento	Cura ao ar	Envelhe - cimento
Empenamento (mm)	0,91	1,61	0,52	1,53	0,85	2,43	2,34
Permeabilidade	Sem marcas	Manchas		Manchas		Manchas	
Absorção de água (% em massa)	14,4	12,6	12,2	14,5	14,5	16,0	15,1
Massa seca (g)	2101	1784	1772	1640	1570	1492	1541
Espessura (mm)	9,38	7,85	8,05	7,37	7,30	7,04	6,62
Carga máxima (N)	697	482	235	587	262	447	237
Energia específica (J/m ²)	405	498	182	565	139	494	137

Para as séries ensaiadas aos 28 dias de idade (1 mês na tabela 4.8), os resultados para as principais propriedades atenderam aos requisitos sugeridos por Gram; Gut (1994) para produtos similares: (a) o ensaio de permeabilidade não detectou geração de gotas na superfície inferior da telha após 24 h sob ação de 250 mm de coluna d'água; (b) carga máxima no ensaio de flexão excedeu 425 N, como recomendado para telhas de 8 mm de espessura ensaiadas na condição saturada. Além disso, o empenamento foi inferior a 3 mm e a absorção de água não excedeu 20% em massa após imersão por 24 h. A principal vantagem das telhas reforçadas foi o aumento de pelo menos 20% da energia absorvida, em relação ao padrão sem fibras, o que é importante para se evitar ruptura frágil das telhas durante transporte e instalação, por causa dos esforços dinâmicos envolvidos.

O comportamento das telhas reforçadas com eucalipto e testadas aos 28 dias foi significativamente superior ao das telhas correspondentes, obtidas na fase anterior (item 4.2, tabela 4.6), fruto dos ajustes procedidos na formulação do compósito (ver item 4.3.1).

Em estudo similar a respeito de sistemas alternativos de cobertura (RAS Technical Bulletin, 1994), argamassas de cimento Portland comum, reforçadas com 1% em volume de fibras de sisal cortadas, mostraram redução de 30% da resistência à tração na flexão, comparada à do padrão sem fibra, aos 14 dias de idade, e um aumento de até três vezes na resistência ao impacto.

Resultados consideravelmente melhores para fibrocimentos poderiam ser esperados pelo uso de polpa celulósica previamente refinada, dispersão das matérias-primas em solução aquosa, drenagem a vácuo e prensagem, como exposto no capítulo 6º. Em vista da melhoria de desempenho obtida, o aumento no consumo de energia durante tais procedimentos parece justificável, desde que possível sua implementação, tanto tecnológica como economicamente.

Séries ensaiadas após 16 meses de envelhecimento natural mostraram permeabilidade e absorção de água aceitáveis, próximo do obtido nas séries testadas aos 28 dias de idade. As telhas colocadas na bancada de envelhecimento permanecem até o momento com boa aparência e sem alteração estrutural ou escurecimento da superfície externa. Por

outro lado, o desempenho mecânico mostrou considerável piora, com quedas de resultado de 50% e 70% respectivamente, de carga máxima e energia absorvida em comparação aos resultados iniciais (tabela 4.8).

A perda de resistência à tração na flexão dos materiais à base de escória foi também reportada por outros pesquisadores (Wang et al., 1995 e Agopyan; John, 1992) e interpretada como consequência da evolução do processo de carbonatação da matriz. Na atual pesquisa, a avaliação qualitativa usando solução de 2% de fenolftaleína em etanol anidro atestou que os compósitos estavam carbonatados por completo no final do período de envelhecimento.

Outro aspecto relacionado à perda de ductilidade do compósito pode ser a "petrificação" da fibra. A formação de produtos hidratados do cimento nos vazios da fibra pode levar à sua fratura frágil e reduzida absorção de energia no estágio de pós-fissuração do compósito submetido à flexão. Em estudo similar de fibrocimentos curados ao ar, Bentur; Akers (1989) observaram que a "petrificação" da fibra pode acontecer sob condições favoráveis à carbonatação, provavelmente em razão do pH mais baixo do meio e maior solubilidade dos produtos de hidratação.

Por outro lado, a carbonatação deveria ser vista como um aspecto favorável à proteção de componentes não celulósicos (lignina, p. ex.) da fibra, contra o ataque alcalino (Marikunte; Soroushian, 1994), o que parece não ter desempenhado efeito significativo nesta etapa do estudo.

John et al. (1998) também apontaram que variações de volume das fibras, associadas a mudanças no seu teor de umidade, podem gerar danos generalizados na interface fibra-matriz, e assim contribuindo para a queda do comportamento mecânico no longo prazo.

4.3.4 Avaliação da durabilidade sob envelhecimento acelerado

Corpos-de-prova no formato aproximado de 6 cm x 25 cm foram extraídos de telhas não rompidas, mantidos em ambiente de laboratório por cerca de 5 meses e, a seguir, submetidos, por 12 meses, a equipamento de ensaio de envelhecimento acelerado, conforme prescrição da ASTM G-53, estando sujeitos a cerca de 1000 ciclos de 8 h de duração, sendo 4 h sob luz de ultravioleta e 4 h sob nebulização de água potável. Segue, na figura 4.14, imagem do dispositivo de ensaio. O equipamento em referência foi

desenvolvido no Laboratório de Construção Civil, do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

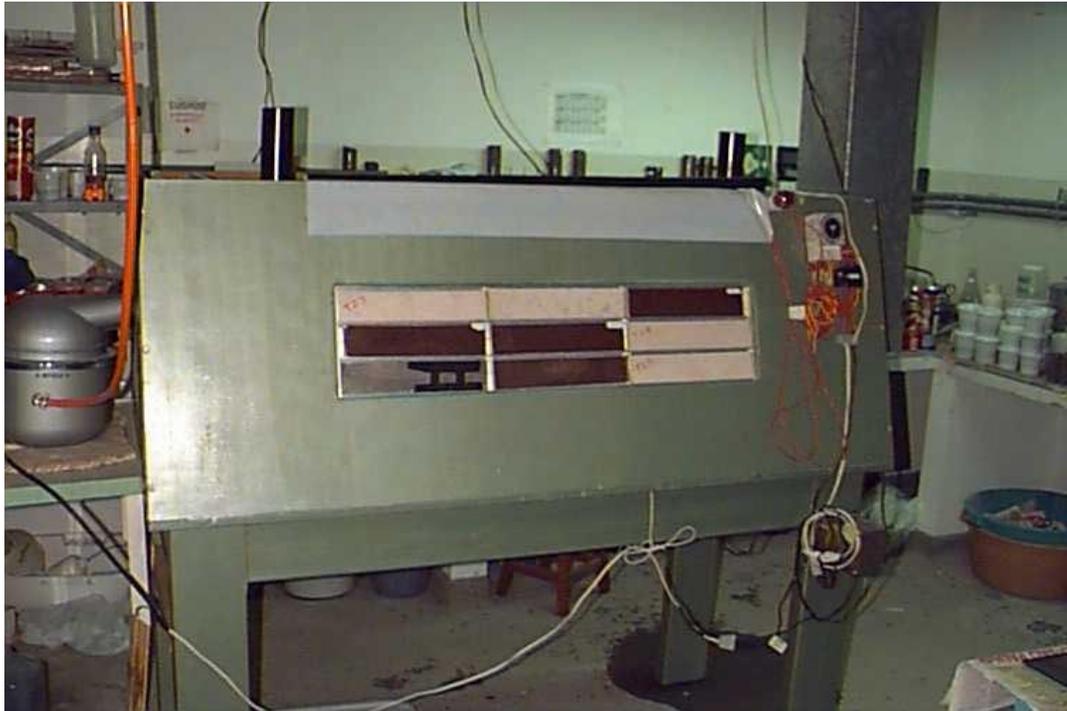


Fig. 4.14 Dispositivo de envelhecimento acelerado ultravioleta-nebulização.

Após o período de envelhecimento, os corpos-de-prova foram cortados nas dimensões de 6 cm x 12 cm (a espessura é a da telha ~7 mm), mantidos em ambiente de laboratório durante 1 mês, após o que foram submetidos a ensaio de flexão com três cutelos (vão inferior = 100 mm, velocidade de carregamento = 2 mm/min), na condição de secos ao ar. Testemunhos foram mantidos em ambiente de laboratório durante o período total de 18 meses, para efeito comparativo com os corpos-de-prova sujeitos ao envelhecimento. Além disso, corpos-de-prova de iguais dimensões retirados das telhas submetidas ao envelhecimento natural (item 4.3.3) também foram submetidos ao mesmo ensaio de flexão. Os resultados físicos e mecânicos seguem resumidos na tabela 4.9, podendo ser associados a resultados similares das telhas, elaboradas com as mesmas formulações acima, disponíveis na tabela 4.8.

Tabela 4.9 Desempenho dos compósitos submetidos a envelhecimento acelerado e natural.

Fibra	Escória : fosfogipso : cal : areia ; x	Condições *	Massa específica (kg/m ³)	Absorção de água (% em massa)	Resist. tração na flexão (MPa)	Energia específica (J/m ²) **
2% coco	0,86 : 0,10 : 0,04 : 1,5 ; 0,45	Referência do envelhecimento	1913 (16)	10,95 (0,09)	5,84 (-)	35 (-)
		Envelhecimento acelerado	1923 (6)	10,72 (0,21)	7,07 (0,50)	48 (11)
		Envelhecimento natural	nd	12,20 (0,64)	2,90 (0,76)	19 (12)
2% eucalipto	0,86 : 0,10 : 0,04 : 1,5 ; 0,48	Referência do envelhecimento	1856 (-)	12,73 (-)	5,15 (-)	70 (-)
		Envelhecimento acelerado	1880 (12)	12,48 (0,05)	5,42 (0,65)	71 (13)
		Envelhecimento natural	nd	14,53 (0,20)	2,43 (0,23)	57 (15)
1% sisal + 1% eucalipto	0,86 : 0,10 : 0,04 : 1,5 ; 0,50	Referência do envelhecimento	1880 (17)	13,01 (0,34)	5,27 (0,45)	58 (2)
		Envelhecimento acelerado	1900 (8)	12,29 (0,24)	6,60 (0,91)	82 (31)
		Envelhecimento natural	nd	15,11 (0,30)	2,46 (1,24)	38 (19)

Notas: x = relação água/cimento

(*) idade total de 18 meses para todas as condições

(**) ensaio interrompido ao se atingir 50% de decréscimo do carregamento máximo

Massa específica e absorção calculadas pela ASTM C948-81

Desvios-padrão entre parêntesis

nd = informação não disponível

Percebe-se que não houve alterações relevantes das propriedades físicas, em relação à idade ou tipo de ensaio de envelhecimento. Quanto ao ensaio de tração na flexão, observa-se aumento de resistência para as séries mantidas em ambiente de laboratório e sob envelhecimento acelerado. Nos dois casos, é provável que tais condições de exposição tenham favorecido a continuidade do processo de hidratação da escória, a qual se encontrava pouco adiantada nas primeiras idades (item 4.3.2). Já a radiação ultravioleta não parece ter exercido efeito expressivo, o que sugere, para próximos experimentos, ensaios de envelhecimento acelerado com ciclos de umedecimento e secagem (por aquecimento), eventualmente combinados a carbonatação acelerada, conforme estudos de MacVicar et al. (1999) e Soroushian et al. (1994). Mais uma vez, a perda de ductilidade foi significativa, o que reforça considerações do item 4.3.3, relativas à "petrificação" da fibra e à degeneração da zona de transição fibra-matriz. Os piores resultados mecânicos foram obtidos para corpos-de-prova submetidos a envelhecimento natural, reforçando a hipótese de hidratação insuficiente seguida de carbonatação da matriz (compare-se ainda com resultados da tabela 4.7 aos 28 dias de idade).

4.4 Testes de incombustibilidade

As três formulações de compósito, estudadas no item 4.3, foram submetidas a ensaio de incombustibilidade para materiais utilizados na construção, pelo Laboratório de Segurança ao Fogo (LSF) - Agrupamento de Instalações Prediais, Saneamento Ambiental e Segurança ao Fogo (AISF) - Divisão de Engenharia Civil (DEC) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

O método de ensaio utilizado foi o ISO 1182/1990 *Building materials - non-combustibility test*, que propõe os seguintes critérios para a classificação dos materiais como incombustíveis:

- A elevação média da temperatura não deve exceder de 50°C a temperatura média inicial.
- O tempo médio de chamejamento não deve exceder 20 s.
- A perda média de massa não deve exceder 50%.

Seguem, na tabela 4.10, os principais resultados obtidos, que permitem classificar todos os materiais testados como incombustíveis, em que pese a presença das fibras vegetais em sua composição.

4.5 Análise de conforto térmico

Foram construídos modelos reduzidos de telhados com dimensões superficiais de 100 cm x 115 cm, altura mínima do chão igual a 70 cm e 15° (27%) de inclinação em relação à horizontal, todos eles com face voltada para o norte magnético. A estrutura foi executada com madeira serrada e o piso coberto com grama. Para efeito comparativo, além das três formulações de compósitos previamente apresentadas no item 4.3, foram construídos modelos com telhas cerâmicas tipo romana (capa-canal com 13,7 mm de espessura) e telhas onduladas de cimento amianto com 5,0 mm de espessura.

Cada modelo foi instrumentado com 3 termopares, na superfície interna das telhas, e mais um, instalado no centro geométrico do modelo, para obtenção de temperatura de globo, a qual considera a influência do calor radiante (diâmetro do globo = 37,5 mm). Uma estação meteorológica marca Campbell Scientific modelo 21X(L) registrou ainda radiação global, temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, velocidade e direção do vento. A figura 4.15 ilustra o local de instalação dos modelos.

Para acompanhamento dos dados obtidos nos modelos, bem como cálculo das médias a cada 30 min, os termopares foram conectados a um multiplexador modelo AM-416, que retransmitia os dados de leitura diretamente para um microcomputador, por sua vez equipado com o software PC 208-W.

Os dados climáticos ambientais e de temperatura dos modelos foram coletados no período de abril a outubro de 1999. Escolheu-se então para análise o dia 9/10/1999, considerado mais crítico, pelo critério de máxima radiação global registrada. Nesse dia, atingiu-se a radiação global máxima de 1016 W/m², às 14:00 (média do intervalo de 30 min), precipitação nula, umidade relativa do ar no intervalo entre 92,4% (7:00) e 33,3% (15:00) e ventos na direção sudeste, com intensidade entre 0,36 km/h (7:00) e 1,53 km/h (12:00).

Tabela 4.10 Teste de incombustibilidade dos compósitos fibra-argamassa de escória (ISO 1182/1990).

Fibras de reforço	Termopar	Temperatura inicial do forno - T_1 (°C)	Temperatura máxima do forno - $T_{m\acute{a}x}$ (°C)	$T_{m\acute{a}x} - T_1$	Perda média de massa (%)	Tempo médio de chamejamento
Polpa de eucalipto	1	753	745	-8	6,4	não ocorreu
	2	753	762	9		
	3	753	707	-46		
Sisal + eucalipto	1	756	750	-6	6,2	não ocorreu
	2	756	771	15		
	3	756	716	-40		
Coco	1	751	753	2	4,6	não ocorreu
	2	751	767	16		
	3	751	720	-31		

Obs. 1: todos os valores referem-se à média de cinco corpos-de-prova.

Obs. 2: termopar 1 - localizado a 10 mm da parede do forno;

2 - localizado na superfície lateral do corpo-de-prova;

3 - localizado no centro geométrico do corpo-de-prova.



Fig. 4.15 Modelos reduzidos de telhados para ensaio de conforto térmico.

A figura 4.16 apresenta temperaturas médias na superfície inferior dos diversos telhados, além da temperatura do ar e radiação global. A máxima temperatura em todos os modelos, bem como no ambiente, foi registrada às 16:00, o que mostra uma defasagem aproximada de 2 h em relação ao horário da radiação máxima. A temperatura máxima de $49,8^{\circ}\text{C}$ foi relativa às telhas de argamassa de escória reforçada com fibras de coco, pelo menos $2,6^{\circ}\text{C}$ superior às demais, enquanto a temperatura ambiente foi de, no máximo, $27,9^{\circ}\text{C}$. O dia foi predominantemente sem nebulosidade, haja vista a forma parabólica assumida pela curva da radiação global na mesma figura.

Já as temperaturas de globo, nos centros geométricos dos modelos, seguem na figura 4.17, também acompanhadas pela radiação global e temperatura do ar. Os picos de temperatura dos modelos ocorreu entre 18:00 e 18:30, com máximo de $44,3^{\circ}\text{C}$ para telhado de escória reforçada com fibras de sisal e celulose de eucalipto, seguido de perto pelos demais modelos, inclusive os referenciais de cimento amianto e cerâmica. Neste caso, a defasagem entre temperatura dos modelos e do ambiente foi da ordem de 2,5 horas. A temperatura de globo no interior dos modelos registrou decréscimo, por volta das 10:00, provavelmente associado ao aumento da intensidade do vento, voltando logo a reassumir tendência de acréscimo contínuo até as 18:00.

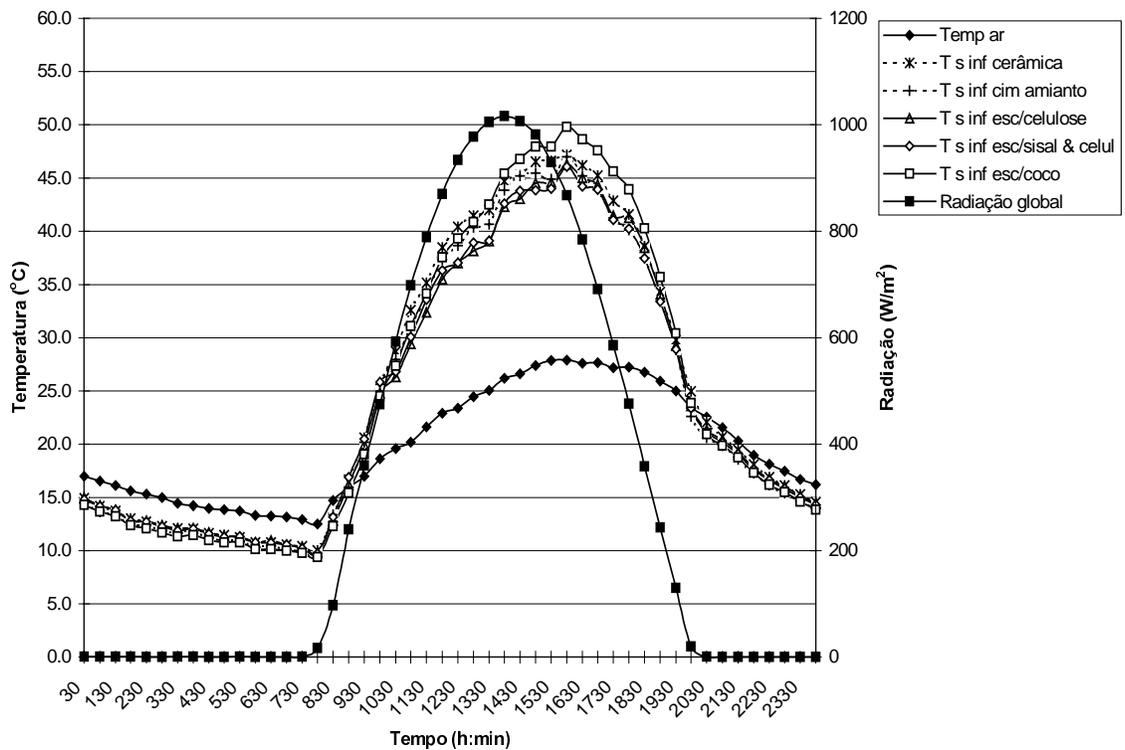


Fig. 4.16 Evolução de temperaturas na superfície interna das telhas, temperatura ambiente e radiação global no dia 9/10/1999.

Em análise conjunta dos dois gráficos recém-apresentados, observa-se o bom desempenho do telhado de escória com fibra de celulose de eucalipto (temperatura da superfície inferior da telha igual a $46,3^{\circ}\text{C}$ e temperatura de globo de $42,3^{\circ}\text{C}$), embora sem diferenciação acentuada em relação aos demais.

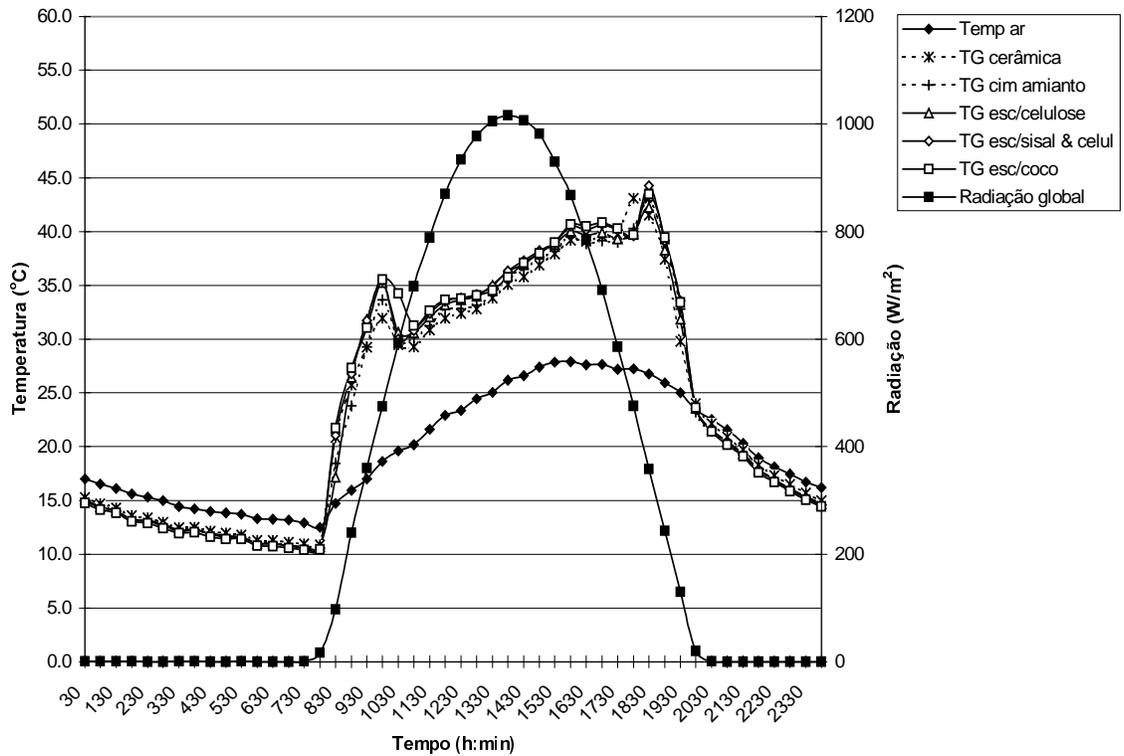


Fig. 4.17 Evolução das temperaturas de globo dos modelos reduzidos, temperatura ambiente e radiação global.

4.6 Comentários

Esta etapa da pesquisa pode ser considerada como uma análise inicial de viabilidade dos materiais à base de escória de alto-forno reforçados com fibras residuais, com base em matérias-primas amplamente disponíveis e a preços compatíveis à proposta atual. Foi feita a adequação de um processo de produção muito simples, já difundido em diversos países em desenvolvimento, para telhas de pequenas dimensões com ou sem reforço fibroso. Tal método produtivo apresentou a vantagem de não requer investimentos elevados e nem mão-de-obra especializada para sua operação.

A idéia de se oferecer uma alternativa a opções já difundidas no mercado despertou grande interesse de empresas geradoras de resíduos ou produtoras de componentes

construtivos, inclusive como fruto do momento atual, em que se considera o banimento do cimento amianto em diversos países, inclusive o Brasil (informação obtida no endereço eletrônico <http://www.lkaz.demon.co.uk>, British Asbestos Newsletter, Issue 37).

Como resultado das pesquisas apresentadas neste capítulo, nas primeiras idades, o desempenho dos materiais produzidos atendeu às especificações voltadas para a construção de baixo custo. Entretanto, o comportamento mecânico mostrou deficiências, especialmente relacionadas ao envelhecimento no médio prazo: 16 meses de exposição às intempéries ambientais causaram perdas consideráveis de resistência e ductilidade. A análise da microestrutura do compósito, a partir de procedimentos experimentais anteriormente propostos (Savastano Jr., 1992), foi importante para melhorar o entendimento dos mecanismos de degradação do reforço fibroso.

Para sustentação da idéia do novo componente alternativo para coberturas, passou-se então a uma nova etapa, descrita nos capítulos seguintes, de adequação, respectivamente, da matéria-prima vegetal e das técnicas produtivas do compósito, à procura de solução para as questões até aqui mal resolvidas.

5 AVALIAÇÃO DE POLPAS CELULÓSICAS PARA REFORÇO DE PRODUTOS À BASE DE CIMENTO

O uso de polpas de madeira para reforço de produtos construtivos é bem conhecido e aceito nos países desenvolvidos (Coutts, 1988). Estudos prévios (Savastano Jr.; Agopyan, 1999 e Zhu et al., 1994, p. ex.) enfocaram fibras provenientes de plantas fibrosas (não madeiras) como uma possível fonte de reforço, tanto na forma de macrofibras como de filamentos (células individuais), porém sua transferência para a escala industrial de produção ainda não ocorre no Brasil.

Fibras de diferentes origens, idades e partes da planta apresentam variações em sua estrutura e propriedades (Chand et al., 1988). Processos de polpação também podem gerar transformações nessas propriedades (McKenzie, 1994), uma vez que as fibras podem ser danificadas e encurtadas.

Já que o comportamento das fibras vegetais, no interior de uma matriz frágil e alcalina como o cimento, muda substancialmente, se comparado ao seu emprego no papel (Higgins, 1996), é conveniente que sejam estabelecidas as características físicas desejáveis do reforço, de modo a maximizar as propriedades do compósito.

O objetivo deste capítulo é mostrar características físicas e morfológicas de polpas celulósicas, obtidas por processos químicos e quimio-termo-mecânicos (CTMP, abreviatura para *chemi-thermo-mechanical pulp*). Para tanto, serão abordados atributos das polpas provenientes de resíduos de sisal, banana e eucalipto, para produção de fibrocimentos nos países em desenvolvimento.

5.1 Preparo da matéria-prima

A bucha verde de campo do sisal é gerada durante o processo de decorticação e sua separação da mucilagem pode ser conseguida com o emprego de uma peneira cilíndrica rotatória operada manualmente.

As fibras de banana foram extraídas do pseudocaule da planta, com o uso de um moedor manual de cana-de-açúcar, adaptado com o propósito principal de remoção da umidade. Tanto as macrofibras de sisal como as de banana foram mecanicamente cortadas com

aproximadamente 30 mm de comprimento, com a finalidade de facilitar os procedimentos de polpação.

Já o resíduo de polpa celulósica do eucalipto provém da filtragem dos efluentes dos processos kraft e branqueamento das indústrias de celulose para papel. Antes do uso como reforço, foi necessária sua desintegração e limpeza, por 2 min, em água quente (~90°C), utilizando-se um sistema de circuito fechado, pressurizado por bomba de alta rotação. Esse procedimento foi adotado tendo em vista que a secagem, realizada antes do transporte do resíduo, causou a aglutinação dos filamentos.

Mais detalhes referentes à disponibilidade dos resíduos ora em uso, bem como critérios de pré-seleção, estão listados no capítulo 3°.

5.2 Produção das polpas celulósicas

Após passarem por processo térmico de esterilização, em estufa a 85°C por 8 h, amostras dos três resíduos escolhidos foram encaminhados ao Forest Products Laboratory, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), em Melbourne, Austrália, para desenvolvimento de pesquisa cooperativa na produção de polpas e de fibrocimentos.

5.2.1 Processo kraft

O processo químico utilizado neste estudo foi o kraft ou método dos sulfatos, considerado o procedimento predominante de polpação em todo o mundo. Polpas kraft de *Pinus* são cotadas internacionalmente em torno de US\$ 800/t (Ausnewz, 1999).

Na produção laboratorial de polpa, a partir das fibras de sisal e banana, o processo kraft foi composto pelo cozimento da matéria-prima em digestor (ver figura 5.1), sob a atuação de uma mistura de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio em solução aquosa, conforme procedimentos adotados em estudos anteriores (Clark, 1998, Irvine, 1995, Zhu, 1993 e Coutts; Warden, 1992) e listados na tabela 5.1.

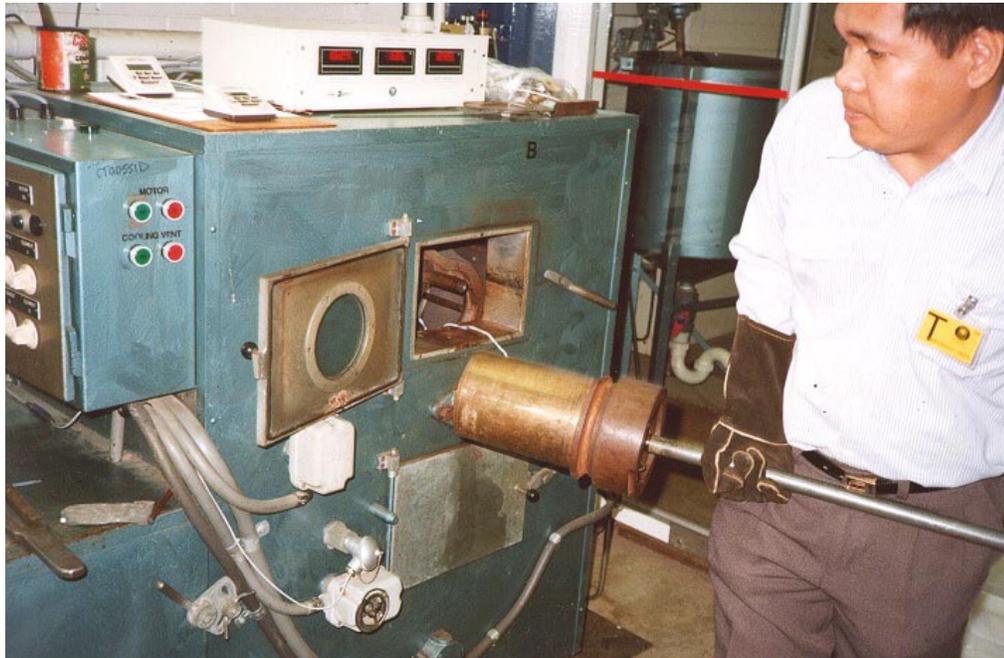


Fig. 5.1 Processo de polpação kraft em escala laboratorial. Observa-se a introdução, no digester, de vaso metálico contendo fibras em licor para cozimento.

Tabela 5.1 Processos de polpação kraft aplicados a fibras residuais de sisal e banana.

Fibra		Sisal	Banana
Álcalis ativos (como Na ₂ O) (%)		9	10
Concentração de sulfetos (como Na ₂ O) (%)		25	25
Relação licor/fibra		5:1	7:1
Temperatura (°C)		170	170
Tempo de digestão (min)	Preaquecimento	~75	~85
	Cozimento	120	120

Para efeito comparativo com estudos prévios bem sucedidos de cimento reforçados com fibra de madeira (Coutts, 1988), utilizou-se *Pinus radiata* kraft, na forma de folhas de celulose comercial, proveniente de Kinleith, Nova Zelândia. As fibras foram preparadas por imersão em água, por pelo menos 4 h, seguida de desintegração mecânica (2850 rpm por 5 min). Por último, a fibra passou por refinador laboratorial Valley, segundo a seqüência: 20 min de circulação livre e 20 min de refino com peso aplicado de 55N.

5.2.2 Processo CTMP

Apesar do consumo elevado de energia, polpas celulósicas obtidas pelo emprego de processos mecânicos apresentam diversas vantagens, em comparação às polpas químicas. Conforme destacado por Coutts (1986a), o tratamento de efluentes é menos problemático, a necessidade de produtos químicos é menor, as polpas são mais baratas (cerca da metade do preço da polpa kraft) e as indústrias encontram viabilidade econômica em menor escala de produção.

Após os preparativos listados no item 5.1, as fibras de sisal e banana foram submetidas ao processo CTMP de baixa temperatura, de acordo com experimentos prévios relatados por Ramos et al. (1997) e Higgins et al. (1978).

Em trabalho com fibras de *Pinus radiata* apresentado por Coutts (1986a), observa-se que processos termo-mecânicos de baixa temperatura, com temperaturas de desfibramento em torno de 130°C, promovem a obtenção de fibras bem fibriladas, apesar da incidência considerável de danos aos filamentos. Temperaturas mais altas (150 - 175°C) não favorecem a fibrilação, promovendo fibras de superfície lisa e com retenção interna de lignina.

A importância dessa fibrilação adequada, das camadas internas e externas da fibra (ver figura 2.1), reflete-se na obtenção de filamentos mais maleáveis e com ramificações superficiais, que se traduzem respectivamente em maior compacidade e melhor aderência fibra-fibra e fibra-matriz nos fibrocimentos. Além disso, o refino mecânico também é favorável, durante a fabricação de compósitos cimentícios, pela retenção das partículas de aglomerante, na etapa de drenagem por sucção da água, e melhor empacotamento do material sob prensagem (Coutts, 1988).

A preparação inicial da fibra consistiu em deixá-la imersa em água, por ao menos 16 h, seguida de cozimento, por uma hora, em água fervente com 10% em massa de cal hidratada, na proporção de 33,3 partes de licor para 1 parte de fibra. Apesar de ser um tratamento simples e de baixo poder poluente, este estágio conferiu efetivo ataque às macrofibras, fazendo com que pudessem ser partidas com a força dos dedos. A escolha de tratamento químico apropriado pareceu de grande importância no preparo da fibra, pela redução do consumo de energia, durante os estágios subseqüentes de refinamento

mecânico, o que representa uma das maiores preocupações em relação às polpas mecânicas (Coutts, 1986a).

Um desfibrador laboratorial marca Asplund (figura 5.2) conferiu 103kPa de pressão manométrica de vapor, correspondente a 121°C, na presença de 400 ml da solução do pré-tratamento químico, com 120 s de condicionamento prévio seguidos de 90 s de desfibramento efetivo.



Fig. 5.2 Desfibrador Asplund utilizado em estágio termo-mecânico do processo CTMP.

A seguir, a polpa passou por refinador laboratorial de discos com 20 cm de diâmetro, marca Bauer, ilustrado na figura 5.3. A polpa foi inicialmente passada pelo refinador, equipado com discos de estrias radiais retas e sem anel vedante periférico, e abertura de 254 μm entre discos. A seguir, outros discos de estrias retas, porém com a periferia vedada (para aumento do poder de refino), foram utilizados para duas passagens da polpa, com aberturas respectivamente de 127 μm e 76 μm entre discos. Com a finalidade de melhorar o rendimento do refinador, a polpa era parcialmente drenada antes da próxima etapa de refino, de modo a manter consistência adequada ao tratamento mecânico.

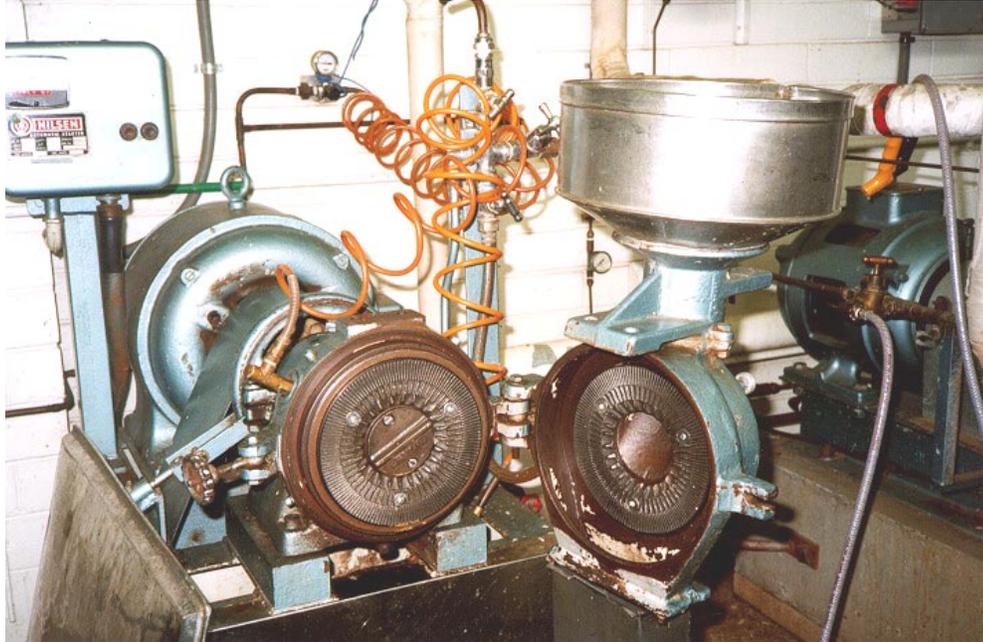


Fig. 5.3 Refinador laboratorial Bauer, aberto durante instalação de discos com estrias radiais retas.

5.2.3 Procedimentos complementares

Após os estágios de preparo das diversas polpas, elas passaram por peneira vibratória de ranhuras (abertura de 0,229 mm), marca Packer, para separação de macrofibras eventualmente restantes.

A seguir, CTMP's de banana e sisal foram ainda submetidas a uma peneira de malhas com abertura 0,180 mm, marca Somerville, para limpeza e remoção de partículas com menos de 0,2 mm de comprimento. Como exposto anteriormente, encurtamento de fibras e geração de finos são esperados nos processos CTMP (Higgins, 1996), apesar do controle da quantidade de energia aplicada durante a polpação mecânica.

Finalmente, as polpas foram drenadas por prensagem, particuladas sob a ação de bateadeira de laboratório e mantidas refrigeradas dentro de saco plástico fechado.

5.3 Caracterização das polpas celulósicas

Algumas propriedades importantes das polpas em estudo foram determinadas no presente trabalho e seguem na tabela 5.2.

Tabela 5.2 Propriedades das polpas e fibras.

Fibra	Kraft de sisal	CTMP de sisal	Kraft de banana	CTMP de banana	Kraft residual de eucalipto	Kraft refinado de <i>Pinus radiata</i>
Rendimento (%)	45,5	43,4	45,3	35,6	nd	nd
Número Kappa ⁽¹⁾	31,7	50,5	44,5	86,5	6,1	17,0
Drenabilidade CSF (ml) ⁽²⁾	650	500	222	465	685	650
Comprimento médio (mm) ⁽³⁾	1,66	1,53	1,95	2,09	0,66	1,71
Finos (%)	3,31	2,14	6,86	1,55	7,01	10,36
Massa por un. de comprimento (mg/m) ⁽³⁾	0,163	0,138	0,154	0,147	0,107	0,184
Espessura da fibra (μm) ⁽⁴⁾	13,5	9,4	15,3	11,8	10,9	32,4
Relação de aspecto	123	163	127	177	61	53

⁽¹⁾ Appita P201 m-86

⁽²⁾ AS 1301.206s-88

⁽³⁾ Kajaani FS-200

⁽⁴⁾ Média de 20 determinações em MEV

nd = informação não disponível

5.3.1 Métodos de ensaio

O rendimento da polpação foi definido como sendo a relação entre a massa útil final da polpa produzida, e a massa inicial de resíduos fibrosos empregados no processo, sempre em base seca dos materiais, obtida após permanência mínima de 24 h em estufa a $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.

O número Kappa é uma medida laboratorial indireta do conteúdo de lignina residual presente na polpa, geralmente utilizado na indústria papelreira, em conjunção com processos relacionados ao branqueamento da fibra, para polpas com rendimento inferior a 70%. O método se baseia no consumo de permanganato, que em soluções ácidas reage rapidamente com lignina mas lentamente com celulose. Os procedimentos desse método estão detalhados na norma australiana AS 1301 (Appita P201 m-86). O interesse na sua determinação está na inter-relação existente entre o envelhecimento de fibras vegetais em meios alcalinos (cimento Portland, p. ex.), e o seu conteúdo de lignina (Marinkute; Soroushian, 1994).

O método canadense CSF (abreviatura para *Canadian Standard Freeness*) é uma medida arbitrária da drenabilidade (grau de refinação) da polpa celulósica, sendo descrito na norma AS 1301.206s-88. Esse índice pode ser associado com a velocidade de drenagem inicial da manta úmida de fibrocimento, durante etapa produtiva de sucção da água (Coutts; Ridikas, 1982).

O comprimento e a massa por unidade de comprimento das fibras foram determinados por intermédio de analisador óptico automatizado, marca Kajaani, modelo FS-200 (Carvalho et al., 1997). Foram obtidas a distribuição percentual da população de filamentos e o comprimento médio, com base no conceito de média ponderada, menos dependente da proporção de finos existentes (Bichard; Scudamore, 1988). Finos foram considerados como as partículas de comprimento inferior a 0,2 mm, independente de sua natureza ou formato. A massa por unidade de comprimento do filamento está relacionada à área da seção transversal da parede celular. Essa característica física influencia o número total de fibras presente por unidade de massa da amostra, bem como a configuração espacial da malha de fibras e ainda a resistência individual de cada fibra (McKenzie, 1994).

5.3.2 Discussão das propriedades

As CTMP's de sisal e banana apresentaram rendimentos abaixo do obtido para as correspondentes polpas kraft, conforme se observa na tabela 5.2. Esse comportamento não é usual e, no presente caso, deve ser atribuído à natureza residual das matérias-primas, com teores elevados de material não fibroso, e ao emprego da peneira Somerville (item 5.2.3), para retirada da fração de finos.

No entanto, as CTMP's mantêm a característica das polpas mecânicas ao apresentarem números Kappa elevados, o que resulta de teores mais altos de lignina, em comparação a fibras oriundas de processos kraft. Com base nos resultados existentes na tabela 5.2, as polpas kraft de *Pinus* e eucalipto residual (esta última com resíduos da etapa de branqueamento) foram as que apresentaram menores valores de Kappa, com a conseqüente baixa incidência de lignina e previsão de boa durabilidade em meios alcalinos (Soroushian et al., 1996).

A polpa banana kraft apresentou grau de refinação CSF abaixo de 300 ml, o que pode ser um fator desfavorável para seu uso na fabricação de fibrocimentos pelo processo Hatschek (Coutts; Ridikas, 1982). Baixa drenabilidade costuma ser associada a períodos de drenagem mais longos, com risco de estratificação da placa de fibrocimento, além de custos de produção mais altos. A exemplo do realizado para as CTMP's, a drenabilidade da polpa banana kraft poderia ser aumentada pela limpeza com peneira Somerville, como auxílio à retirada dos finos e do material medular presente junto às fibras celulósicas, como também observado por Zhu, 1993 em estudo com polpas de banana.

Polpas de sisal e banana resultaram em fibras de espessura inferior a 20 μm e relação de aspecto (comprimento/espessura) entre 123 e 177 (tabela 5.2). Pelo efeito de melhor ancoragem na matriz (McKenzie, 1994), as relações de aspecto altas podem contribuir com a resistência à tração dos compósitos, em conjunção à resistência à tração da própria fibra (ver tabela 5.3 para comparativo com fibras de madeira). Um ponto negativo para relações de aspecto muito elevadas (caso das CTMP's) pode ser a baixa absorção de energia associada à ruptura da fibra, em detrimento de seu arrancamento, durante a ruptura dos compósitos à base de cimento. Outra consideração poderia ser referente à difícil distribuição de fibras longas, nos processos de dispersão em solução

aquosa (usualmente em concentrações de 20% de sólidos, em condições de laboratório), com a tendência de floculação e estratificação do compósito.

CTMP e kraft de sisal apresentaram distribuições similares de comprimento entre si, o que também se observa pelo comparativo entre as polpas de banana (figura 5.4). Essas distribuições alcançaram um amplo espectro de comprimento, de modo similar às fibras de *Pinus* (figura 5.5). Essas constatações são favoráveis às polpas mecânicas, mais baratas e ambientalmente corretas que os krafts, e que ainda originaram resultados semelhantes quanto à distribuição dos comprimentos.

Polpas de banana apresentaram maior incidência de fibras longas (com 3 mm ou mais), como também confirmado na tabela 5.2. Nesse caso, talvez o uso conjunto com fibras de eucalipto, mais curtas e com distribuição mais concentrada de comprimentos (figura 5.5), pudesse otimizar o funcionamento das duas fibras, pela atuação como reforços em diferentes estágios de fissuração de um compósito à base de cimento.

5.4 Análise microestrutural

Esta etapa da pesquisa foi realizada com o objetivo de identificar as principais características morfológicas das polpas produzidas, bem como determinar o diâmetro das fibras.

As polpas foram preparadas por dispersão em água fria, pelo uso de agitador laboratorial de alta rotação, e diluídas na concentração de 60 g/m³. Foram então colocadas algumas gotas dessa solução em placas de vidro, nas quais permaneceram, por pelo menos 7 dias, para evaporação da água, em ambiente de clima controlado (temperatura de 23 ± 2°C e umidade relativa de 50 ± 5%). As amostras foram, a seguir, transferidas para suportes apropriados, para uso no microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Philips XL30, usando detecção de elétrons secundários e tensão aceleradora entre 2,0 e 5,0 kV. As figuras 5.6 a 5.9 ilustram as polpas kraft e CTMP de sisal com diferentes níveis de fibrilação. A polpa kraft apresenta superfície lisa e pouco danificada, com possível prejuízo à ancoragem da fibra a uma matriz de cimento.

Tabela 5.3 Propriedades gerais de fibras vegetais (células individuais).

Fibra	Teor de celulose (% em massa)	Teor de lignina (% em massa)	Massa específica (kg/m ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elastic. (GPa)
Sisal	67 ⁽¹⁾	12 ⁽¹⁾	1500 ⁽²⁾	800 ⁽²⁾	30 ⁽²⁾
Banana	65 ⁽¹⁾	5 ⁽¹⁾	1500 ⁽³⁾	700 - 800 ⁽³⁾	20 - 51 ⁽⁴⁾
Kraft branqueado de eucalipto ⁽²⁾	89	0,5	1500	200 - 1300	45
<i>Pinus radiata</i>	84 ⁽²⁾	0,5 ⁽²⁾	1500 ⁽⁵⁾	500 - 900 ⁽⁵⁾	40 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Chand et al. (1988)⁽²⁾ Fordos (1988)⁽³⁾ Zhu et al. (1994)⁽⁴⁾ Zhu (1993)⁽⁵⁾ Coutts (1990)

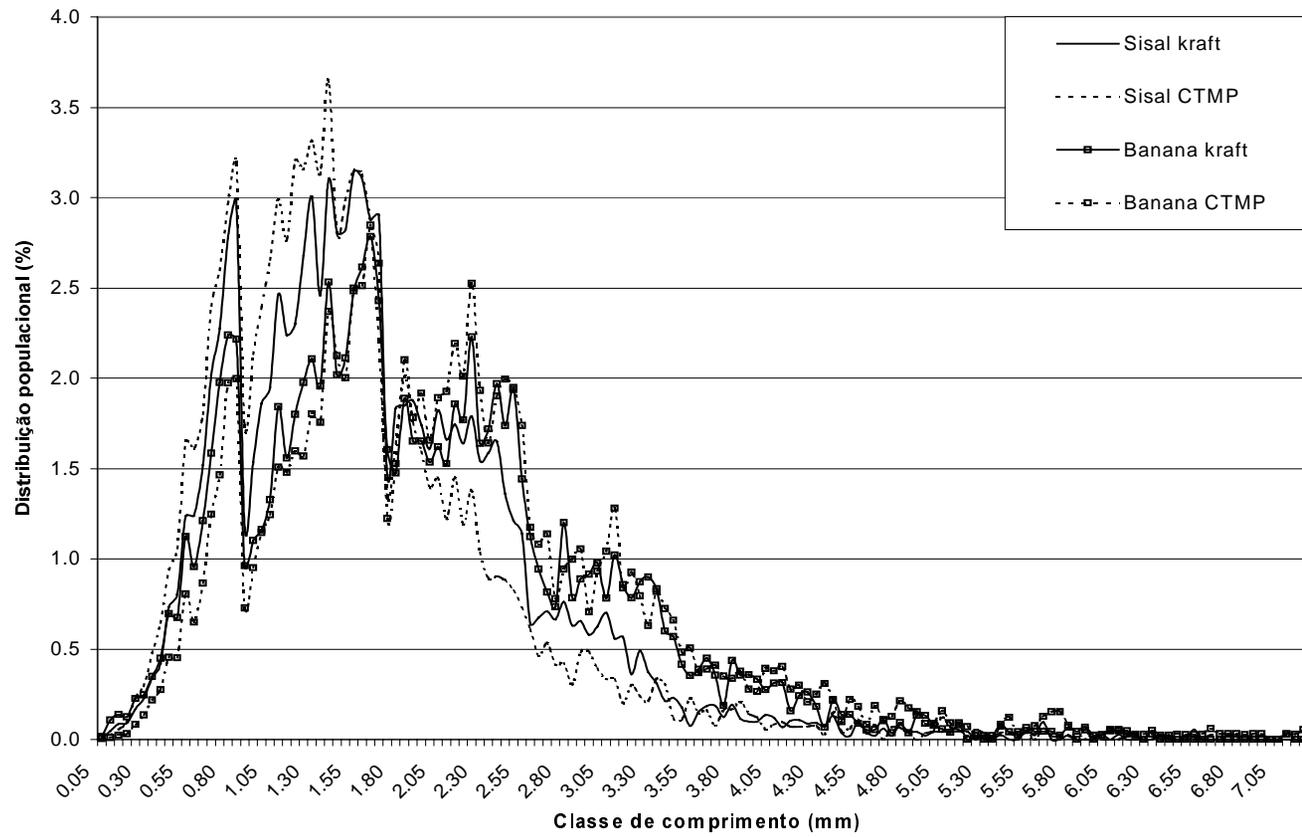


Fig. 5.4 Distribuição ponderada de comprimentos de polpas de sisal e banana.

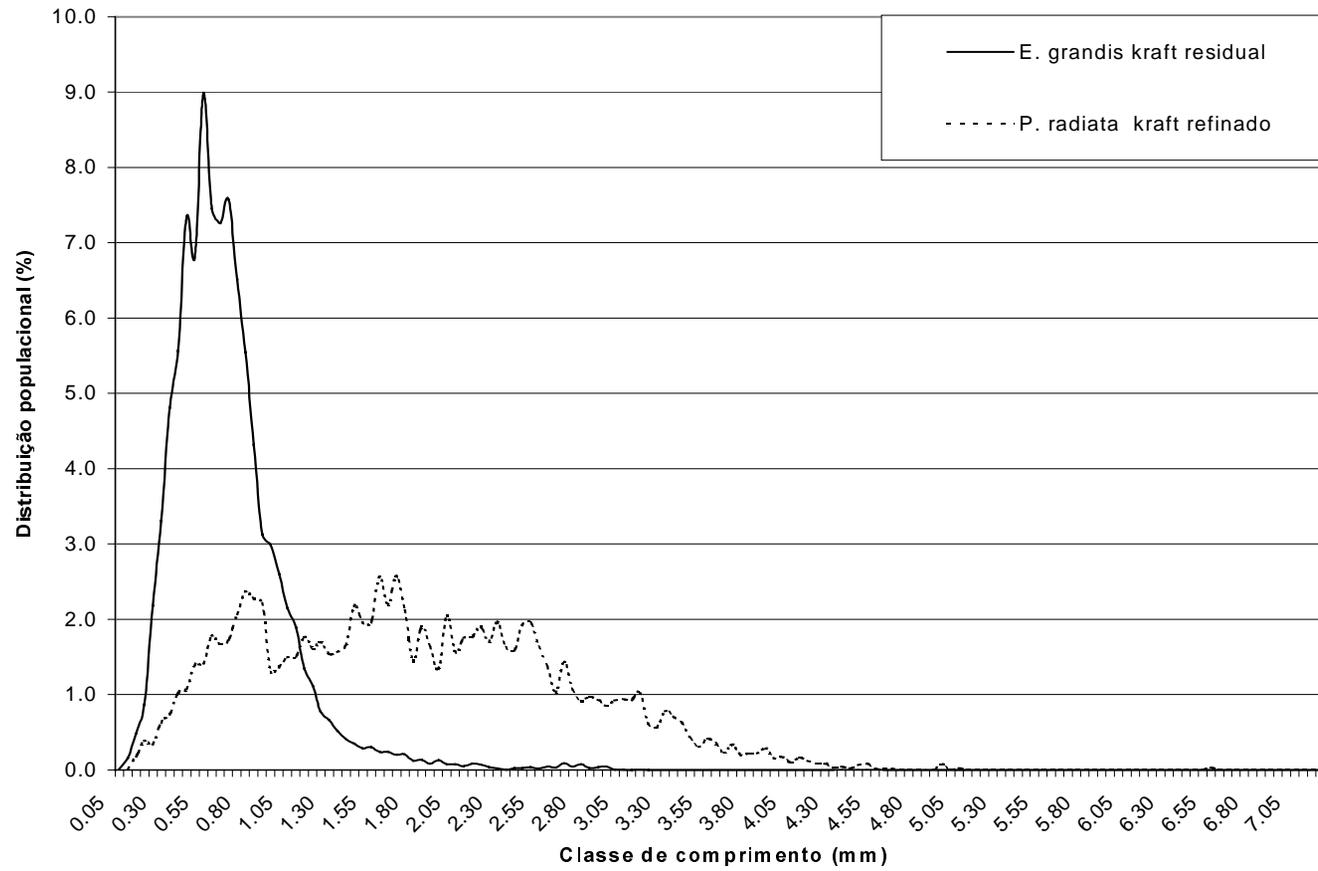


Fig. 5.5 Distribuição ponderada de comprimentos de polpas de *Pinus* e eucalipto.

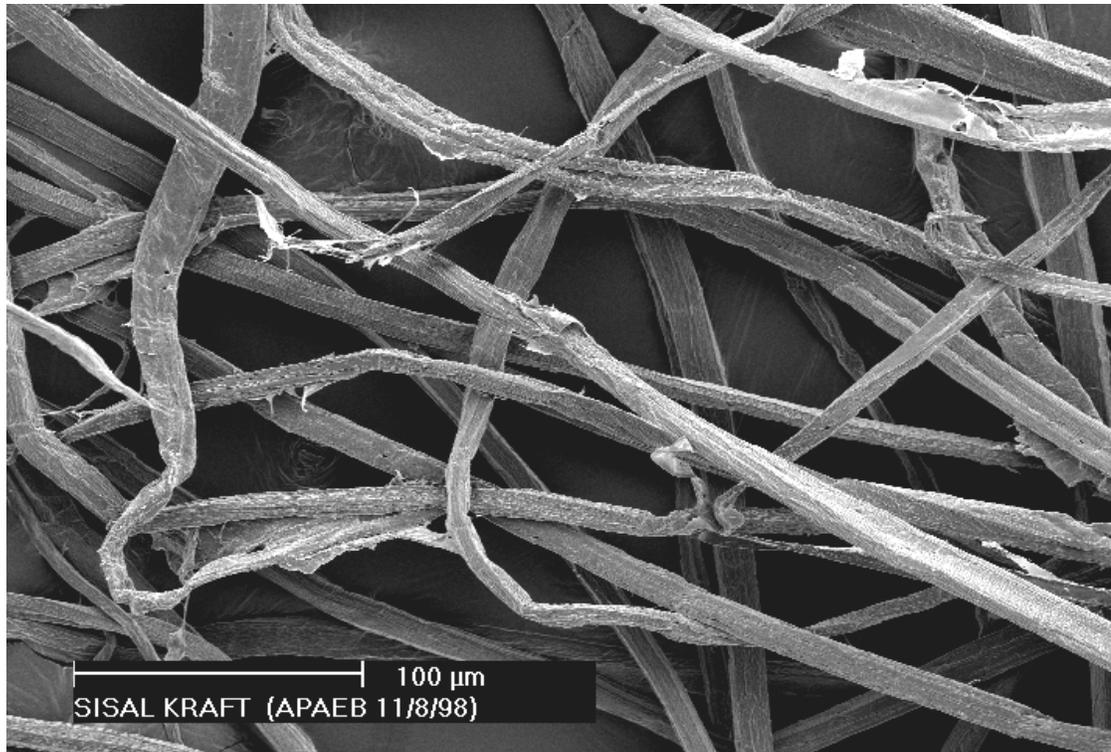


Fig. 5.6 Polpa kraft de sisal residual. Vista geral.

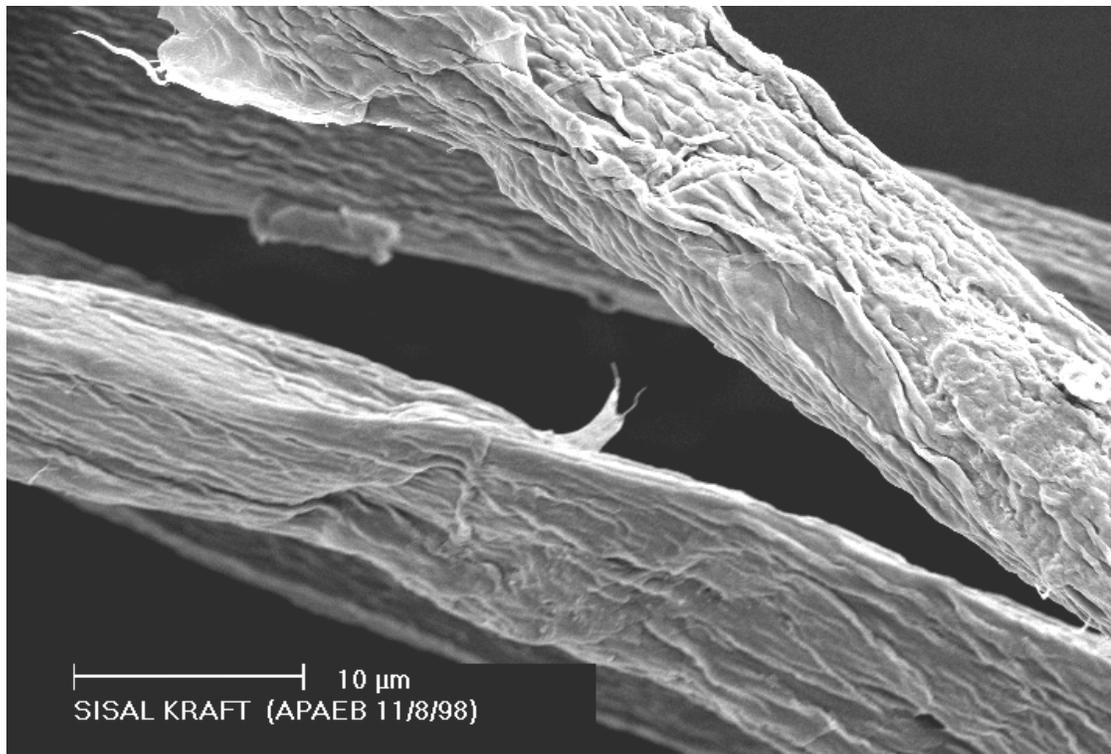


Fig. 5.7 Imagem ampliada da polpa kraft de sisal residual.

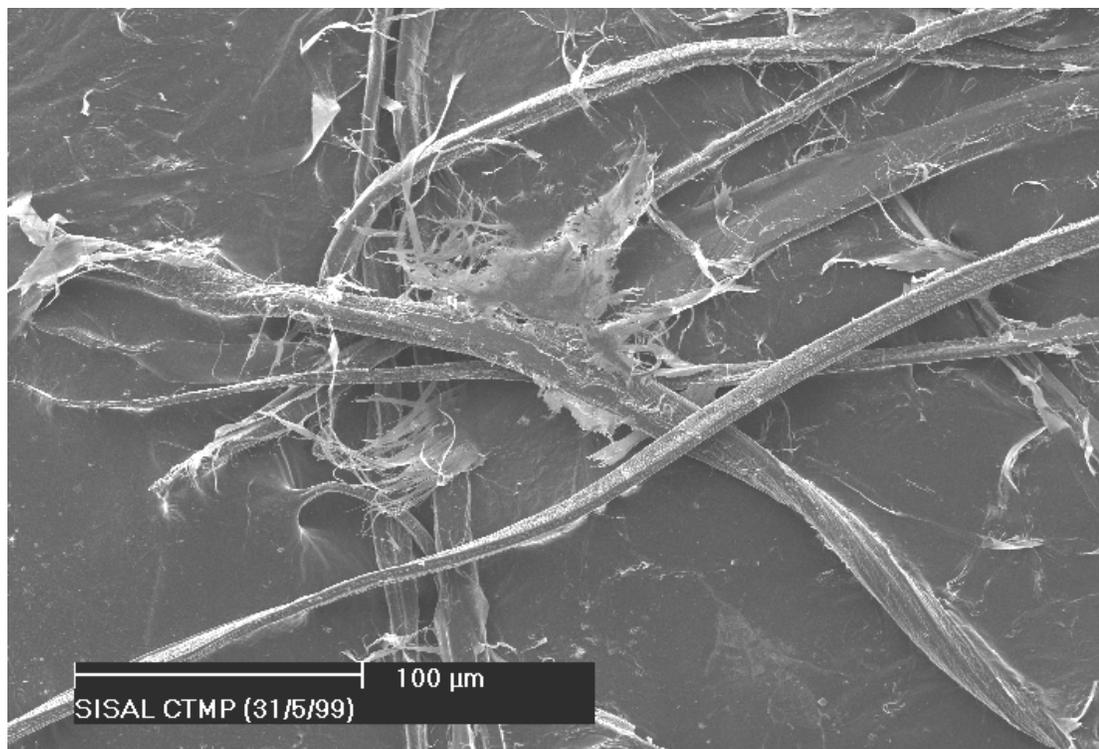


Fig. 5.8 CTMP de sisal residual.

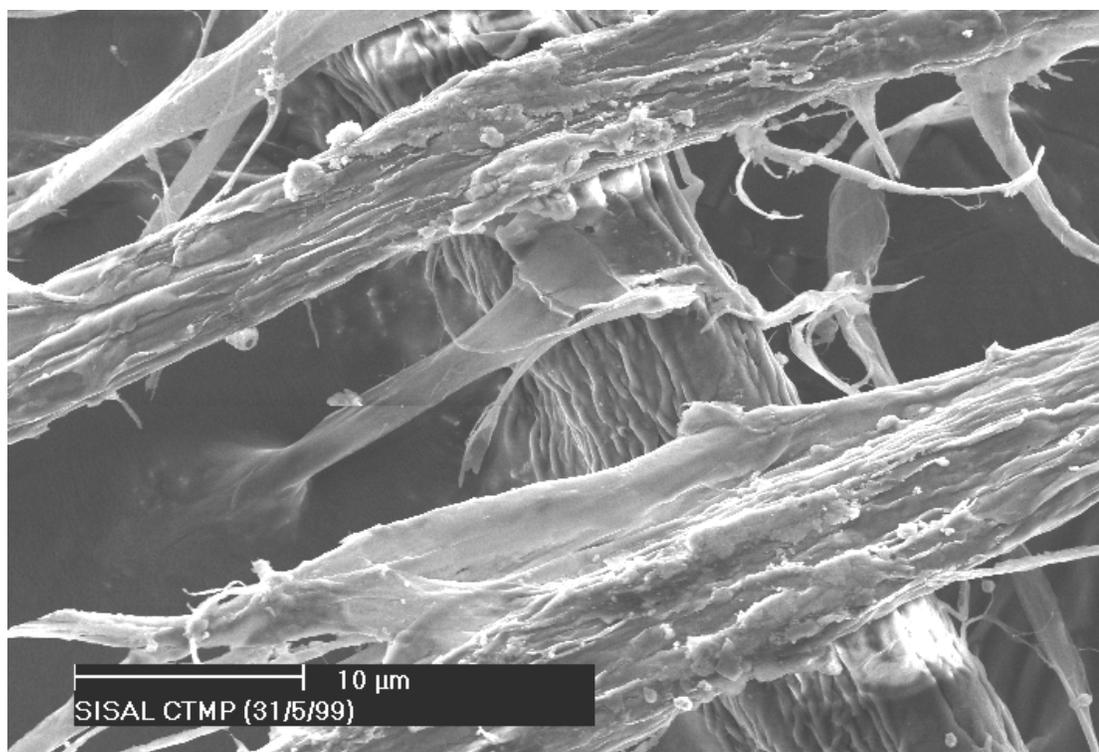


Fig. 5.9 Imagem ampliada da CTMP de sisal residual.

As figuras 5.8 e 5.9 mostram CTMP de sisal, com evidências de redução da fibra por ação mecânica, tais como extremidades quebradas, fibras com camada externa desfibrilada e filamentos retorcidos. Algumas impurezas da matéria-prima, que é de natureza residual, também parecem persistir na polpa, como se vê na figura 5.9, com maior ampliação da imagem.

Comportamento semelhante foi observado para fibras de banana (figuras 5.10 a 5.12), com refinamento marcante da CTMP de banana. Higgins (1996) também reportou resultados similares para *Pinus radiata*, sob ação do desfibrador Asplund, operado com baixas temperaturas de vapor (100 - 135°C), o que resultou em sistema disperso de microfibrilas, nas proximidades da temperatura de transição vítrea da lignina.

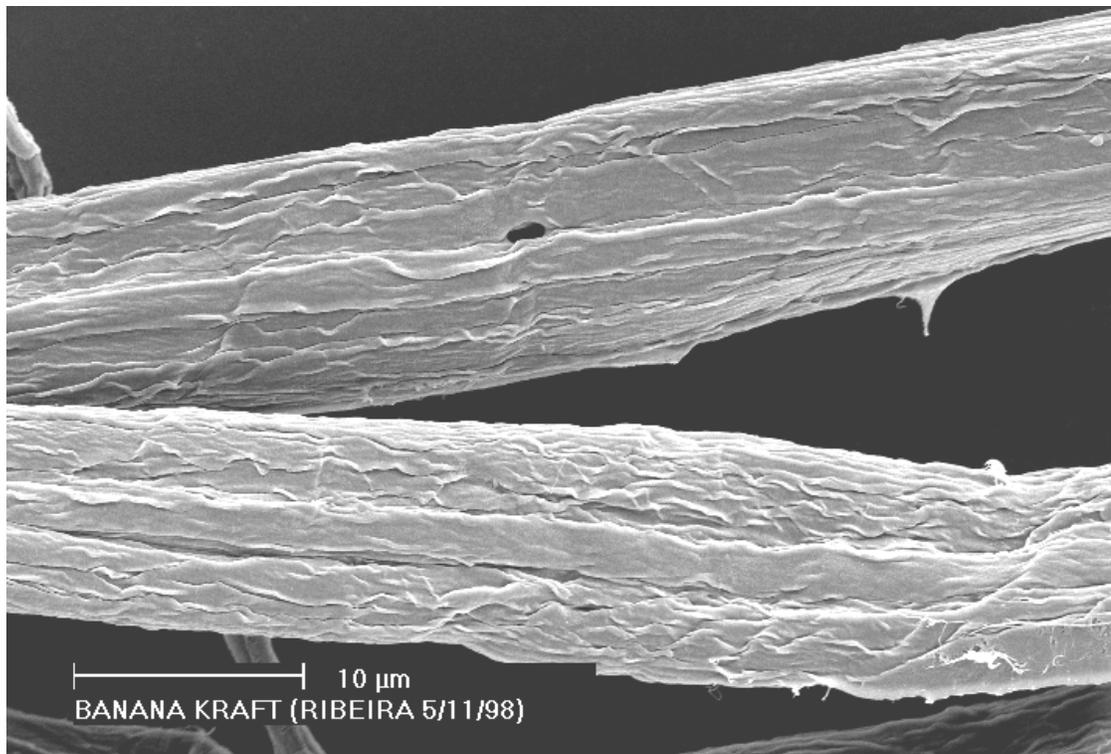


Fig. 5.10 Polpa kraft de banana.

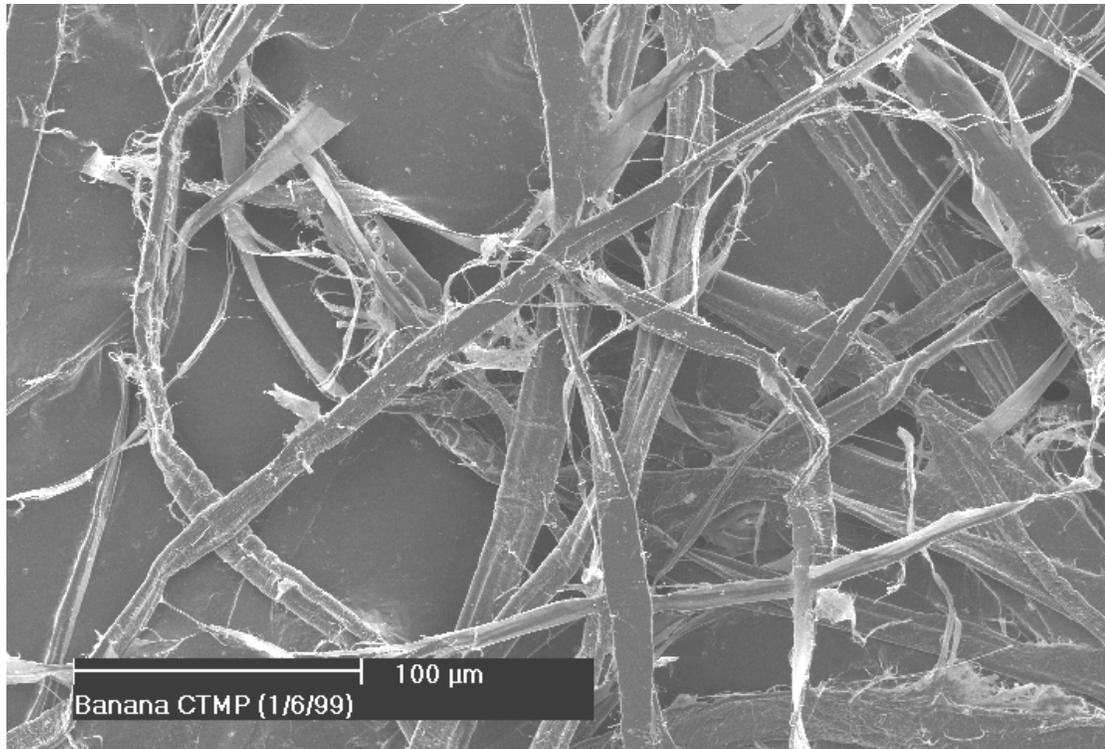


Fig. 5.11 CTMP de banana.

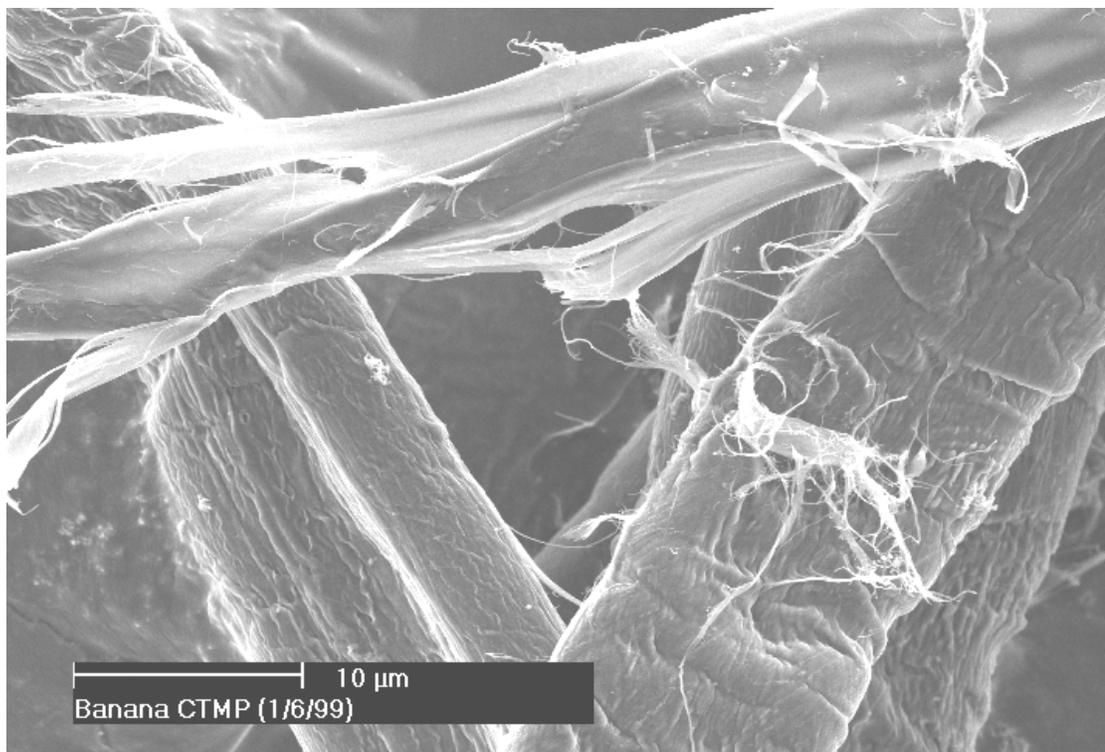


Fig. 5.12 Imagem ampliada da CTMP de banana.

CTMP de banana (figura 5.11) originou filamentos com forma de fita achatada, o que exerce efeito semelhante ao da fibrilação externa, para aumento da aderência da fibra com uma matriz. A figura 5.12 focaliza fibras severamente danificadas pelo tratamento mecânico, o que induz a existência também de fibrilação interna e redução da resistência à tração dos filamentos.

A polpa de eucalipto apresentou filamentos curtos (tabela 5.2) e ausência de fibrilação externa (figuras 5.13 e 5.14). Porém a combinação de outras características morfológicas permite a previsão de um desempenho aceitável dessas fibras residuais, como reforço de matrizes de cimento. As fibras parecem flexíveis, retorcidas e com superfície irregular, conforme também observado em estudos similares com reutilização de fibras de papel (Soroushian et al., 1995b). Elas apresentaram ainda retração lateral como característica irreversível de fibras recicladas (McKenzie, 1994). Além disso, o pequeno valor da massa por unidade de comprimento (tabela 5.2), em relação às demais polpas estudadas, indica maior quantidade de fibras para um dado teor utilizado, com ganho de eficiência no reforço da matriz. Como as fibras funcionam ao atravessar microfissuras nas matrizes frágeis, a resistência e a ductilidade do composto são diretamente relacionadas à quantidade de fibras, bem como à aderência entre as duas fases coexistentes.

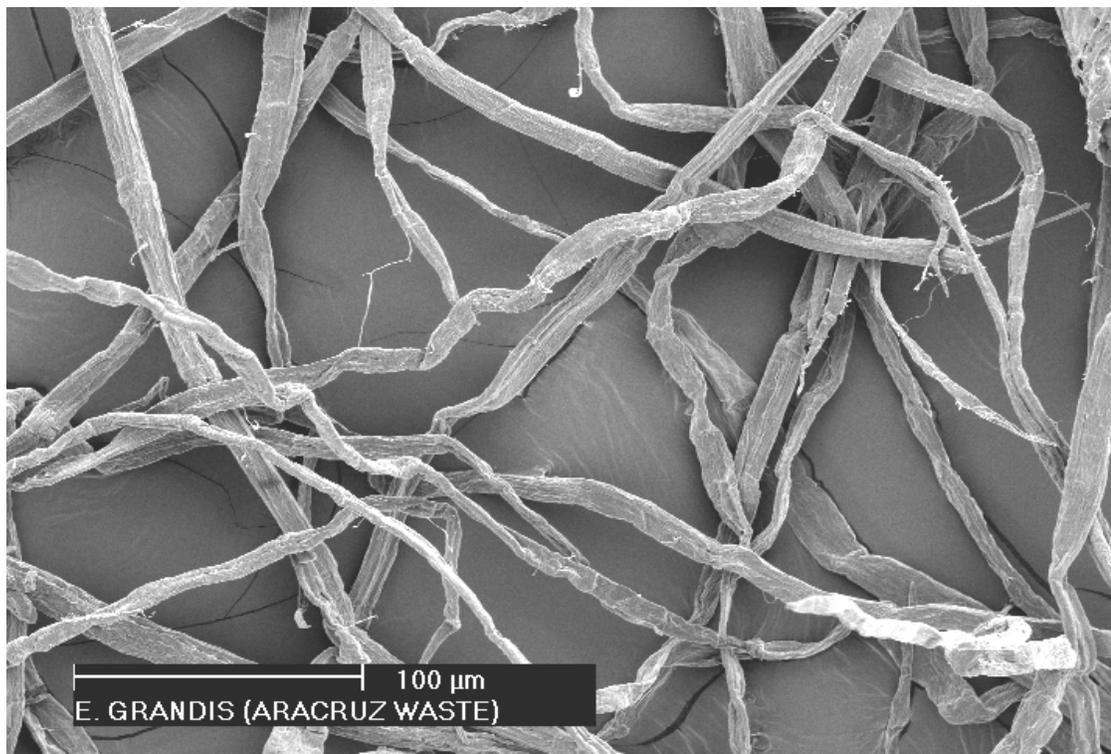


Fig. 5.13 Polpa de eucalipto residual após desintegração em água quente.

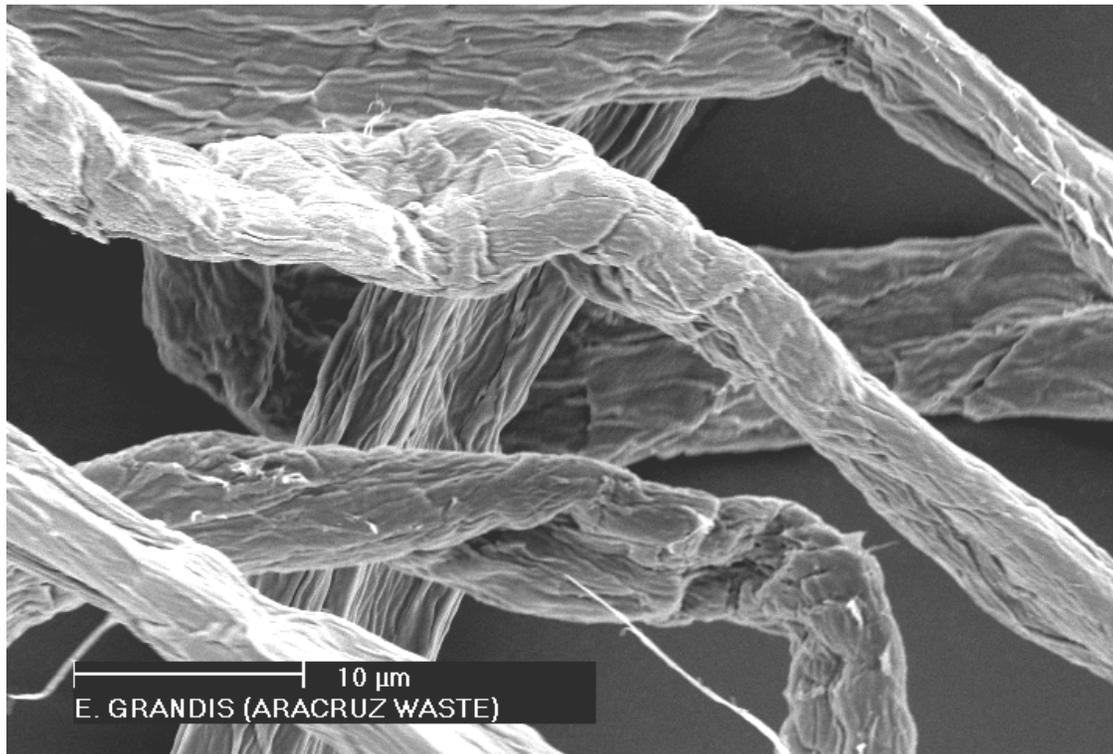


Fig. 5.14 Imagem ampliada da polpa residual de eucalipto.

O refinamento aplicado à polpa de *Pinus* produziu fibrilação (figura 5.15), e possivelmente também danos e encurtamento. Estes efeitos indesejáveis são esperados em razão do comprimento médio obtido (1,71 mm, ver tabela 5.2), aproximadamente a metade do comprimento original da fibra de *Pinus radiata* (Coutts, 1988).

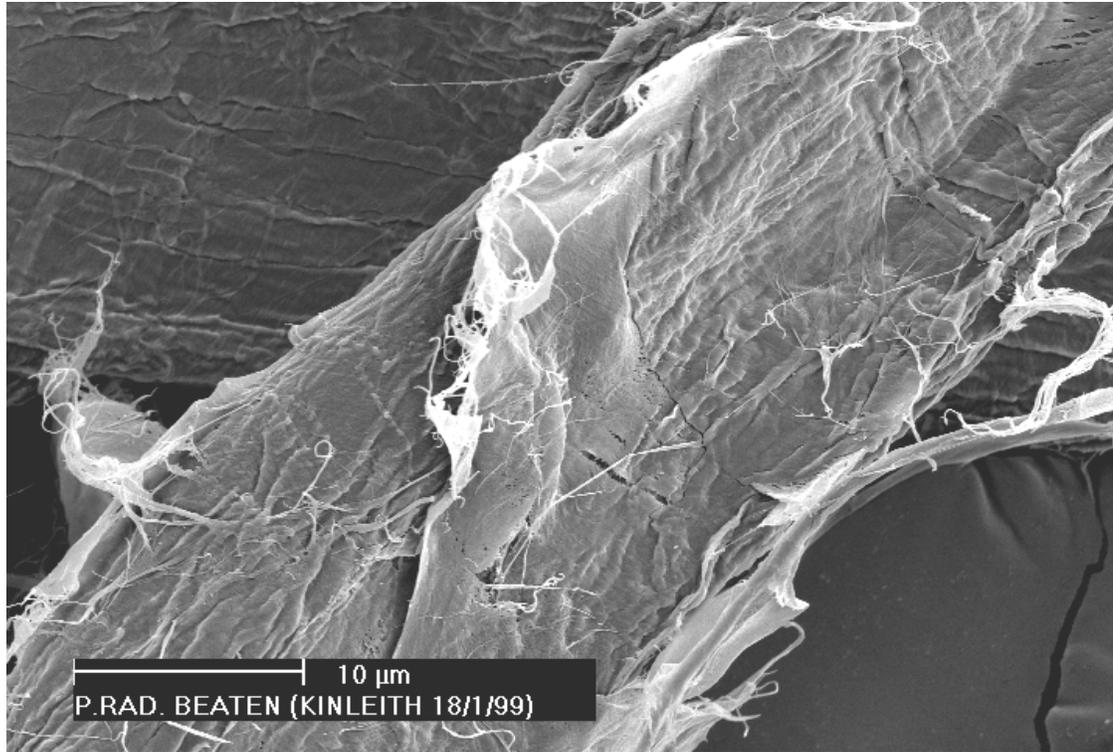


Fig. 5.15 Polpa kraft refinada de *Pinus radiata*.

5.5 Comentários finais

Polpas mecânicas de sisal e banana apresentaram fibras longas e com elevada fibrilação, como indicativos de bom refinamento, apesar de possível redução da resistência à tração dessas fibras. Procedimento adicional de peneiramento, com equipamento Somerville, permitiu a limpeza dos filamentos e separação dos finos, com a conseqüente adequação na drenabilidade das polpas (CSF entre 450 ml e 500 ml), em níveis compatíveis com o processo Hatschek.

A projeção de emprego moderado de energia, pelo presente método CTMP, também é atrativo: o desfibrador Asplund operou com baixa temperatura e foram suficientes três passos de refino, pelo equipamento Bauer, para se atingirem características aceitáveis das polpas.

O baixo rendimento dos processos CTMP, entre 35% e 45%, deve ser associado à natureza residual da matéria-prima, bem como à remoção do material não fibroso (finos) presente nas polpas. O condicionamento e a melhor limpeza desse material foram

aspectos fundamentais, para a obtenção de compósitos de bom desempenho, nas etapas subsequentes da pesquisa.

Polpa kraft parcialmente branqueada de eucalipto, proveniente de resíduo de indústria de celulose para papel, comportou-se diferentemente, com filamentos de baixa relação de aspecto e sem fibrilação das camadas externas da fibra. Por outro lado, esta delgada fibra residual apresentou outras características, julgadas importantes no reforço de matriz cimentícia. Superfície rugosa e reduzida massa por unidade de comprimento foram os aspectos considerados relevantes para ancoragem apropriada, distribuição homogênea e, por conseguinte, controle da fissuração da matriz frágil.

Com base nas características observadas, as diversas polpas, obtidas a partir de matéria-prima fibrosa residual, demonstraram sua potencialidade para emprego como reforço de materiais cimentícios e direcionados à construção de baixo custo.

6 FIBROCIMENTOS DE DESEMPENHO ELEVADO

Decisões recentes de eliminação, até 2003, do amianto crisotila, nos países europeus, são consideradas um significativo avanço para a idéia do banimento mundial, especialmente nos países em fase de desenvolvimento como o Brasil, em que já existem diversos casos de danos à saúde de trabalhadores da indústria de fibrocimentos (Giannasi; Thébaud-Mony, 1997).

Ao mesmo tempo, produtos de cimento amianto apresentam vital importância para a indústria de construção de baixo custo, especialmente para coberturas (Lee, 2000). No Brasil, a fabricação anual de produtos à base de cimento amianto para construção excede 2 milhões de toneladas, conforme informação da Associação Brasileira das Indústrias e Distribuidores de Produtos de Fibrocimento (ABIFibro), direcionados principalmente ao mercado de telhas onduladas de cobertura.

As tecnologias disponíveis para fibrocimentos livres de amianto, já consagradas no mundo desenvolvido, requerem investimentos vultosos e muitas vezes impraticáveis, se considerada a realidade dos países mais pobres. Assim, as sociedades em desenvolvimento devem procurar matérias-primas alternativas, como fibras e aglomerantes apropriados, diferentes da matéria-prima tradicional, a qual envolve alto custo e grande consumo de energia em sua obtenção. Adaptações na escala industrial, nas grandes fábricas existentes de fibrocimento, com base nos processos Hatschek e Magnani, também perfazem condição na busca por soluções habitacionais alternativas (Coutts, 1992). Por fim, outra preocupação é a durabilidade dos produtos, bem como sua compatibilidade à vida útil dos demais componentes das construções destinadas à populações de baixa renda.

O baixo desempenho mecânico de materiais à base de cimento reforçados com fibras naturais, em estudos anteriores (ver capítulo 2^o), pode ser fundamentalmente relacionado ao uso de macrofibras picadas, com produção do compósito por simples mistura em betoneira convencional, seguida de adensamento por vibração. Essas razões, aliadas a problemas de degradação das fibras vegetais no tempo (Savastano Jr. et al., 1997a), são identificadas como as principais razões da pequena aceitação desses produtos pela indústria. Como resultado, em muitos países ainda permanece a produção de cimento amianto como uma das únicas opções para construção de baixo custo.

O presente capítulo apresenta resultados de pesquisas focadas na potencialidade de fibras residuais como reforço de matrizes cimentícias (cimento Portland comum e escória de alto-forno moída), produzidos pelo processo de dispersão das matérias-primas em solução aquosa, drenagem à vácuo do excesso de água e prensagem, seguida de cura úmida por 7 dias, e cura ao ar, até a realização dos ensaios físicos e mecânicos. Também foi analisada a microestrutura desses compósitos fibrosos à base de matriz cimentícia. Superfícies de fratura indicaram as principais características do fenômeno de ruptura dos materiais. Superfícies cortadas e polidas permitiram a análise da zona de transição fibra-matriz e, também, a avaliação qualitativa da composição química dessas regiões do compósito.

6.1 Matérias-primas

Resíduos fibrosos de sisal e banana, e também polpa celulósica residual de eucalipto, todos provenientes de regiões produtoras no Brasil (ver disponibilidades no capítulo 3^o), foram enviadas para a CSIRO, Melbourne, Austrália. As fibras de sisal e banana foram preparadas na forma de polpas celulósicas kraft e mecânicas (CTMP); já a polpa residual de eucalipto foi desintegrada e limpa em água quente (ver itens 5.1 e 5.2). Além dos métodos produtivos de todas as polpas então obtidas, suas propriedades e características morfológicas seguem no capítulo 5^o. Polpa de *Pinus radiata* kraft mecanicamente refinada foi empregada como controle, a exemplo de estudos prévios (Coutts, 1988).

Cimento Portland comum para uso geral, marca Adelaide Brighton, Austrália, (40 MPa de resistência à compressão axial mínima aos 28 dias de idade), atendendo à especificação australiana AS 3972-1991, foi empregado como aglomerante referencial. Escória básica de alto-forno, proveniente da CST, Brasil, moída até a finura Blaine de 500 m²/kg, ativada por cal hidratada e gipsita, foi empregada como aglomerante alternativo. A caracterização da escória está disponível no capítulo 4^o.

6.2 Método de produção dos compósitos

As fibras foram empregadas em teores que variaram de 4 a 16% da massa de cimento (equivalentes, aproximadamente, ao intervalo entre 5% e 20% em volume de

compósito), sendo também empregada a matriz sem fibras como referência. As fibras eram dispersas em água, e então adicionado o aglomerante, por meio de agitador mecânico laboratorial de eixo vertical e velocidade de rotação média de 500 rpm, de modo a formar uma pasta fluida com teor de sólidos entre 20 e 30% em massa (ou 65%, no caso da matriz sem fibra). Após mistura por 5 min, o material era rapidamente transferido para uma câmara de moldagem com dimensões 125 mm x 125 mm, sujeita a sub-pressão (pressão manométrica negativa entre 60 e 80 kPa) em sua face inferior (ver figura 6.1). Imediatamente, a fonte de sub-pressão era acionada para retirada do excesso de água e formação de uma superfície sólida. A placa recém moldada era manualmente adensada com auxílio de soquete metálico de superfície plana e retangular, para depois ser reaplicada a sub-pressão, por mais 2 min, antes da desmoldagem. Três placas por formulação eram produzidas e, na seqüência, empilhadas, devidamente intercaladas com placas e telas metálicas, para prensagem simultânea por 5 min a 3,2 MPa. A seguir, as placas eram acondicionadas em um saco plástico selado, para condição de cura úmida em ambiente saturado, por 7 dias, após o que eram cortadas, com dimensão aproximada de 40 mm x 125 mm, por meio de serra circular com disco diamantado e refrigeração a água. Os corpos-de-prova assim obtidos mantiveram a mesma espessura original das placas, em torno de 6 mm, sendo acondicionados em ambiente controlado ($23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa), até a data de realização dos ensaios mecânicos, sob as mesmas condições ambientais.



Fig. 6.1 Câmara de metálica de sub-pressão para produção de compósito em laboratório.

6.3 Métodos de ensaio

As propriedades mecânicas foram medidas por ensaio de flexão com três cutelos (vão inferior de 100 mm), com determinação do módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e energia específica. A energia de fratura foi determinada pela integração da curva tensão x deformação, até o ponto de redução de 50% da carga máxima, sendo a energia específica o resultado da divisão dessa energia pela área da seção transversal do corpo-de-prova na região de fratura. Todos os testes foram realizados em máquina universal de ensaios Instron modelo 1185, com velocidade de carga de 0,5 mm/min e nove corpos-de-prova por formulação. A seguir, foram determinadas propriedades físicas, segundo a ASTM C 948-81, tomando-se seis corpos-de-prova oriundos dos ensaios de flexão.

Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados utilizando-se equipamento Philips XL30, com imagem de elétrons secundários (tensão aceleradora em torno de 5,0 kV), para análise de superfícies de fratura, e imagem de elétrons retroespalhados (tensão aceleradora de 15,0 kV), para análise de superfícies polidas preparadas com base em recomendações de Savastano Jr.; Agopyan (1999) e Wang;

Scrivener (1995). Foi ainda aplicada, a vácuo, camada de alguns micrometros de carbono sobre a superfície da amostra, para aumento da sua condutividade, durante a análise microscópica.

6.4 Compósitos à base de cimento Portland

Nesta fase inicial, foram testados os resíduos de sisal e banana, em forma de polpa kraft (ver detalhes nas tabelas 5.1 e 5.2), além da polpa residual de eucalipto e kraft refinado de *Pinus radiata* (tabela 5.2), como reforço do cimento Portland comum (descrito no item 6.1).

Os resultados físicos e mecânicos médios, acompanhados pelos respectivos desvios padrão, são apresentados nas tabelas 6.1 a 6.4, para todos os materiais produzidos.

Para estudo da diferenciação estatística entre médias, realizou-se análise de variância dos resultados obtidos, com nível de significância igual a 5%.

6.4.1 Resistência à flexão e módulo de elasticidade

Com a proporção de 8% de fibras em relação à massa de cimento, todas as fibras estudadas levaram a aumentos da resistência à tração na flexão de pelo menos 65%, em relação à matriz sem reforço, aos 28 dias de idade (tabelas 6.1 a 6.4). Apesar da tendência de aumento (exceção feita ao caso da fibra de sisal), as resistências observadas para compósitos com 12% de fibra não foram significativamente diferentes daquelas referentes aos compósitos com 8% de fibra. Para um determinado teor de reforço, a única diferença significativa, entre as resistências dos compósitos reforçados com fibras residuais, foi observada para 8% de fibra de banana, que foi menor. Apesar de sua relação de aspecto inferior (ver tabela 5.2), a fibra de eucalipto demonstrou bom desempenho, com resultados de resistência dos compósitos similares àqueles reforçados com fibras de sisal, com teores de 4 e 8%. Para teor igual a 12%, a fibra de eucalipto proporcionou os resultados mais altos entre os compósitos estudados com reforço de resíduos vegetais. A aparente redução da resistência dos compósitos com fibra de sisal, para esse teor mais elevado de fibras, pode ser associada à difícil distribuição de fibras mais longas na matriz. Resultados análogos foram previamente obtidos por estudos com argamassas de cimento reforçadas com polpa de sisal (Coutts; Warden, 1992).

Tabela 6.1 Propriedades do cimento Portland reforçado com polpa kraft refinada de *Pinus radiata*, aos 28 e 42 dias de idade.

Teor de fibra (% em massa)	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência à tração na flexão (MPa)		Energia específica (kJ/m ²)		Absorção de água (% em massa)	Massa específica (kg/m ³)	Vazios permeáveis (% em vol.)
	28 dias	42 dias	28 dias	42 dias	28 dias	42 dias			
0	23,5 (4,6)	23,9 (4,3)	11,8 (3,7)	12,9 (2,5)	0,04 (0,01)	0,04 (0,01)	10,7 (0,5)	2180 (30)	23,4 (0,8)
4	13,8 (1,4)	15,3 (0,7)	19,2 (1,9)	19,9 (1,7)	0,64 (0,09)	0,60 (0,10)	18,5 (0,5)	1690 (20)	31,1 (0,5)
8	10,3 (0,8)	10,7 (0,8)	23,5 (0,8)	24,3 (1,4)	1,32 (0,11)	1,39 (0,23)	22,3 (0,5)	1540 (20)	34,3 (0,5)
12	8,21 (0,69)	8,51 (0,53)	25,0 (2,1)	26,0 (1,5)	1,93 (0,42)	2,12 (0,12)	24,4 (0,6)	1460 (30)	35,6 (0,3)

Tabela 6.2 Propriedades do cimento Portland reforçado com polpa kraft de sisal, aos 28 e 42 dias de idade.

Teor de fibra (% em massa)	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência à tração na flexão (MPa)		Energia específica (kJ/m ²)		Absorção de água (% em massa)	Massa específica (kg/m ³)	Vazios permeáveis (% em vol.)
	28 dias	42 dias	28 dias	42 dias	28 dias	42 dias			
4	14,5 (1,9)	15,2 (1,1)	16,5 (0,6)	16,5 (1,3)	0,39 (0,06)	0,36 (0,05)	17,9 (0,3)	1700 (10)	30,5 (0,5)
8	10,9 (1,13)	11,4 (1,13)	21,5 (1,6)	20,7 (1,6)	0,92 (0,13)	0,86 (0,16)	19,9 (0,7)	1540 (20)	30,7 ± 0,8
12	7,54 (0,42)	7,73 (0,41)	20,3 (1,4)	19,4 (2,0)	1,41 (0,20)	1,29 (0,16)	23,6 (1,1)	1410 (20)	33,2 ± 1,2

Tabela 6.3 Propriedades do cimento Portland reforçado com polpa kraft de banana, aos 28 dias de idade.

Teor de fibra (% em massa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Energia específica (kJ/m ²)	Absorção de água (% em massa)	Massa específica (kg/m ³)	Vazios permeáveis (% em vol.)
4	13,1 (1,5)	15,5 (1,3)	0,21 (0,03)	16,5 (0,2)	1710 (20)	28,2 (0,3)
8	8,85 (0,81)	19,5 (1,4)	0,53 (0,08)	18,4 (0,4)	1580 (20)	29,0 (0,7)
12	7,04 (1,22)	20,1 (2,5)	1,01 (0,15)	21,4 (0,9)	1500 (40)	32,1 (0,8)

Tabela 6.4 Propriedades do cimento Portland reforçado com polpa kraft residual de eucalipto, aos 28 dias de idade.

Teor de fibra (% em massa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Energia específica (kJ/m ²)	Absorção de água (% em massa)	Massa específica (kg/m ³)	Vazios permeáveis (% em vol.)
4	15,3 (0,9)	15,6 (0,8)	0,29 (0,04)	16,8 (0,8)	1780 (30)	29,8 (0,8)
8	11,4 (0,9)	21,4 (0,9)	0,82 (0,11)	20,7 (0,7)	1600 (20)	33,3 (0,6)
12	8,04 (1,06)	22,2 (1,3)	1,50 (0,18)	24,8 (0,8)	1470 (20)	36,5 (0,6)

As resistências dos compósitos reforçados com fibras de *Pinus radiata* excederam as dos demais compósitos com fibras residuais, o que se justifica pela qualidade superior dessa fibra comercial, bem como pelo seu refinamento prévio, este último responsável pelo aumento da aderência fibra-matriz.

Propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibra de banana foram muito similares aos resultados reportados por Zhu et al. (1994), cujos procedimentos de polpação serviram de base para o presente estudo (ver capítulo 5º). O baixo desempenho mecânico dos compósitos reforçados com sisal e banana podem ser associados à natureza residual dessas fibras. Apesar do baixo rendimento obtido para as duas polpas (tabela 5.2), a polpa de sisal ainda apresentava impurezas não fibrosas após peneiramento no equipamento Packer. A polpa de banana apresentou cheiro forte e cor escura, sugerindo presença de extrativos junto às fibras.

As tabelas 6.1 e 6.2 mostram o comportamento de compósitos de *Pinus radiata* e sisal em duas idades diferentes. Os resultados aos 28 e 42 dias, para os dois compósitos fibrosos e ainda matriz sem fibras, indicaram que o pequeno intervalo de tempo entre os testes não foi suficiente para mostrar qualquer variação real em decorrência da idade. Assim, ensaios de longa duração foram iniciados e os resultados parciais obtidos até o momento, seguem comentados no item 6.7.

O módulo de elasticidade reduziu-se com o aumento do teor de fibras. Assim, o módulo de matriz sem fibras de cimento Portland foi aproximadamente igual a 24 GPa e caiu continuamente até a faixa de 7,0 GPa - 8,2 GPa, independente da fibra de reforço. A idade pareceu aumentar o módulo dos dois compósitos em estudo, embora sem comprovação estatística, para o presente caso. Esse comportamento pode provavelmente ser associado ao aumento da resistência à compressão desses materiais (Lea, 1970).

O elevado desvio padrão dos resultados de módulo de elasticidade da matriz sem reforço é consequência de fissuração heterogênea, proveniente de tensões geradas pela retração na secagem do material.

6.4.2 Ductilidade

Essa propriedade foi significativamente melhorada pela inclusão das fibras. Com teores de 12% de fibras, a ductilidade, em termos de energia específica absorvida pelo compósito (ver item 6.3), excedeu $1,0 \text{ kJ/m}^2$, o que representa aumento de 25 vezes da

energia absorvida em relação à matriz frágil sem reforço. Esses resultados também representam superioridade em relação aos apresentados por Savastano Jr.; Agopyan (1999), em que pasta de cimento Portland reforçada com macrofibras de sisal picado apresentaram energia específica de $0,5 \text{ kJ/m}^2$. Nesse estudo anterior, a preparação do compósito envolveu apenas mistura tradicional em betoneira laboratorial.

As tabelas 6.1 a 6.4 trazem resultados da energia específica em relação à proporção de fibras empregadas, aos 28 dias, para diversos compósitos reforçados com fibras naturais.

Ductilidade é freqüentemente relacionada ao comprimento da fibra de reforço, pois, à medida que ocorre o carregamento do material, as tensões são transferidas da matriz para as fibras. Descolamentos podem aparecer na interface e a fibra pode ser arrancada da matriz, gerando perdas de energia por atrito, que contribuem para a ductilidade da fratura (Coutts, 1986b). Já no caso da polpa kraft de banana, a baixa resistência da fibra ora obtida, combinada ao seu comprimento elevado, pode explicar a baixa resistência dos compósitos, e igualmente sua ductilidade inferior, resultado da predominância de fibras fraturadas (ver item 6.4.4).

Novamente o desempenho dos compósitos reforçados com *Pinus radiata* se sobressaiu significativamente em relação aos daqueles com emprego de fibras residuais. Acredita-se que esse melhor comportamento esteja associado a uma aderência fibra-matriz adequada, como discutido no item 6.4.4 e também por Coutts (1988).

Nenhuma variação significativa da ductilidade foi observada para os compósitos à base de sisal e *Pinus radiata*, ao longo do intervalo de tempo estudado (tabelas 6.1 e 6.2).

6.4.3 Massa específica e absorção de água

Massa específica, absorção de água e porosidade são propriedades físicas inter-relacionadas. As tabelas 6.1 a 6.4 mostram que, à medida que o teor de fibra aumenta, a massa específica diminui e a absorção de água cresce significativamente, inclusive como já reportado por estudos análogos (Eusebio et al., 1998 e Soroushian et al., 1995a).

Após queda inicial mais intensa, correspondente à adição de 4% de fibras, a massa específica manteve-se em queda aproximadamente constante à medida que o teor de fibra aumentava, com decréscimo total em torno de 30-35% para teor de fibra de 12%.

Esse comportamento é interessante na obtenção de materiais de construção leves, embora a absorção de água tenha mais do que dobrado para 12% de fibras.

6.4.4 Análise microestrutural

Polpa kraft de *Pinus radiata* mostrou formato de fita e pequena relação de aspecto (comprimento/espessura), provavelmente em razão do refino mecânico no equipamento Valley. A figura 6.2 mostra bom desempenho conjunto da fibra e da matriz de cimento, com filamentos de formato helicoidal (resultado do colapso de suas camadas internas), extremidades fraturadas dos filamentos arrancados e incrustações superficiais da matriz.

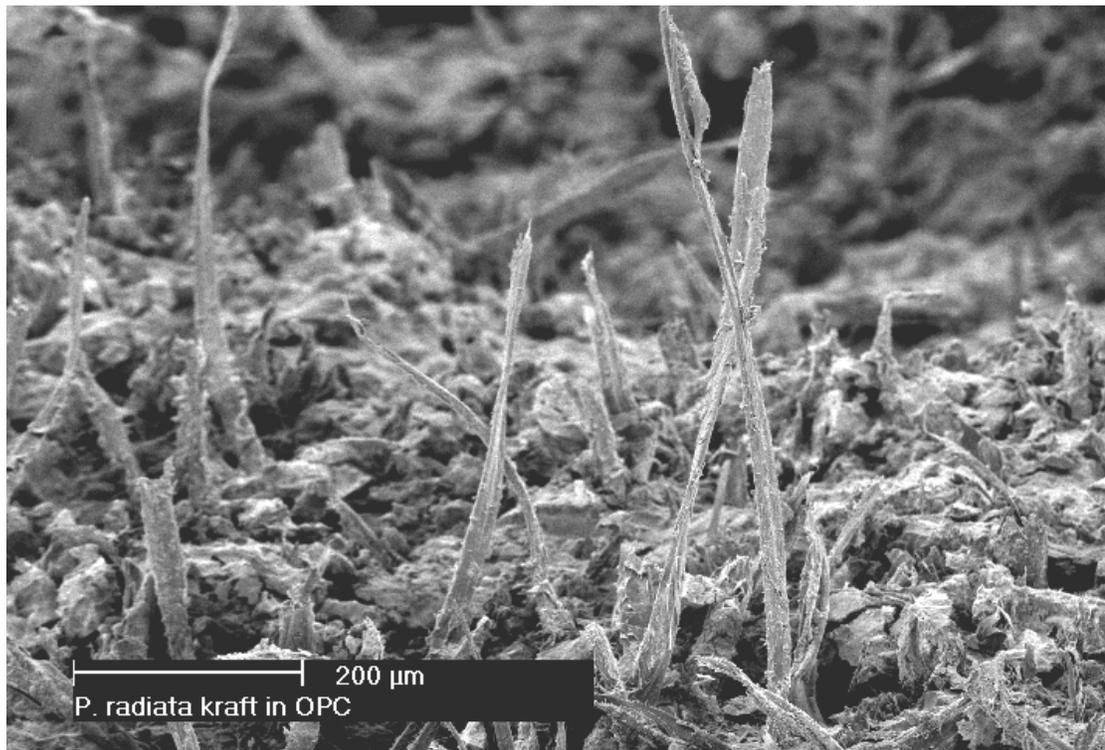


Fig. 6.2 MEV. Imagem de elétrons secundários de matriz de cimento Portland comum reforçada com 4% em massa de polpa refinada de *Pinus radiata*. Idade de hidratação: 240 dias.

A figura 6.3 mostra macrofibras de sisal em cimento Portland, em que se consegue visualizar filamentos (células individuais) dentro de cada 'feixe', com a conseqüente superfície de contato reduzida entre as fases do compósito. Em razão das dimensões das macrofibras, e também da sua rigidez, foi impraticável o emprego de quantidade

superior a 4% em massa de cimento, com o emprego de argamassadeira laboratorial. Durabilidade é outra consideração importante, visto que as células individuais são ligadas umas às outras por lignina, que se decompõe facilmente em meios alcalinos, levando a perdas consideráveis no desempenho mecânico do compósito à base de cimento Portland (Gram, 1988).

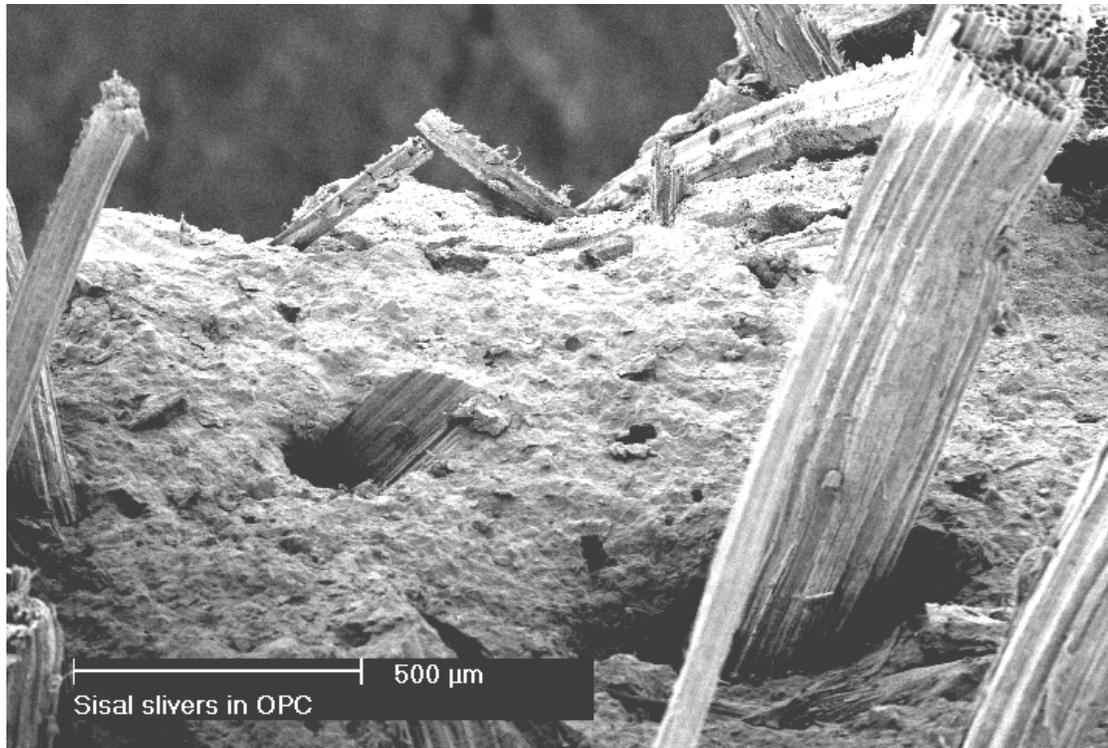


Fig. 6.3 MEV. Imagem de elétrons secundários de matriz de cimento Portland comum reforçada com 4% em massa de macrofibras de sisal. Idade de hidratação: 138 dias.

Já no caso de sisal kraft em cimento Portland (figura 6.4), nota-se a melhor distribuição dos filamentos no interior da matriz frágil. Observa-se ainda a predominância do arrancamento de filamentos longos em detrimento da sua fratura. Esse aspecto poderia ser otimizado com o refinamento da fibra e, assim, melhor desempenho mecânico do compósito.

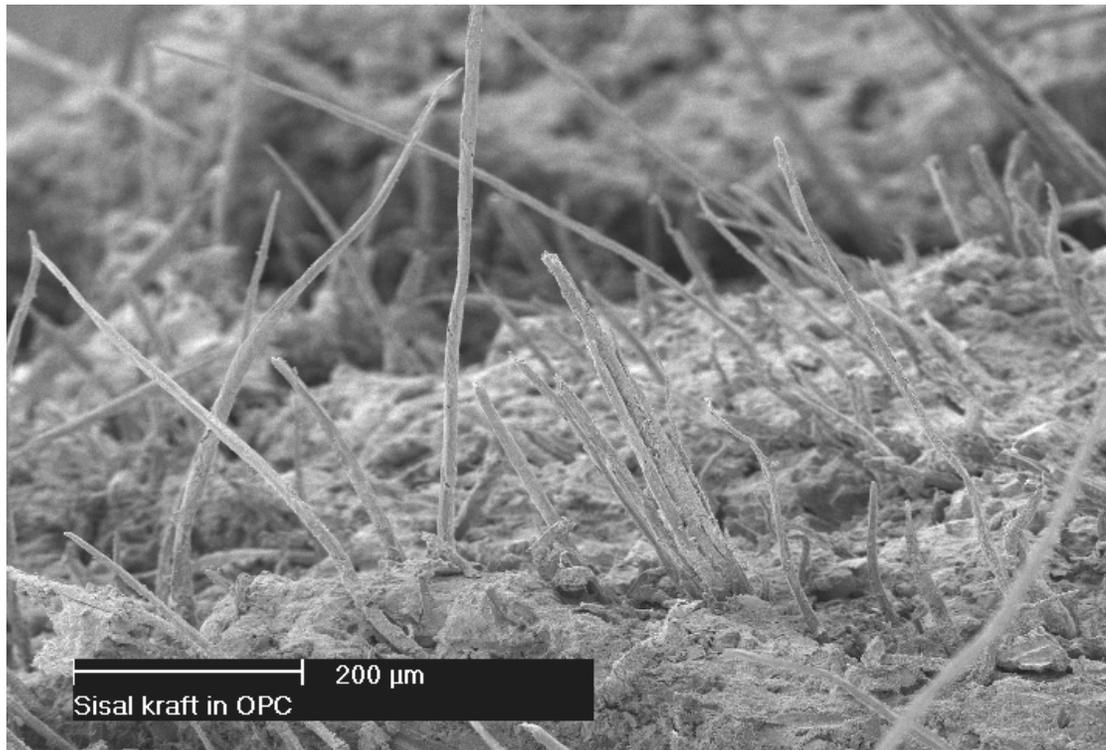


Fig. 6.4 MEV. Imagem de elétrons secundários de matriz de cimento Portland comum reforçada com 4% de polpa kraft de sisal. Idade de hidratação: 226 dias.

De modo diferente foi a fratura dos compósitos reforçados com fibras de banana (figura 6.5), com predominância de fratura dos filamentos (antes que arrancamento desejável pudesse ocorrer), com a resultante baixa energia absorvida no estágio de pós-fissuração do compósito. Esse comportamento poderia ser esperado para compósitos submetidos a cura ao ar, conforme considerações de Bentur; Akers (1989), com a diferença favorável, no presente estudo, de que os lumens dos filamentos aparecem livres da deposição de produtos de hidratação do cimento (fenômeno de "petrificação" da fibra).

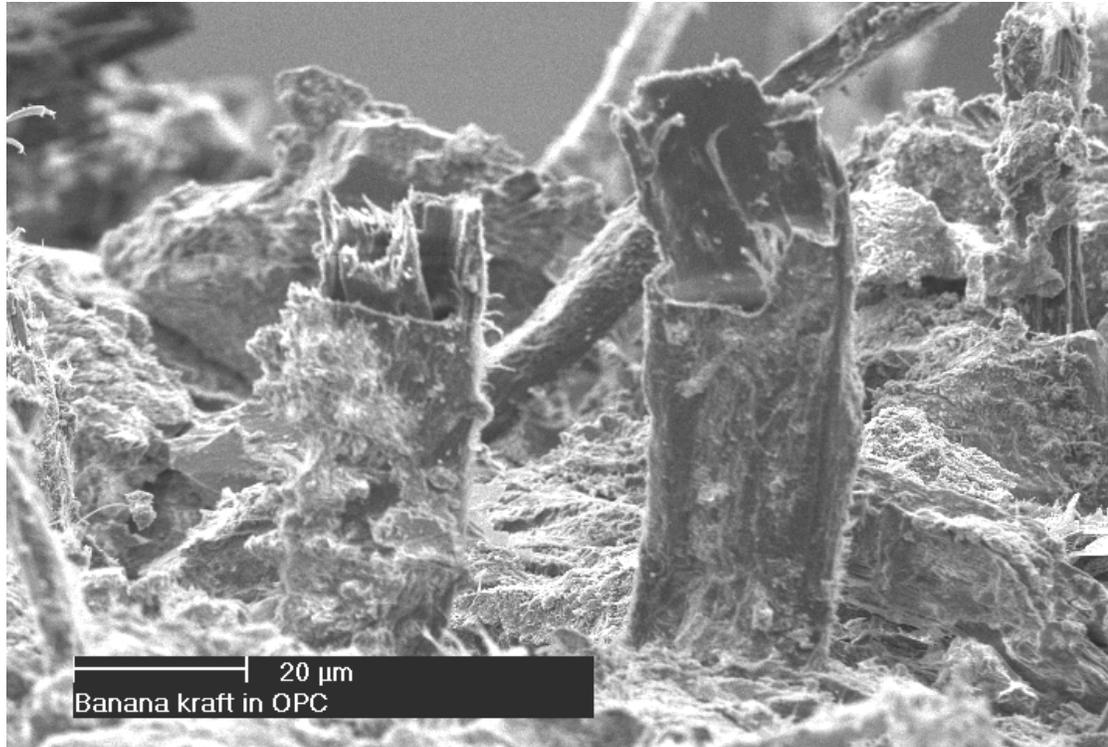


Fig. 6.5 MEV. Imagem de elétrons secundários de matriz de cimento Portland comum reforçada com polpa kraft de banana. Idade de hidratação: 140 dias.

6.4.5 Comentários adicionais

Polpas kraft a partir de resíduos de sisal e banana, além de polpa residual de eucalipto, demonstraram boa adequação ao uso em fibrocimentos produzidos segundo modelo Hatschek, em escala laboratorial. Essas fibras, em teores de 12% em massa de matriz de cimento Portland, deram origem a compósitos com resistência da ordem de 20 MPa e ductilidade no intervalo de 1,0-1,5 kJ/m². As propriedades físicas estiveram de acordo com resultados de estudos similares para outras fibras naturais. Embora o comportamento mecânico dos compósitos reforçados com fibras residuais esteja aquém do obtido com fibras de *Pinus radiata*, esses materiais alternativos podem ser atrativos para uso na construção de moradias de baixo custo. Melhoras dos resultados ainda poderiam ser esperadas pela otimização no processo produtivo e também pelo refino mecânico das fibras.

Por fim, algumas características favoráveis da fibra residual de eucalipto precisam ser destacadas:

- Resíduo sem valor comercial disponível em grandes quantidades e próximo a grandes áreas urbanas brasileiras.
- Como as fibras já se encontram na forma de polpa, há necessidade de pouca energia de processamento (apenas desintegração em água quente).
- Fácil dispersão na matriz de cimento, mesmo em teores elevados.
- Desempenho aceitável como reforço de compósitos cimentícios.

6.5 Avaliação da matriz de escória de alto-forno em compósitos fibrosos

Conforme descrito no item 6.1, na presente etapa da pesquisa cooperativa realizada na CSIRO, Austrália, a escória de alto-forno foi ativada por uma combinação de gipsita e cal hidratada, em diversas proporções. Para reforço, foram empregados teores de polpa kraft refinada de *Pinus radiata* entre 0 e 12%, conforme identificado na tabela 6.5. Foram ainda testados, como ativadores da escória, dois teores diferentes de cimento Portland (o mesmo descrito no item 6.1), com base em estudo realizado por Richardson et al. (1989).

A tabela 6.5 traz ainda projeção de preços do mercado brasileiro, com clara vantagem para os aglomerantes de escória ativada por gipsita residual (fosfogipso) e cal. Compósitos à base de matriz de cimento Portland comum também são apresentados a título de referência.

O processo produtivo empregado para os compósitos foi idêntico ao exposto no item 6.2 e demonstrou ser adequado para aglomerantes à base de escória, de comportamento muito similar ao dos compósitos à base de cimento Portland.

6.5.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão e energia específica, aos 28 dias de idade, obtidos conforme exposto no item 6.3, seguem sintetizados nas figuras 6.6 e 6.7. Nesses gráficos, as barras verticais evidenciam o desvio padrão acima e abaixo de cada ponto médio. Em razão de microfissuras, originadas no processo de retração por secagem, as matrizes sem reforço apresentaram elevados desvios padrão para diversos resultados de resistência. Assim, sugere-se que compósitos com 4% de fibras sejam preferidos para análise da matriz.

Tabela 6.5. Descrição das formulações do cimento de escória de alto-forno e teores de fibra ensaiados.

Código da formulação	Formulação da escória de alto-forno (EAF)					Teores de fibra (% da massa de aglomerante)
	EAF (% em massa)	CP (% em massa) ⁽¹⁾	Gipsita (% em massa) ⁽²⁾	Cal (% em massa) ⁽³⁾	Preço (US\$/t) ⁽⁴⁾	
EAF 6%G 2%C	92	–	6	2	25,17	0 – 4 – 8 – 12
EAF 10%G 2%C	88	–	10	2	24,76	4 – 8 – 12
EAF 8%G 4%C	88	–	8	4	25,76	4 – 8 – 12
EAF 10%G 4%C	86	–	10	4	25,55	0 – 4 – 8 – 12
EAF 6%G 8%C	86	–	6	8	27,54	0 – 4 – 8 – 12
EAF 5%CP	95	5	–	–	28,12	0 – 4
EAF 10%CP	90	10	–	–	31,23	0 – 4
CP ⁽¹⁾	–	100	–	–	87,32	0 – 4 – 8 – 12

⁽¹⁾ Cimento Portland (CP), marca Adelaide Brighton, tipo GP (Australian Standard AS 3972 1991), Austrália

⁽²⁾ Gipsita (G) de uso agrícola, marca Garden King, Austrália (cálcio na forma de sulfato de cálcio 18,5% em massa e enxofre como sulfato de cálcio 14,5% em massa).

⁽³⁾ Cal hidratada (C) comercial, para uso em construção, marca Adelaide Brighton, Austrália (AS 1672).

⁽⁴⁾ Projeção de preços para mercado brasileiro, convertidos para US\$ em março/1999, para materiais similares. Cotações: cimento Portland e cal hidratada do mercado varejista de construção; gipsita do mercado de suprimentos agrícolas.

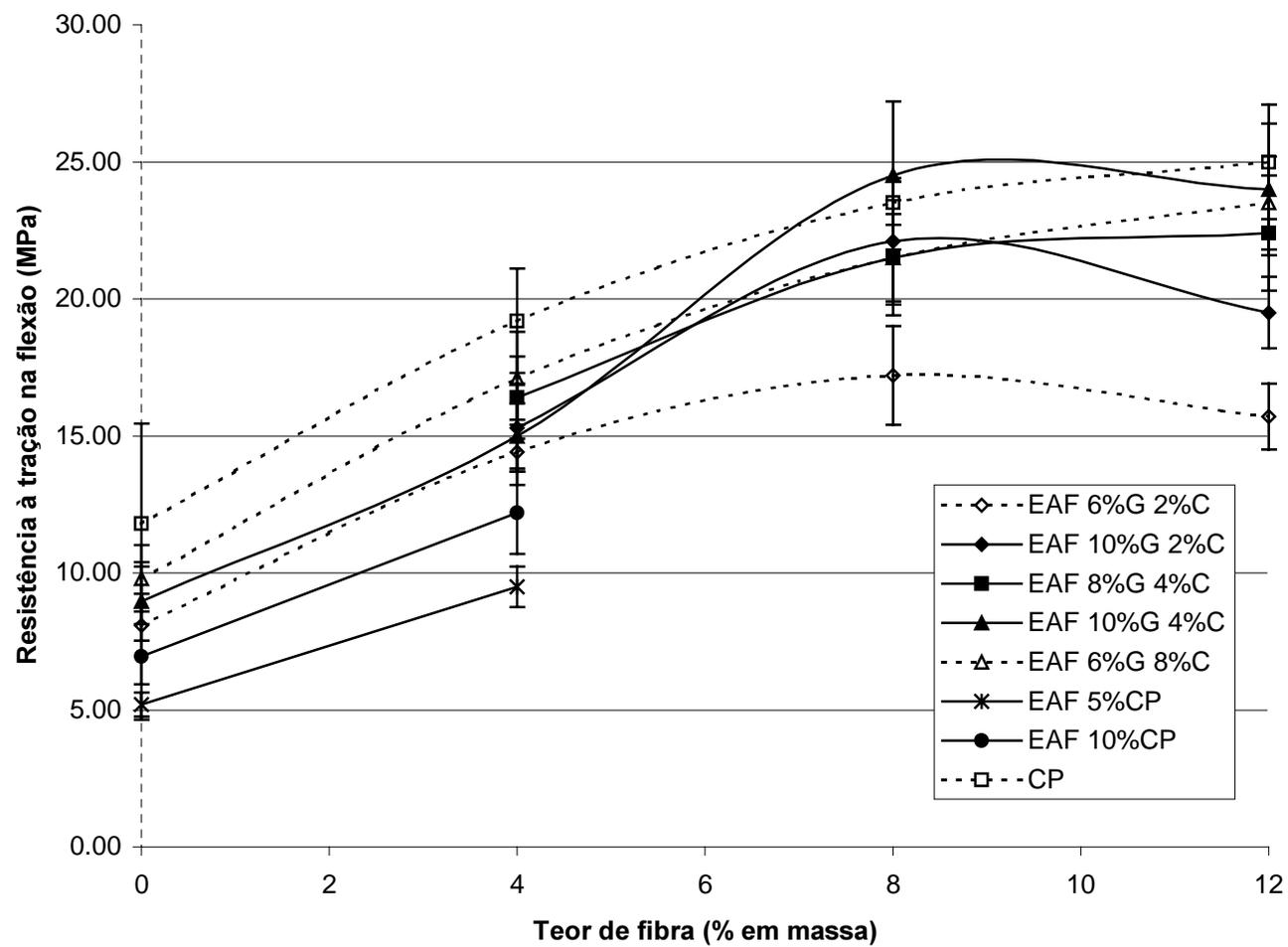


Fig. 6.6 Resistência à tração na flexão para diversas formulações de compósito reforçado com kraft de *Pinus radiata*, aos 28 dias.

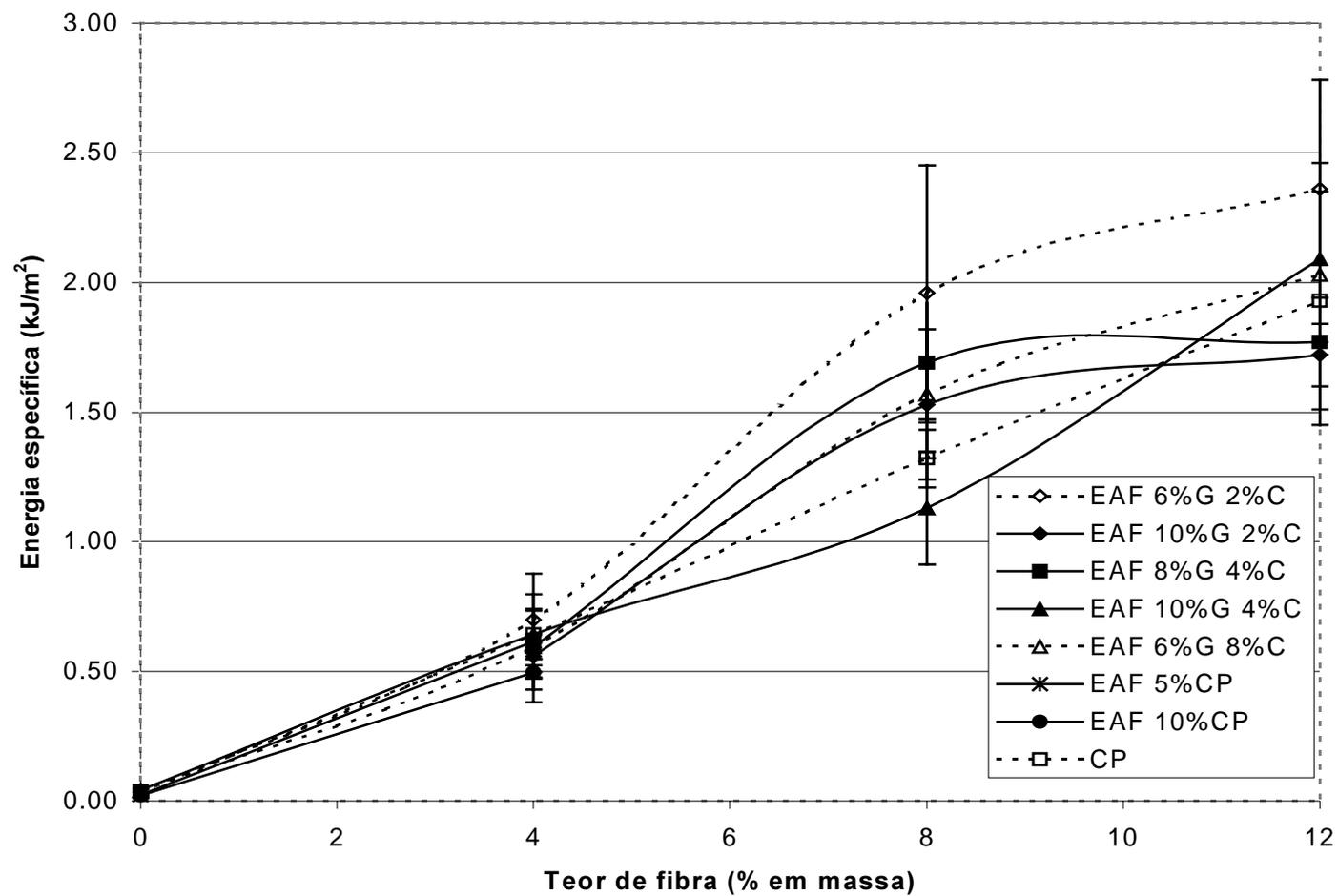


Fig. 6.7 Energia específica para diversas formulações de compósito reforçado com kraft de *Pinus radiata*, aos 28 dias.

O compósito EAF 6%G 2%C (abreviatura para cimento de escória de alto-forno ativado por 6% de gipsita e 2% de cal hidratada, teores em massa) apresentou aumento de resistência superior a 100% para 8% de *Pinus radiata* em comparação ao padrão sem reforço. A mesma duplicação foi detectada para cimento Portland com 8% da mesma fibra, o que demonstra comportamento mecânico semelhante das duas matrizes ao serem reforçadas por fibras celulósicas.

Conforme ilustrado na figura 6.6, o melhor resultado de resistência à tração na flexão foi de 24,5 MPa, atingido pelo compósito EAF 10%G 4%C, com 8% de fibra, ligeiramente superior ao compósito à base de cimento Portland, e seguido de perto pelas formulações EAF 10%G 2%C, EAF 8%G 4%C e EAF 6%G 8%C.

Usando-se compósitos de EAF com 4% de fibras de *Pinus radiata* para análise das matrizes, observam-se melhores resultados para as formulações ativadas com gipsita e cal, em relação àquelas ativadas com cimento Portland, aparentemente em desacordo com Sato et al. (1986). Como a resistência à tração na flexão da formulação EAF 10%CP (abreviatura para escória ativada por 10% em massa de cimento Portland) foi aproximadamente 30% superior à da formulação com EAF 5%CP, imagina-se que teores ainda mais altos desse ativador possam levar a resultados mais interessantes, como ocorre nos cimentos compostos comercialmente disponíveis. Por outro lado, há também que se observar a projeção de custos, a partir dos valores apresentados tabela 6.5, visto que o cimento Portland é um ativador comparativamente caro.

Outros possíveis mecanismos de ativação podem envolver cura a temperaturas elevadas (de até 60°C, p. ex., como indicado por Richardson et al., 1989), ou combinação de cimento Portland com outros ativadores alcalinos (ex.: silicato de sódio, como proposto por Shi, 1996 e Douglas; Brandstetr, 1990).

Como se vê na figura 6.6, os melhores resultados de resistência se situam entre 8% e 12% de fibra, com influência relativamente pequena da matriz utilizada, o mesmo sendo válido para compósitos à base de cimento Portland.

Os resultados do estudo presente representaram uma significativa melhoria em relação àqueles reportados no capítulo 4º, em que matrizes de argamassa de escória com 10% de fosfogipso e 4% de cal hidratada, em massa, reforçada com polpa de eucalipto residual, mostraram resistência à tração na flexão inferior a 5 MPa, pelo processo de preparação por simples mistura.

6.5.2 Ductilidade

Na figura 6.7, observa-se que compósitos reforçados com 12% de fibra apresentaram energia específica entre 1,72 kJ/m² (EAF 10%G 2%C) e 2,36 kJ/m² (EAF 6%G 2%C), com enorme acréscimo em relação às matrizes sem fibras (0,02-0,04 kJ/m²), seguindo o mesmo comportamento dos compósitos à base de cimento (Coutts, 1988). A elevada ductilidade dos compósitos com formulação EAF 6%G 2%C pareceu decorrer de sua resistência à tração na flexão mais baixa (figura 6.6). Assim, a resistência da matriz demonstrou ser inferior às tensões de aderência fibra-matriz, com elevada absorção de energia pela microfissuração da pasta na região interfacial com a fibra (ver ainda figura 6.10).

Com exceção da formulação EAF 6%G 2%C, todas as demais mostraram valores similares de energia específica absorvida, e ainda muito próximas dos compósitos referenciais à base de cimento Portland.

6.5.3 Comentários adicionais

Nesta etapa do trabalho, a formulação EAF 10%G 2%C mostrou compromisso desejável entre as propriedades mecânicas analisadas, com a vantagem de preços mais baixos projetados para o mercado brasileiro. Também essa formulação tem a seu favor bons resultados de durabilidade de argamassas reforçadas com macrofibras vegetais, como exposto no capítulo 2º.

A estabilidade das fibras celulósicas, em meios de baixa alcalinidade, e a elevada absorção de energia pelos compósitos, são fatores atrativos para a continuidade das pesquisas com matriz à base de cimento de escória de alto-forno.

6.6 Fibrocimentos alternativos à base de escória

Nesta etapa experimental, utilizou-se matriz de escória de alto-forno ativada com 10% de gipsita e 2% de cal hidratada, conforme justificado no item 6.5.3, reforçada com polpas mecânicas (CTMP) de sisal e banana residuais. Outro reforço utilizado foi a polpa kraft residual de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). Todas as polpas estão descritas

em detalhes no capítulo 5°. Cimento Portland (ver item 6.1) também foi utilizado como aglomerante padrão para teores de 8% em massa de fibras.

Os procedimentos de produção e ensaio dos compósitos estão nos itens 6.2 e 6.3. Os resultados físicos e mecânicos, seguidos dos respectivos desvios padrão, estão indicados nas tabelas 6.6 a 6.9, para todas as formulações ora apresentadas. Micrografias seguem nas figuras 6.8 a 6.14.

Tabela 6.6 Propriedades da escória de alto-forno reforçada com CTMP de sisal.

Teores de fibra (% em massa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Energia específica (kJ/m ²)	Absorção de água (% em massa)	Massa específica (kg/m ³)	Vazios permeáveis (% em volume)
4	7,85 (0,45)	15,0 (1,3)	0,315 (0,049)	26,9 (0,8)	1490 (20)	40,2 (0,8)
8	5,86 (0,51)	18,4 (1,5)	0,853 (0,098)	32,9 (0,6)	1330 (10)	43,7 (0,4)
12	4,93 (0,33)	18,3 (2,3)	1,230 (0,151)	35,3 (1,0)	1270 (20)	45,0 (0,6)

Tabela 6.7. Propriedades da escória de alto-forno reforçada com CTMP de banana.

Teores de fibra (% em massa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Energia específica (kJ/m ²)	Absorção de água (% em massa)	Massa específica (kg/m ³)	Vazios permeáveis (% em volume)
4	8,31 (0,19)	15,8 (0,7)	0,209 (0,015)	27,8 (0,5)	1470 (20)	40,9 (0,4)
8	6,22 (0,58)	18,9 (1,9)	0,509 (0,103)	31,7 (0,6)	1360 (20)	43,2 (0,4)
12	4,85 (0,62)	18,0 (3,1)	0,827 (0,098)	34,2 (1,3)	1290 (30)	44,2 (0,7)

Tabela 6.8. Propriedades da escória de alto-forno reforçada com polpa kraft residual de eucalipto.

Teores de fibra (% em massa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Energia específica (kJ/m ²)	Absorção de água (% em massa)	Massa específica (kg/m ³)	Vazios permeáveis (% em volume)
4	8,94 (1,05)	14,3 (0,9)	0,249 (0,020)	23,9 (1,2)	1580 (40)	37,7 (0,9)
8	6,64 (0,61)	18,0 (1,4)	0,745 (0,105)	28,0 (1,4)	1440 (40)	40,3 (0,9)
12	5,00 (0,59)	18,2 (2,8)	1,250 (0,197)	32,3 (1,7)	1330 (40)	43,1 (1,0)
16	4,31 (0,48)	16,7 (2,0)	1,290 (0,201)	35,5 (2,3)	1250 (50)	44,3 (1,2)

Tabela 6.9 Propriedades de matriz à base de cimento Portland reforçada com 8% de fibra residual.

Fibra	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Energia específica (kJ/m ²)	Absorção de água (% em massa)	Massa específica (kg/m ³)	Vazios permeáveis (% em volume)
CTMP de sisal	9,92 (0,34)	21,7 (1,1)	0,792 (0,168)	22,9 (1,2)	1510 (20)	34,5 (1,3)
CTMP de banana	9,81 (0,52)	20,9 (2,0)	0,509 (0,101)	23,6 (0,9)	1500 (20)	35,4 (1,2)
Kraft de eucalipto	11,40 (0,90)	21,4 (0,9)	0,821 (0,110)	20,7 (0,7)	1600 (20)	33,3 (0,6)

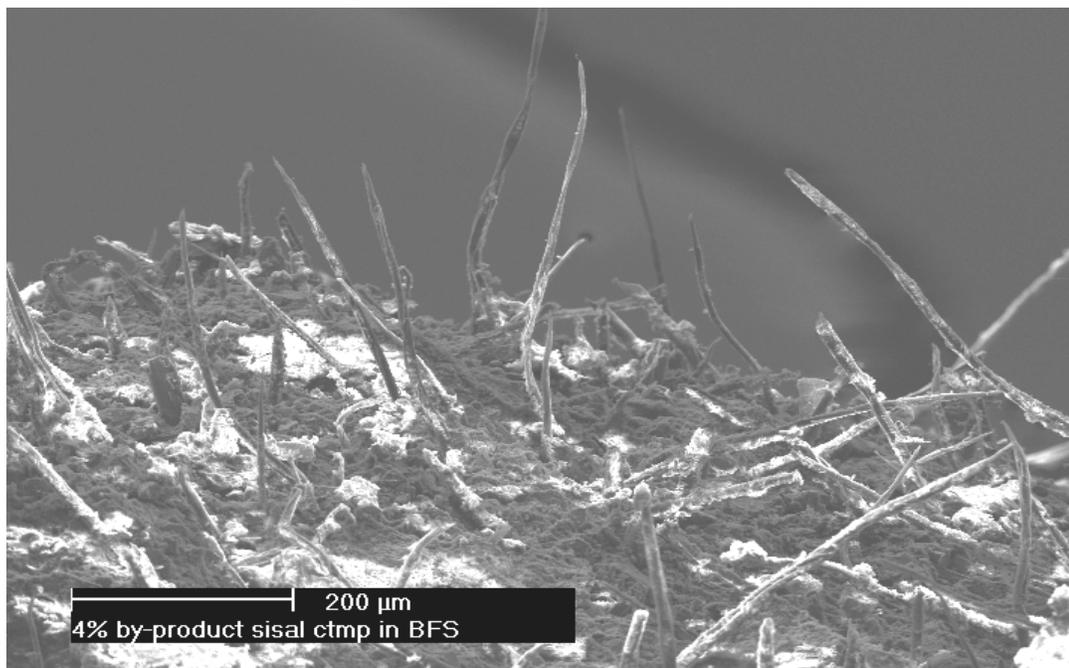


Fig. 6.8 MEV. Imagem de elétrons secundários para matriz de escória reforçada com 4% de CTMP de sisal. Idade de hidratação: 73 dias.

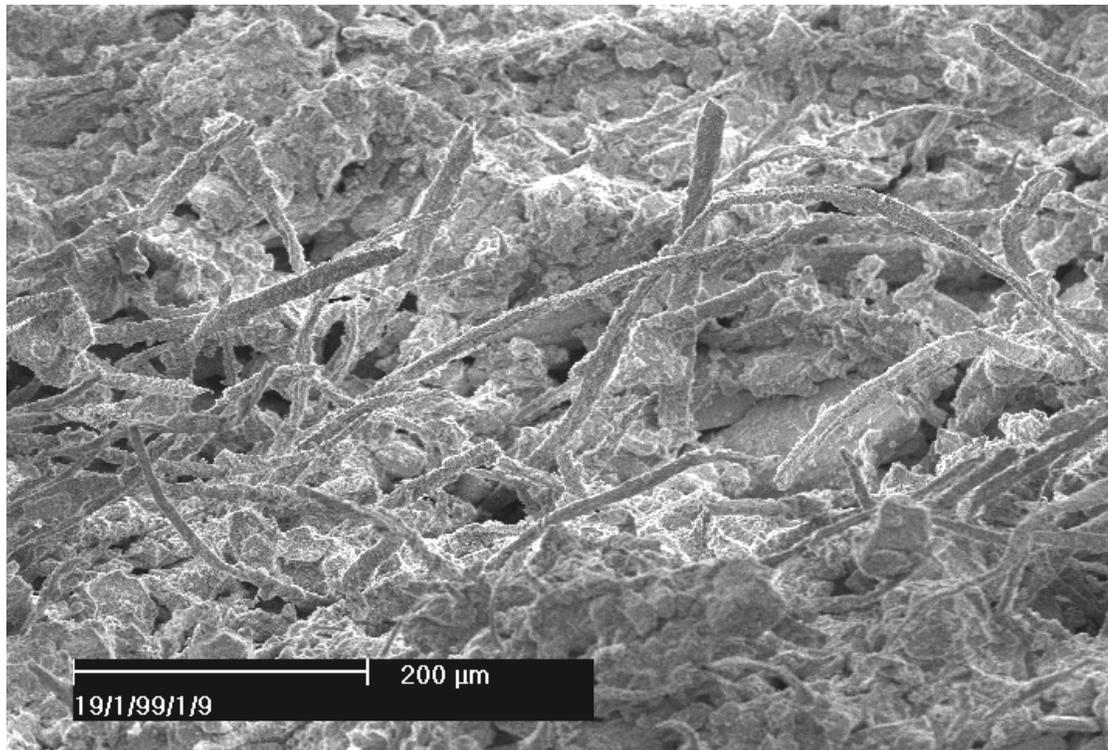


Fig. 6.9 MEV. Imagem de elétrons secundários de matriz de escória reforçada com 4% de polpa kraft residual de eucalipto. Idade de hidratação: 51 dias.

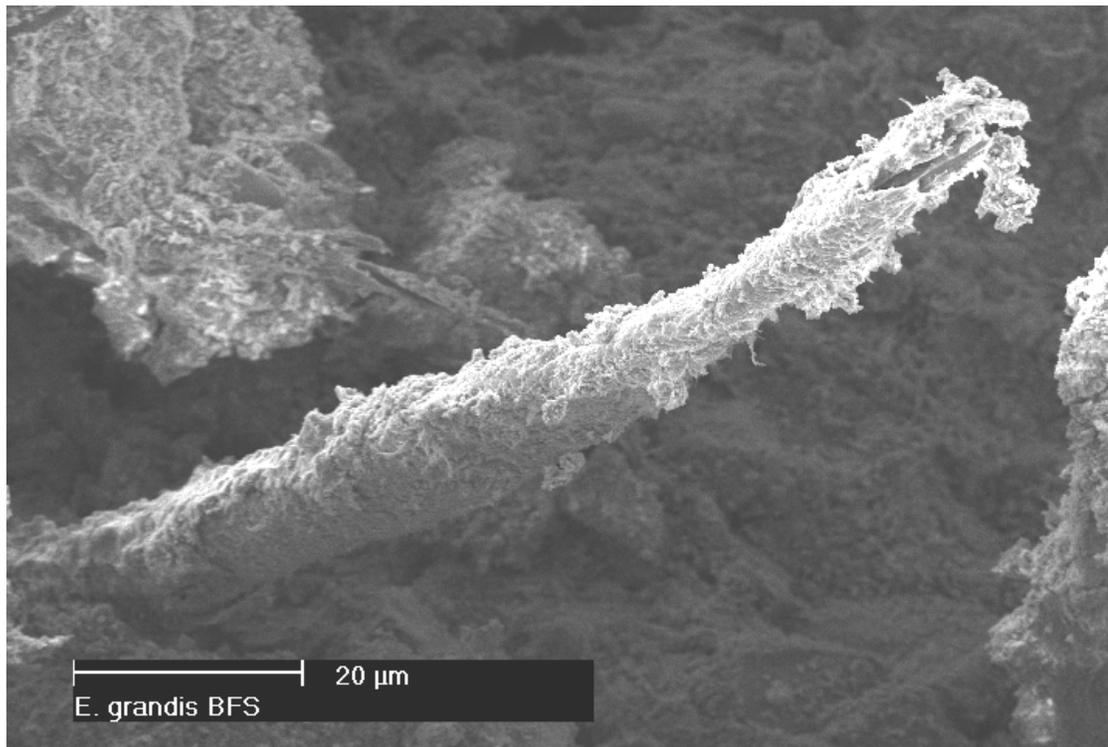


Fig. 6.10 MEV. Imagem de elétrons secundários de matriz de escória com reforço de polpa residual de eucalipto. Idade de hidratação: 72 dias. Detalhe de filamento parcialmente arrancado da matriz.

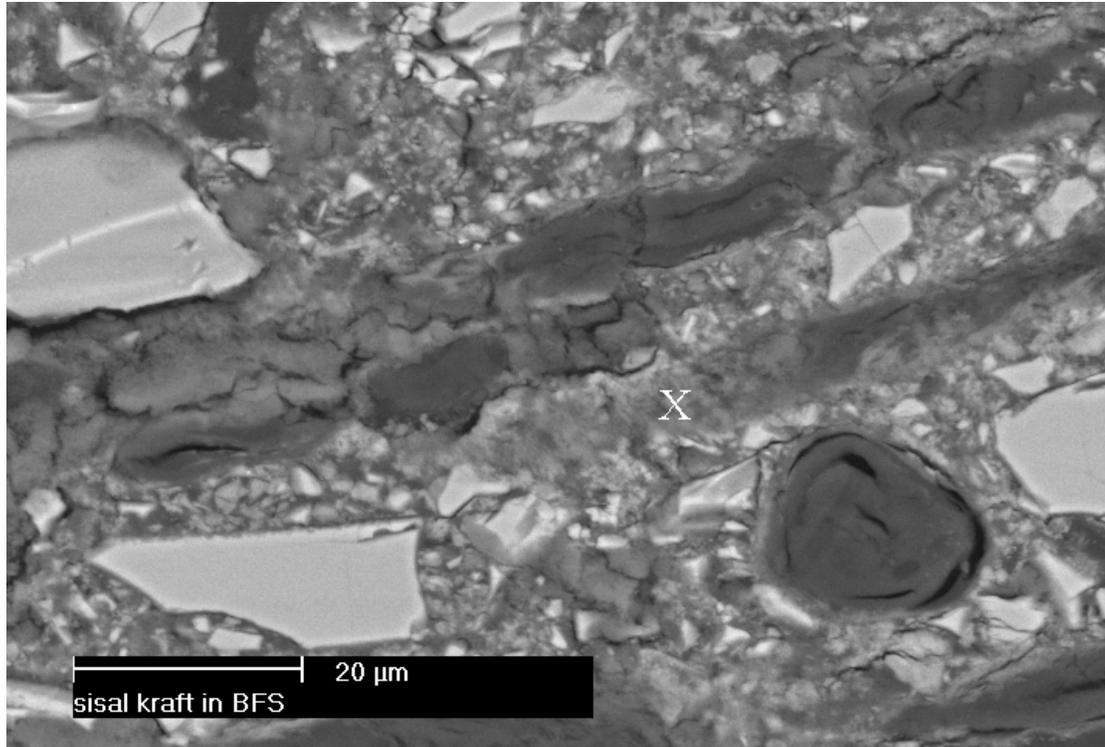


Fig. 6.11 MEV. BSEI de matriz de escória reforçada com polpa kraft de sisal residual. Idade de hidratação: 236 dias.

Counts

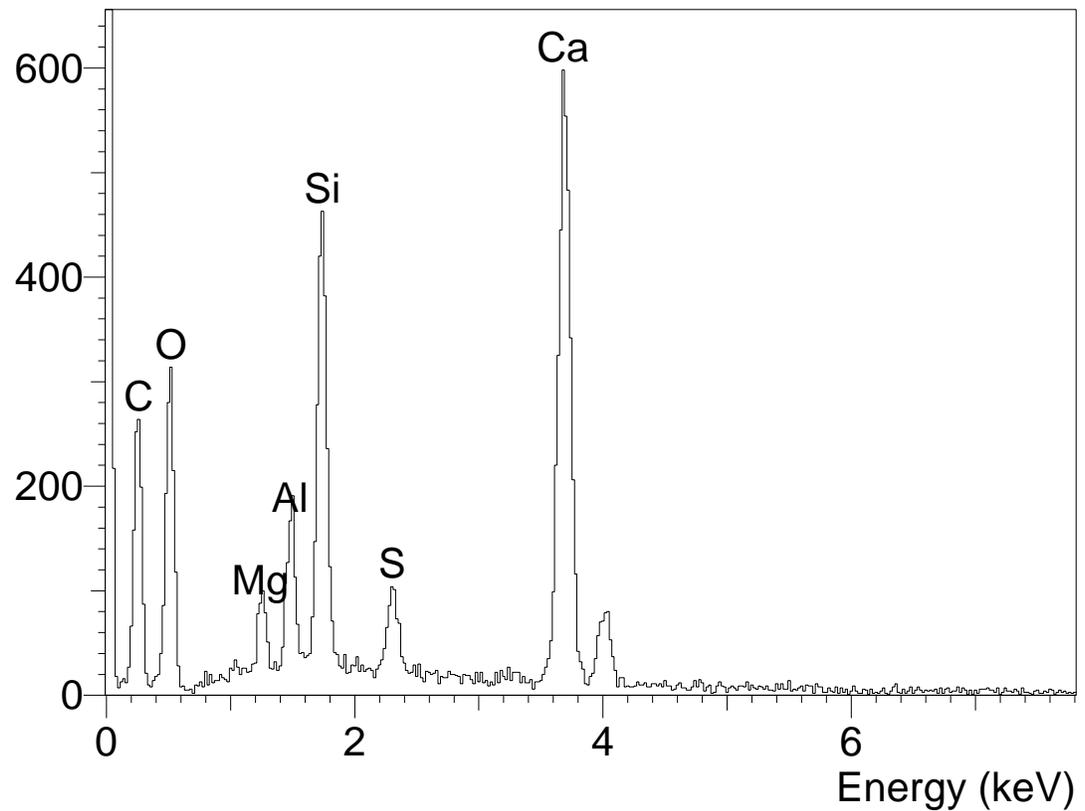


Fig. 6.12 EDS da região da matriz de escória próxima da fibra de polpa kraft de sisal (referente à marca "X" da figura 6.11).

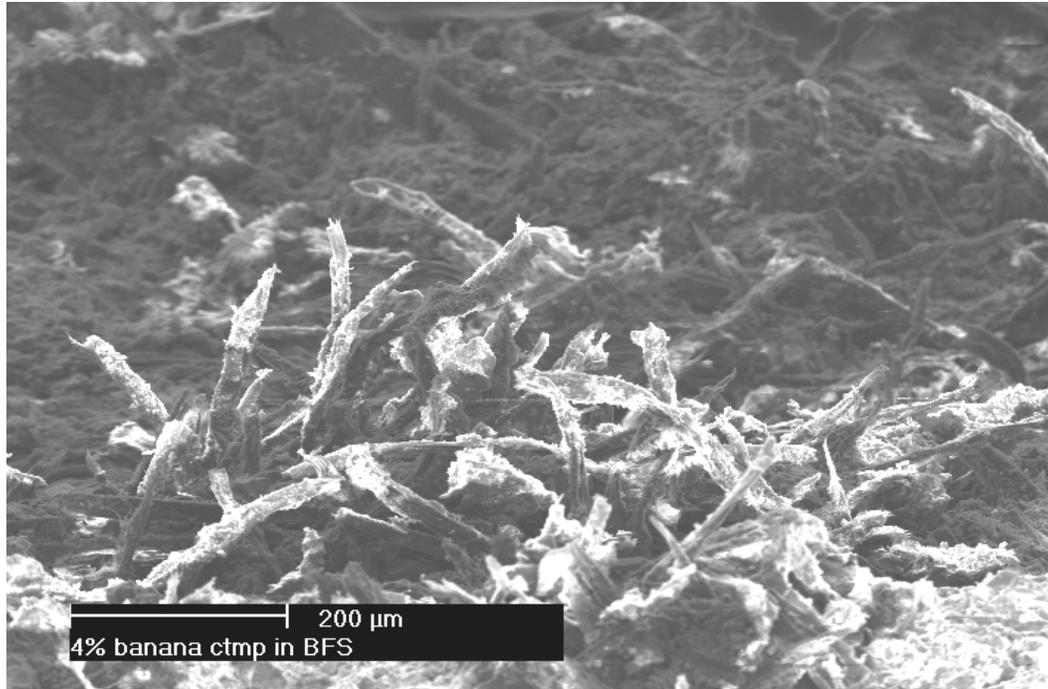


Fig. 6.13 MEV. Imagem de elétrons secundários de matriz de escória reforçada com 4% de CTMP de banana. Idade de hidratação: 32 dias.

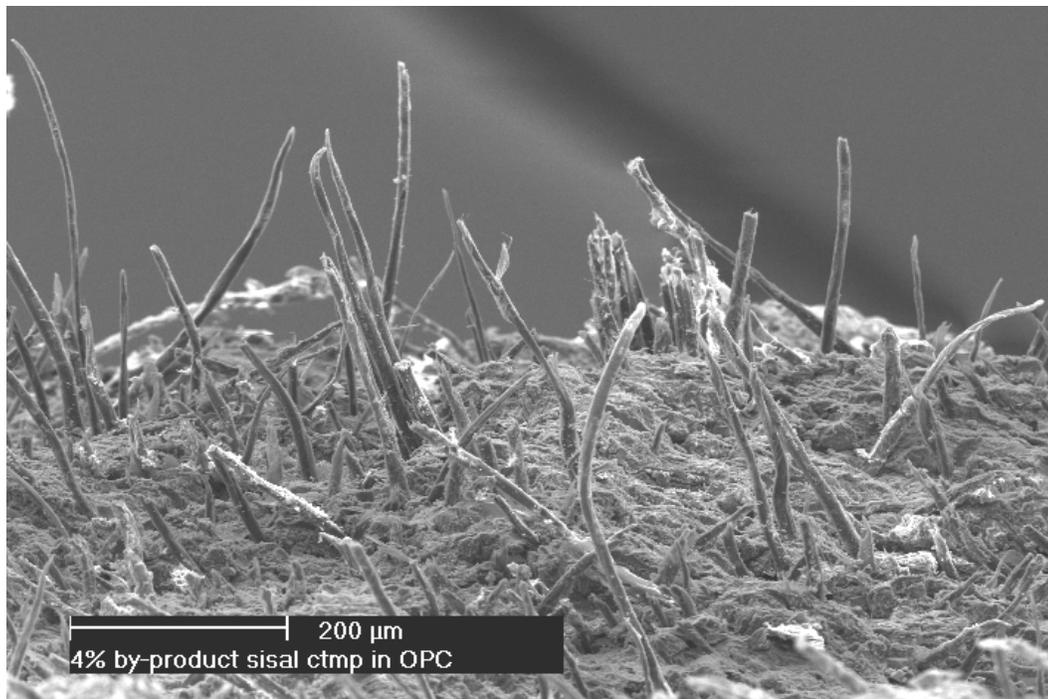


Fig. 6.14 MEV. Imagem de elétrons secundários de matriz de cimento Portland comum reforçado com 4% de CTMP de sisal. Idade de hidratação: 67 dias.

6.6.1 Propriedades e microestrutura

Todos os compósitos à base de escória de alto-forno e 8% de fibra residual (sisal, banana ou eucalipto) apresentaram resistência à tração na flexão em torno de 18 MPa, o que significou aumento de pelo menos 20% em comparação aos correspondentes compósitos com apenas 4% de fibra (tabelas 6.6 a 6.8). Esses resultados representam, também, melhoria significativa em relação a resultados apresentados por Agopyan (1991), referentes a pasta de cimento Portland comum reforçada com papel desintegrado, a qual atingiu resistência à tração na flexão de até 7 MPa, pelo menos 30% abaixo da matriz de controle.

Compósito à base de cimento Portland, adotado como referência no presente estudo, apresentou resistência de 21 MPa aos 28 dias de idade, que deve ser associada à sua absorção de água mais baixa do que os compósitos de escória, com o mesmo teor de 8% de fibra. Este resultado pode ser indício de hidratação insuficiente da escória, a qual parece não ter sido ativada suficientemente pelos agentes ora empregados. Como outro sinal de hidratação insuficiente, o módulo de elasticidade dos compósitos à base de escória também foram inferiores aos correspondentes de cimento Portland.

As resistências mecânicas dos compósitos reforçados com fibras residuais apresentaram elevado desvio padrão. Isso pode ser entendido como resultado da heterogeneidade das fibras empregadas, quer pela baixa qualidade da matéria-prima fibrosa e sua fácil decomposição na presença de umidade (Fernandes et al., 1981 e Misra, 1983), quer pela ação desigual do tratamento mecânico e a conseqüente permanência de impurezas (vide números Kappa elevados para CTMP de sisal e banana na tabela 5.2).

A energia específica absorvida pelo compósito aumentou de 4 a 5 vezes, com o aumento de teor de fibras de 4% para 12% da massa do cimento. Para os compósitos com reforço de eucalipto, o ponto ótimo de ductilidade pareceu situar-se entre 12 e 16% de fibra, com ductilidade em torno de 1,3 kJ/m².

A predominância de arrancamento das fibras de sisal e eucalipto (figuras 6.8 e 6.9) está relacionada à absorção elevada de energia por atrito. No caso específico das fibras de eucalipto, o seu pequeno comprimento é compensado pelo maior número de filamentos, para um dado teor, com a conseqüente maior probabilidade de interceptação de uma microfissura da matriz, já no início de sua propagação. Além disso, observaram-se

incrustações da matriz na superfície da fibra (figura 6.10), como comprovação da forte aderência entre as fases, contudo persistindo o arrancamento, com grande dissipação de energia.

Imagens de elétrons retroespalhados de sisal em matriz de escória de alto-forno evidenciaram boa aderência entre as fases (figura 6.11), com zona de transição densa e sem evidência de acúmulo de hidróxido de cálcio livre. Observou-se também a existência de grãos de escória anidra (cor cinza-clara), com arestas vivas e bem definidas, que podem indicar a sua baixa reatividade. A análise de espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS), que segue na figura 6.12, mostra elementos químicos comuns aos produtos de hidratação cimentícios, com relação cálcio/silício aproximada de 1,3.

Aos 28 dias de idade, compósitos reforçados com fibras de banana mostraram menor ductilidade que aqueles correspondentes reforçados com sisal ou eucalipto. Isso pode ser entendido pela maior relação de aspecto da CTMP de banana (ver tabela 5.2), o que se traduz em forte ancoragem e predominância de fratura, em detrimento do arrancamento da fibra, como indicado na figura 6.13 (interessante comparar ainda com figura 6.8). Comportamento semelhante foi observado para compósito de banana e cimento Portland (ver figura 6.5)

A Figura 6.14 ilustra o compósito à base de cimento Portland com CTMP de sisal, com algumas características microestruturais que podem explicar o bom compromisso entre resistência à tração na flexão (21,7 MPa) e ductilidade (0,792 kJ/m²), para o teor de 8% de fibra (tabela 6.9). Coexistência de fibras arrancadas e fraturadas (ou ainda arrancamento parcial interrompido pela fratura da fibra), filamentos retorcidos e curvados são todos indícios de alta dissipação de energia e de comprimento da fibra próximo do crítico (Coutts; Kightly, 1984).

Como já observado no item 6.4 e em estudos anteriores (Eusebio et al., 1998), massa específica, absorção de água e porosidade são propriedades interdependentes. Baixas densidades são desejáveis para redução de custos de transporte e facilidade de manuseio. Porém, como consequência indesejável, é comum a alta absorção de água, com o inconveniente de aumento do peso próprio durante a utilização, se em contato direto com as intempéries, além do risco de permeabilidade excessiva. Como referência, as normas brasileiras NBR 12800 e NBR 12825 especificam o limite de 37% de absorção em massa para telhas onduladas de fibrocimento.

O aumento do teor de fibra leva a um certo prejuízo no adensamento do compósito, daí a importância do estágio de pós-prensagem. As fibras de celulose são conformáveis e variam o volume ocupado, durante o período de prensagem, porém sofrem significativa recuperação (efeito mola) no alívio das pressões aplicadas, o que também está associado ao tempo de prensagem (Coutts; Warden, 1990). Como efeito da redução de compactação, em conjunção com a baixa massa específica ($\sim 1500 \text{ kg/m}^3$) e alta absorção de água das fibras (frequentemente superior a 100% em massa), o volume de vazios permeáveis e a absorção de água do compósito aumentam linearmente com o conteúdo de fibra.

6.6.2 Comentários adicionais

Em conjunção com resultados apresentados nos itens 6.4 e 6.5, para matrizes de cimento Portland e de cimento de escória de alto-forno, compósitos reforçados com polpa de eucalipto (de qualidade não compatível com as exigências da indústria papelreira, já disponíveis no Brasil como resíduo), e com polpas mecânicas de sisal e banana, demonstraram bom desempenho ao serem produzidos pelo modelo Hatschek em escala laboratorial.

Imagens de microscopia eletrônica de varredura demonstraram ser um instrumento de avaliação eficiente do desempenho macroestrutural, pela análise do grau de aderência entre as fases, e conseqüente fratura ou arrancamento das fibras.

6.7 Durabilidade

Os compósitos apresentados no item 6.6 foram submetidos a dois tipos de envelhecimento natural:

- Em ambiente de laboratório, pelo período de 4 meses.
- Em ambiente externo, pelo período de 3 meses, após 1 mês em ambiente de laboratório. A exposição às intempéries ocorreu em Pirassununga, SP, Brasil (clima tropical), e em Melbourne, Victoria, Austrália (clima temperado), nos meses compreendidos entre abril e outubro de 1999.

A tabela 6.10 traz as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos sujeitos ao envelhecimento, em comparação ao referencial testado com 28 dias de idade.

O envelhecimento, no ambiente de laboratório ou em ambientes externos, revelou que aumentos na ductilidade foram correspondidos por queda da resistência à tração na flexão.

Com exceção do compósito à base de escória de alto-forno reforçado com 12% de eucalipto, em ambiente de laboratório, todos os demais perderam resistência com a idade, o que foi acompanhado pela redução da absorção de água. Esse fenômeno pode estar parcialmente associado à carbonatação da matriz que, conforme também observado por Wang et al. (1995) para matrizes de menor resistência (no caso, resistência à compressão axial menor que 30 MPa), inibe a hidratação do cimento e, conseqüentemente, interrompe o acréscimo de resistência. Avaliação com solução de fenolftaleína comprovaram a total carbonatação dos compósitos aos 4 meses de idade.

Paralelamente, outra possível justificativa é a modificação da interação entre as fases fibra e cimento, que, sob ciclos de umedecimento e secagem em ambiente natural, podem sofrer danos localizados na zona de transição, resultando a queda de resistência. Estando menos aderida à matriz, a fibra passa a absorver mais energia de atrito ao ser arrancada, nos ensaios mecânicos, o que teria gerado o significativo aumento da ductilidade, de até 166%, no caso do compósito reforçado com fibra de banana, em comparação àquele ensaiado aos 28 dias.

O acréscimo de energia (de pelo menos 11% no caso dos compósitos reforçados com eucalipto) teve como ponto positivo a indicação de que as fibras permaneceram íntegras no interior da matriz, livres do efeito de destruição em meio alcalino, ou mesmo "petrificação" pela absorção de produtos hidratados.

Os ensaios de envelhecimento natural continuam em andamento, com resultados previstos para idades de 1, 2 e 5 anos. Paralelamente, terão início ensaios acelerados, com ciclos de molhagem e secagem, como também outros condicionamentos que permitam avaliar individualmente a matriz, no que se refere ao efeito da carbonatação, na evolução do desempenho mecânico.

Tabela 6.10. Propriedades físicas e mecânicas de compósitos à base de escória sujeitos a envelhecimento natural.

Fibra	Condições *	Massa específica (kg/m ³)	Absorção de água (% em massa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Energia específica (kJ/m ²) **
12% de eucalipto em EAF	28 dias cura ao ar	1330 (40)	32,34 (1,68)	18,21 (2,82)	1,250 (0,197)
	4meses referência	1310 (10)	32,87 (0,61)	18,78 (0,87)	0,785 (0,121)
	envelhecim. ext. AU	1310 (10)	31,25 (0,62)	12,13 (1,52)	1,231 (0,189)
	envelhecim. ext. BR	1310 (20)	31,45 (0,67)	10,28 (0,79)	1,391 (0,231)
8% CTMP de sisal em EAF	28 dias cura ao ar	1330 (10)	32,86 (0,56)	18,42 (1,44)	0,853 (0,098)
	4meses referência	1390 (10)	29,24 (0,38)	13,90 (1,69)	1,510 (0,299)
	envelhecim. ext. AU	1390 (20)	28,44 (0,64)	11,00 (1,12)	1,330 (0,246)
	envelhecim. ext. BR	1370 (10)	29,09 (0,48)	11,11 (0,91)	1,809 (0,383)
8% CTMP de banana em EAF	28 dias cura ao ar	1360 (20)	31,67 (0,60)	18,87 (1,91)	0,509 (0,104)
	4meses referência	1370 (20)	30,44 (0,93)	14,70 (1,96)	0,998 (0,147)
	envelhecim. ext. AU	1390 (30)	28,56 (1,14)	12,20 (0,90)	1,160 (0,230)
	envelhecim. ext. BR	1400 (20)	28,04 (0,92)	13,53 (1,74)	1,354 (0,197)

Notas: Formulação do cimento de escória (88% escória, 10% gipsita, 2% cal)

(*) Condições: a) 28 dias cura ao ar; b) 4 meses referência (CPs mantidos em ambiente controlado); c) envelhecimento externo Austrália (1 mês em ambiente controlado e 3 meses sujeito a intempéries); d) envelhecimento externo Brasil (idem anterior)

(**) Ensaio interrompido ao se atingir 50% de decréscimo do carregamento máximo

Massa específica e absorção calculadas pela ASTM C948-81

Desvios padrão entre parêntesis

O efeito da cinética das reações químicas envolvidas na hidratação da matriz assumiu papel importante no mecanismo de envelhecimento. A elevada incidência de poros capilares, conjugada à massa específica reduzida e à absorção de água elevada, pareceu induzir a rápida carbonatação da matriz. Apesar desse fato coibir resistências mais elevadas, potencialmente esperadas, o rápido decréscimo da alcalinidade da água de poro foi decisiva para preservação das fibras celulósicas imersas na pasta cimentícia. Deve-se unir a isso o fato de a polpa já apresentar, de início, menores teores de lignina, o que a torna naturalmente mais resistente à agressividade da matriz.

6.8 Comentários

Os materiais produzidos, a partir de método baseado na dispersão prévia das fibras e do aglomerante em solução aquosa, demonstraram desempenho mecânico muito superior ao daqueles previamente discutidos no capítulo 4^o. Com matriz à base de cimento de escória, as resistências médias à tração na flexão dos compósitos atingiram 18 MPa, e os valores de energia específica chegaram a exceder 1,2 kJ/m². Isso se explica pela maior quantidade de fibra empregada e sem a perda de homogeneidade do material.

A potencialidade desses materiais é ainda maior, tendo em vista os resultados obtidos com o uso da fibra refinada de *Pinus radiata*, considerada referência como reforço de matrizes cimentícias. Segundo as mesmas técnicas produtivas e ainda com cimento de escória, as resistências, nos ensaios de flexão, atingiram 25 MPa, e a energia absorvida excedeu 2,0 kJ/m².

Apesar desses melhores resultados estarem associados a maior emprego de energia, tanto na drenagem de água por sucção, logo após a mistura, como na compactação por prensagem, esta proposta não perdeu de vista o produto de baixo custo. As matérias-primas residuais e de valor reduzido mostraram ser adequadas ao processo produtivo; descartou-se qualquer tipo de adição (microsílica, p. ex.) ou aditivo (floculantes, plastificantes e aceleradores de pega), que pudesse representar aumento dos custos e complexidade do processo produtivo; e a cura empregada foi a mais simples possível, em ar saturado.

A análise da microestrutura sinalizou positivamente, sem detecção de zona de transição porosa entre a fibra e a matriz, nem acúmulo de macrocristais de hidróxido de cálcio. As fibras de celulose não pareceram atacadas nem "petrificadas", em contacto com a matriz de cimento, especialmente empregando-se escória de alto-forno.

Os ensaios de durabilidade mostraram a importância da alteração introduzida no modelo produtivo, visto que a ductilidade do material fibroso aumentou após quatro meses de envelhecimento natural, na maioria dos compósitos analisados.

7 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta análise crítica de todo o tema abordado ao longo deste estudo, a fim de ordenar e complementar, de forma coerente, os comentários feitos no decorrer da descrição das etapas experimentais.

7.1 Os resíduos fibrosos

Os países tropicais são, por natureza, produtores de plantas fibrosas. No entanto, os mercados de fibras comerciais são extremamente seletivos e geram, em decorrência disso, grande quantidade de resíduo. No capítulo 2º, foram apontados seis resíduos fibrosos de grande potencialidade, a partir de critérios baseados na disponibilidade, dispersão geográfica, usos alternativos já existentes, custo de obtenção, características físicas e microestruturais. Isso não inviabiliza novas incursões em busca de outras fibras vegetais (alguns exemplos: bambu, bagaço de cana-de-açúcar, papel de imprensa e juta), igualmente de grande potencial, e que poderão ser priorizadas em estudos futuros, dependendo dos critérios de escolha e utilização pretendida.

Dos resíduos pré-selecionados, três foram muito atrativos para o presente estudo, em acréscimo a suas características de reforço, devidamente atestadas. O resíduo de campo do sisal é disponível em quantidade equivalente à da produção comercial da indústria sisaleira (estimada em mais de 100 mil toneladas/ano); ele também constitui agente de poluição do solo (pela difícil decomposição natural) e do ar (pela queima induzida); se aproveitado, pode gerar renda adicional para os pequenos produtores. A fibra do pseudocaule da banana pode ser igualmente produzida em grande quantidade (cerca de 100 mil toneladas/ano, só no Estado de São Paulo). A polpa residual de celulose de eucalipto compõem-se quase que exclusivamente de fibra com baixo teor de lignina ou outras impurezas (tecidos parenquimatosos, por exemplo), além de disponível em quantidades elevadas. Com base em estatísticas divulgadas pela Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa), a produção brasileira de pasta celulósica, em 1999, foi de 7,2 milhões de toneladas (informação obtida no endereço eletrônico <http://www.bracelpa.com.br>), o que permite projetar geração de resíduos superior a 30 mil toneladas/ano.

Os três exemplos de resíduo citados apresentam valor comercial desprezível, a menos do tratamento inicial requerido para cada caso. Juntos, são capazes de gerar mais de 100 mil toneladas/ano de polpa celulósica de natureza residual. Também deve ser considerado que, a partir de novas demandas, esses materiais poderão ser reclassificados como subprodutos e, assim, passar a ter valor de mercado, porém certamente inferior aos preços praticados para os produtos principais das respectivas atividades.

7.2 As fibras vegetais como reforço

Nesta linha de pesquisa, foram priorizadas matrizes à base de aglomerantes hidráulicos, na produção de peças esbeltas, que, por causa de sua natureza frágil, precisam ser reforçadas. O uso das fibras é consagrado para esse fim, sendo que as fibras de baixo módulo de elasticidade (vegetais e plásticas, especialmente) passam a ser de interesse maior nas aplicações que requerem elevadas ductilidade e resistência a esforços dinâmicos.

Em vista da sua menor alcalinidade e, por conseguinte, menor agressividade às fibras vegetais, o cimento de escória de alto-forno foi escolhido para o presente estudo, com base em diversos outros trabalhos similares em curso no Brasil. Conforme salientado no capítulo 4^o, soma-se a isso a natureza residual da escória, a sua grande disponibilidade e o baixo custo de obtenção, se comparado ao cimento Portland convencional.

O uso técnicas simples de preparação das fibras (lavagem ou fervura preliminares, seguidas de corte em pequenas dimensões), parece limitar significativamente a sua capacidade de reforço. Mesmo o emprego de tratamentos prévios, por meio de agentes de impregnação e/ou impermeabilização, demonstram eficiência reduzida pelo fato de provocarem alterações na região de interface entre a fibra e a matriz, além de representarem custo e laboração adicionais.

O uso de macrofibras (feixes de células individuais) ainda traz o inconveniente da difícil homogeneidade no interior da matriz, o que limita o volume adicionado a cerca de 2%, pelos métodos convencionais de mistura. Essa heterogeneidade na distribuição da fibra se deve ao seu comprimento elevado (da ordem de 1 a 3 cm), bem como à sua rigidez, o que afeta negativamente a compacidade do compósito. Além disso, perde-se pela reduzida superfície de contato fibra-matriz, visto que centenas de células individuais permanecem aglutinadas umas às outras, em cada uma das macrofibras imersas na

matriz. Como resultado, revela-se o desempenho mecânico deficiente dos compósitos cimentícios reforçados com macrofibras vegetais, geralmente com resultados de resistência à tração na flexão da ordem de 5 MPa, conforme ilustrado nos capítulos 2º e 4º.

No final da década de 70 (Hannant, 1978), a fibra vegetal era classificada como de emprego pouco promissor na construção civil, com base em resultados experimentais obtidos, tanto no mundo desenvolvido, como nos países mais pobres. Entretanto, os compósitos reforçados com fibras vegetais ganharam novo impulso, a partir do momento em que pesquisadores do segmento de celulose e papel passaram a se dedicar ao seu emprego conjunto com matriz cimentícia. Merece destaque a contribuição do Fibre Composites Group, Forestry and Forest Products, CSIRO, Austrália, que, por meio da proposta de refinamento mecânico da polpa celulósica, viabilizou seu emprego em equipamentos modelo Hatschek.

Dentre as principais técnicas conhecidas, as seguintes merecem referência, tendo sido empregadas no presente estudo (capítulo 5º):

- Polpação. Trata-se do processo que confere de-lignificação à fibra, com padronização e incremento de suas propriedades físicas e mecânicas, tornando-a mais atrativa ao emprego na indústria. O uso combinado de procedimentos químicos e mecânicos, mostrou-se adequado à obtenção de polpas de qualidade satisfatória, com custo mais baixo e economicamente viáveis em menor escala de produção (em comparação ao processo kraft).
- Limpeza. Remoção das impurezas não celulósicas, bem como das fibras com reduzida relação de aspecto (comprimento/espessura inferior a 20), por meio do uso combinado de água e peneiras vibratórias.
- Refinamento. Etapa de fundamental importância, a começar pela adequação da fibra à formação de estrutura reticulada e homogênea, no interior da matriz. Nos casos em que ocorre dispersão dos materiais sólidos em grande volume de água (concentrações da ordem de 0,2 g/ml, em modelo laboratorial correspondente ao processo Hatschek), com posterior drenagem por sucção da água, a rede formada pelas fibras é crucial para a retenção das partículas de cimento, evitando estratificações e perdas de material.

O emprego de polpas celulósicas demonstrou enorme contribuição para o aumento da ductilidade (cerca de 25 vezes superior à matriz sem fibra) e também da resistência à tração na flexão (maior do que 10 MPa), tendo em vista a produção de elementos construtivos delgados. Teores elevados de fibras (da ordem de 10% da massa de aglomerante, que equivalem aproximadamente a 14% do volume do material produzido), distribuídas homoganeamente e com boa aderência à matriz, garantiram o bom desempenho observado.

Já que as fibras de celulose apresentam comprimentos médios entre 1 e 2 mm, geralmente, depreende-se que a eficiência do compósito não depende de longos comprimentos de ancoragem da fibra no interior da matriz. Assim, filamentos com relação de aspecto bem proporcionada (entre 50 e 200), bem como apresentando fibrilação externa e interna (conseqüentemente, com melhor aderência à matriz e mais maleáveis), tiveram capacidade de reforço muito superior às macrofibras.

Como o funcionamento das fibras de baixo módulo ocorre predominantemente após a fissuração inicial da matriz, e atrelado a deformações elevadas, é muito importante que se consiga a interceptação das microfissuras no início de sua propagação, aumentando em muito a eficiência do reforço. Uma vez que a sollicitação externa passa a ser resistida pela fibra, espera-se que o efeito ponte fibra-matriz leve à máxima absorção de energia possível, o que se traduz, no comportamento macroestrutural, em ductilidade suplementar à da matriz sem reforço (Brandt, 1995). No capítulo 6º, por meio da análise de imagens de superfícies de fratura, foram evidenciados alguns aspectos que atestam essa aderência ideal entre as fases: (a) fibras curvadas e retorcidas, parcialmente arrancadas, porém com extremidades fraturadas; (b) superfície da fibra recoberta por incrustações da matriz, que indica maior dissipação de energia por atrito.

À medida em que aumenta o teor de fibra, percebe-se, inclusive para a ductilidade, a menor influência por parte da matriz empregada. Isso reforça a idéia do emprego de cimentos alternativos e de baixo custo para aplicação nos fibrocimentos de um modo geral.

Mesmo revelando baixos níveis de hidratação, o cimento de escória proporcionou compósitos de comportamento similar àqueles com cimento Portland, especialmente no que se refere à ductilidade. Além disso, a hidratação pouco pronunciada pode gerar pelo menos um efeito positivo, que é a menor mobilidade dos produtos de hidratação,

conseqüentemente menos propensos a se alojarem no interior das fibras (fenômeno de "petrificação").

7.3 A telha de cobertura reforçada

O componente ora desenvolvido teve como aspectos favoráveis a facilidade de produção, o baixo consumo de energia, o emprego de mão-de-obra sem especialização, e o fato de requerer pequenos investimentos iniciais e gerar rápido retorno do capital empregado. Embora seja muito difícil uma projeção confiável na atual fase experimental, os custos de produção são estimados em menos de 50% de qualquer opção hoje vigente no mercado de componentes para cobertura.

Os resultados até agora obtidos precisam ser entendidos como fruto de uma etapa introdutória, desenvolvida cautelosamente com componentes delgados e de pequenas dimensões, tendo em vista a facilidade de produção.

Após ajustes iniciais, o desempenho físico e mecânico, nas primeiras idades, foi satisfatório para telhas reforçadas com fibras de coco, eucalipto e mistura de sisal com eucalipto (tabela 4.8). O diferencial das telhas reforçadas, em relação ao padrão sem fibra, foi o acréscimo da energia absorvida, com efeito positivo na fase de transporte, manuseio e instalação dos componentes.

No entanto, conforme comentado no item 7.4, as telhas experimentaram significativa perda de desempenho mecânico após 16 meses de exposição a intempéries em clima tropical.

As deficiências apontadas deverão ser superadas antes da transferência desta tecnologia para a iniciativa privada. Uma vez atingida uma técnica de produção que permita desempenho e durabilidade compatíveis, espera-se aprimorar tais componentes, que poderão ser mais delgados (5 a 6 mm de espessura), e portanto ainda mais leves e econômicos.

7.4 Durabilidade

As fibras vegetais se degeneram em contato com meios alcalinos, pela decomposição da lignina. Também sofrem o efeito da deposição, em seus vazios internos, de produtos de hidratação, que se cristalizam e conferem efeito análogo ao da "petrificação".

Apresentam alta capacidade de absorção de água, com variações volumétricas que podem ser deletérias à interface fibra-matriz, no decorrer de inúmeros ciclos de molhagem e secagem, ao longo de sua vida útil.

Todos os efeitos acima descritos parecem ter sido combinados, no período de exposição às intempéries a que se submeteram as telhas produzidas pelo processo de simples mistura e adensamento por vibração.

Apesar de se verificar completa carbonatação da matriz de escória, ao final dos ensaios de envelhecimento, percebe-se que esse fator, a princípio favorável à redução da alcalinidade do meio, não teve efeito preponderante neste caso. Acredita-se que a velocidade das reações químicas prejudiciais às fibras tenha sido maior, afetando-as logo no início do período de envelhecimento natural.

A fragilidade do reforço das fibras não afetou, entretanto, a integridade e a boa aparência das telhas, que permanecem expostas às intempéries, até o momento, sem apresentar sinais de decomposição ou fissura generalizada.

O envelhecimento acelerado não conseguiu reproduzir as condições agressivas do clima tropical, mesmo após 1000 ciclos de ultravioleta/nebulização (8 h/ciclo). Dois aspectos precisam ser ponderados: (a) a água das chuvas é ligeiramente ácida e tem maior poder de lixiviação sobre o compósito, comparada à água potável (clorada) utilizada no dispositivo laboratorial; (b) a radiação ultravioleta não chegava a secar o corpo-de-prova, que deve ter permanecido úmido durante a maior parte do tempo. Conseqüentemente, as fibras foram fragilizadas, pois os compósitos perderam ductilidade. Porém, a resistência à tração na flexão praticamente dobrou, em relação aos resultados com 28 dias de idade.

Comportamento bem diferente está-se configurando, no caso dos compósitos produzidos por dispersão em solução aquosa, drenagem por sucção do excesso de água e prensagem, mantido o procedimento de cura ao ar saturado, por 7 dias. Após três meses de exposição às intempéries, os compósitos estão apresentando acréscimo significativo da ductilidade (em alguns casos, superior a 100% em comparação à energia absorvida aos 28 dias), desta vez acompanhada da queda na resistência à tração na flexão (de até 40% em relação às primeiras idades).

Neste caso, a cinética das reações químicas foi distinta, mantendo-se as fibras íntegras no interior da matriz. A rápida carbonatação deve ter sido possível graças ao maior volume de vazios permeáveis dos compósitos (que resultou em absorção de água

aproximadamente igual ao dobro da observada no caso das telhas). Igualmente positiva foi a análise microestrutural, que não detectou a deposição de produtos de hidratação no lúmen das fibras.

A perda da resistência do cimento de escória pode ser entendida também como efeito da carbonatação (Wang et al., 1995), levando à perda de resistência à tração na flexão do compósito. Ao mesmo tempo, observa-se que o ganho de ductilidade geralmente veio acompanhado da perda de resistência, e vice-versa. Esse comportamento reflete a forma como as duas fases do compósito (matriz de aglomerante e fibras vegetais) interagem microestruturalmente, uma vez que o escorregamento das fibras leva à absorção de energia; porém, a perda progressiva do poder de reforço compromete a resistência.

7.5 Novas pesquisas e transferência da tecnologia

Ainda não se considera satisfatoriamente entendida a evolução do mecanismo de degradação das fibras e de carbonatação da matriz de cimento de escória nesta linha de pesquisa. O prosseguimento desses estudos será fundamental para se alcançar a durabilidade desejada para os materiais reforçados.

O aprimoramento do processo produtivo das telhas terá continuidade, mantendo-se a meta de aplicação nas edificações de baixo custo. As fibras serão empregadas na forma de polpa celulósica, em vista das inúmeras vantagens descritas no item 7.2, com resultados positivos para o compósito reforçado.

O aprimoramento deverá envolver ainda o emprego de sucção, para drenagem do excesso de água da mistura, e/ou adensamento por prensagem. Serão analisados os custos de cada um desses processos, bem como a contribuição individual de cada um deles para a melhoria do desempenho do componente. Alguns contatos preliminares, com fabricante de equipamentos utilizados para indústria de cimento amianto, têm indicado que, para produção de peças pequenas, é viável o uso de prensa de pequena capacidade ou mesmo de bomba de sucção. Tendo em vista o caráter industrial da produção pretendida, uma boa produtividade poderá agilizar o retorno de investimentos iniciais um pouco mais elevados.

Os resultados obtidos até o momento estão sendo divulgados, em congressos científicos, periódicos arbitrados do país e exterior, e na divulgação pela imprensa. A nova etapa dos estudos poderá envolver parceiros interessados em uma fase complementar de

pesquisa, antes de se pensar na produção comercial. É necessário cuidadoso ajuste do processo produtivo e comprovação da durabilidade do material, antes que haja a efetiva transferência dessa tecnologia. Esse processo, que tem duração estimada de dois a cinco anos, exigirá grande responsabilidade e dedicação por parte desta equipe de pesquisa, no sentido de evitar inadequações na produção e no uso do material.

7.6 Conclusões finais

Com base nos resultados experimentais obtidos, bem como nas conclusões de estudos correlatos, comprova-se a viabilidade de um elenco crescente de usos para as fibras vegetais como reforço de matrizes cimentícias.

Sem descartar a potencialidade de outras fibras, foram identificados três tipos de resíduos fibrosos de grande interesse, provenientes das agroindústrias do sisal, eucalipto e banana. Dentre outros, apenas esses resíduos seriam capazes de prover insumos suficientes para produção industrial sustentada em grande escala.

O emprego da fibra vegetal na forma de polpa celulósica demonstrou ser vantajoso, no desenvolvimento de novos compósitos, com a exploração de processos de polpação adequados à obtenção de fibras de reforço. As polpas mecânicas parecem ser uma ótima resposta à necessidade de fibras refinadas, baratas e de produção viável em pequena escala, junto aos principais centros geradores das matérias-primas alternativas. Com isso, pode-se evitar a competição de mercado pela celulose kraft, tradicionalmente utilizada na indústria papeleira.

A produção das telhas de pequenas dimensões, apesar dos resultados aceitáveis atingidos nas primeiras idades, precisará de modificações, no sentido de manter suas propriedades mecânicas ao longo da vida útil do telhado. Nesse sentido, estudos da microestrutura possibilitaram a identificação dos mecanismos de degradação, bem como da cinética de seu desenvolvimento.

Nas etapas subseqüentes, em comparação com outras soluções de cobertura existentes no mercado, as telhas alternativas serão aperfeiçoadas para, além da competitividade em preço, alcançarem o aprimoramento do seu desempenho físico, mecânico e de conforto termo-acústico.

Já foram identificadas pelo menos duas opções de melhoria passíveis de implementação, na etapa de produção da telha, direcionadas à maior homogeneidade e compacidade do

produto final. Quanto a isso, deve-se levar em consideração que os processos industriais passam por constante aprimoramento, melhorias de rendimento e redução de custos.

A conclusão fundamental é que este componente de cobertura em desenvolvimento apresenta real potencialidade, como também o compósito utilizado em sua fabricação, feito de escória reforçada com fibras residuais. O processo produtivo, desde o tratamento ideal das matérias-primas, até sua combinação homogênea num material composto, é a peça chave para a implantação dessa tecnologia alternativa.

O Brasil ainda se depara, no momento, com o desafio técnico de encontrar uma opção de baixo custo ao amianto, que ofereça menor risco ao trabalhador da construção civil e também ao usuário (Harrison et al., 1999). O parque industrial brasileiro do fibrocimento, fundamentalmente voltado à produção de telhas onduladas pelo processo Hatschek (ou úmido), certamente deverá utilizar a polpa de celulose vegetal, ainda que combinada com outros tipos de fibra, para manter ativas suas linhas de fabricação, com alguns ajustes.

Vislumbra-se, por fim, momento propício para novos esforços e investimentos na pesquisa, na obtenção de material compósito com tecnologia apropriada à nossa realidade de país em desenvolvimento, com conhecida carência habitacional e de edificações de infra-estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aggarwal, L.K., Singh, J. Effect of plant fibre extratives on properties of cement. **Cement & Concrete Composites**, v.12, p.103-8, 1990.
- Agopyan, V. Vegetable fibre reinforced building materials - developments in Brazil and other Latin American countries. In: Swamy, R.N., ed. **Natural fibre reinforced cement and concrete**. Glasgow, Blackie, 1988, p.208-42. Concrete and Technology and Design, 5)
- _____. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. São Paulo, 1991. 204p. Tese (Livro-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Agopyan, V.; John, V.M. Durability evaluation of vegetable fibre reinforced materials. **Building Research and Information**, v.20, n.4, p.233-5, 1992.
- Agopyan, V.; John, V.M.; Derolle, A. Construindo com fibras vegetais. **A Construção São Paulo**, n.2200, p.17-20, abr. 1990.
- Agopyan, V.; Savastano Jr., H. Uso de materiais alternativos à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: Seminário Iberoamericano 1997 de Materiales Fibrorreforzados, 1., y Reunión Proyecto PIP VIII.5 Cyted, 3., Cali, 1997. **Memorias**. Cali, Universidad del Valle, 1997. p.23-40. (Artículo 03)
- Ausnewz pulp and paper. Hobart, v.13, n.4, May. 1999.
- Bahia. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. **Cartilha para fabricação de telhão em argamassa armada**. Rio de Janeiro, BNH, 1985. 25p.
- Basin-Ras. Roofing from waste materials. **Basin-News**, p.28-30, Jan. 1994.
- Bentur, A.; Akers S.A.S. The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in a normal environment. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v.11, n.2, p.99-109, May 1989.
- Beraldo, A.L. Bambu-cimento: alternativa para construções rurais. In: Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1., Canela, 1997. **Anais**. Porto Alegre, Antac, 1997a. p.145-50.
- Beraldo, A.L. Compósitos biomassa vegetal-cimento. In: Toledo Filho, R.D. et al. **Materiais não convencionais para construções rurais**. Campina Grande, UFPB/Sbea, 1997b. p.1-48.
- Beraldo, A.L.; Bartholomeu, A.; Batista, A.M.; Fagundes, A.C.; Rolim. M.M.; Segantini, A.A. Viabilidade de fabricação de compósitos resíduos de madeiras e cimento Portland (CBC). In: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, São Paulo, 1996. **Anais**. São Paulo, EP-USP/Antac, 1997. p.77-82.

- Bichard, W.; Scudamore, P. An evaluation of the comparative performance of the Kajaani FS-100 and FS-200 fiber length analyzers. **Tappi Journal**, v.71, n.12, p.149-55, Dec. 1988.
- Bijen, J. **Blast furnace slag cement**. Stichting Beton Prisma, 1996.
- Brandt, A.M. **Cement based composites: materials, mechanical properties and performance**. London, E&FN Spon, 1995.
- Carvalho, F.F.R.; Barrios, H.; Viana, A.E.S.; Cunha, R.S. Utilização do resíduo do desfibramento do sisal (*Agave sisalana*, Perrine) desidratado e na forma de silagem na alimentação de caprinos em crescimento. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 31., Maringá, jul. 1994. **Anais**. SBZ, 1994. p.428.
- Carvalho, M.G.; Ferreira, P.J.; Martins, A.A.; Figueiredo, M.M. A comparative study of two automated techniques for measuring fiber length. **Tappi Journal**, v.80, n.2, p.137-42, Feb. 1997.
- Chand, N.; Tiwary, R.K.; Rohatgi, P.K. Resource structure properties of natural cellulosic fibres – an annotated bibliography. **Journal of Materials Science**, v.23, p.381-7, 1988.
- Cincotto, M.A.; Agopyan, V.; John, V.M. Optimization of rice husk ash production. In: International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials, 2., Salvador, 1990. **Proceedings**. London, Chapman and Hall, 1990. p.334-42. (Rilem Proceedings, 7)
- Clark, N.B. **The pulpwood quality of trees grown in the Murray-Darling Basin**. Melbourne, 1998. Thesis (PhD) - Melbourne University.
- Coutts R.S.P. Banana fibres as reinforcement for building products. **Journal of Materials Science Letters**, v.9, p.1235-6, 1990.
- _____. "From forest to factory to fabrication". In: International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete, 4., Sheffield, 1992. **Proceedings**. London, E & FN Spon, 1992. p.31-47. (Rilem Proceedings, 17)
- _____. High yield wood pulps as reinforcement for cement products. **Appita**, v.39, n.1, p.31-5, Jan. 1986a.
- _____. 'Sticks and stones...!!'. **Forest Products Newsletter, CSIRO Division of Chemical and Wood Technology**, v.2, n.1, p.1-4, 1986b.
- _____. Wood fibre reinforced cement composites. In: Swamy, R.N., ed. **Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete**. Glasgow, Blackie, 1988. p.1-62. (Concrete Technology and Design, 5)
- Coutts, R.S.P.; Kightly, P. Bonding in wood fibre-cement products. **Journal of Materials Science**, v.19, p.3355-9, 1984.

- Coutts, R.S.P.; Ridikas, V. Refined wood fibre-cement products. **Appita**, v.35, n.5, p.395-400, Mar. 1982.
- Coutts, R.S.P.; Warden, P.G. Effect of compaction on the properties of air-cured wood fibre reinforced cement. **Cement and Concrete Composites**, v.12, p.151-6, 1990.
- _____. Sisal pulp reinforced cement mortar. **Cement & Concrete Composites**, v.14, p.17-21, 1992.
- Delvasto, S.A.; Gutierrez, R.; Lopez, M.M. **Como hacer tejas con fibra de fique**. 2.ed. Cali, Departamento de Materiales de Ingeniería - Universidad del Valle, 1995. 16p. (Programa "Aprovechamiento Integral del Fique", 4)
- Douglas, E.; Brandstetr, J. A preliminary study on the alkali activation of ground granulated blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, v.20, p.746-56, 1990.
- Eusebio, D.A.; Cabangon, R.J.; Warden, P.G.; Coutts, R.S.P. The manufacture of wood fibre reinforced cement composites from Eucalyptus pellita and Acacia mangium chemithermomechanical pulp. In: Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, 4., 1998. **Proceedings**. Bogor, Bogor Agricultural University, 1998. p.428-36.
- Fernandes, J.D.; Unkalkar, V.G.; Meshramkar, P.M.; Jaspal, N.S.; Didwania, H.P. Pulping and papermaking of banana (*Musa cavendishii*) plants. **Nonwood Plant Fiber Pulping Series**, v.11, p.73-89, 1981.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Committee on commodity problems. Intergovernmental group on hard fibres. **Sisal and henequen**: summary note on developments in 1995 and 1996. Manila, FAO, 1996. 10p. (CCP:HF 96/2)
- Fordos, Z. Natural or modified cellulose fibres as reinforcement in cement composites. In: Swamy, R.N., ed. **Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete**. Glasgow, Blackie, 1988. p. 173-207. (Concrete Technology and Design, 5)
- Giannasi, F., Thébaud-Mony, A. Occupation exposures to asbestos in Brazil. **International Journal of Occupational and Environmental Health**, Philadelphia, v.3, n.2, p.150-7, 1997.
- Gram, H. E. Durability of natural fibres in concrete. In: Swamy, R.N., ed. **Natural fibre reinforced cement and concrete**. Glasgow, Blackie, 1988. p.143-72. (Concrete Technology and Design, 5)
- Gram, H.-E.; Gut, P. **Directives pour le controle de qualite**. St. Gallen, Skat/BIT, 1994. 69p. (Serie Pedagogique TFM/TVM: Outil 23)
- Guimarães, S.S. Vegetable fiber-cement composites. In: International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials, 2., Salvador, 1990. **Proceedings**. London, Chapman and Hall, 1990. p.98-107. (Rilem proceedings, 7)
- Hannant, D.J. **Fibre cements and fibre concretes**. Chichester, John Wiley, 1978.

- Harrison, P.T.C.; Levy, L.S.; Patrick, G.; Pigott, G.H.; Smith, L.L. Comparative hazards of chrysotile asbestos and its substitutes: a European perspective. **Environmental Health Perspectives**, v.107, p.607-11, 1999.
- Higgins, H.G. **Paper physics in Australia**. Melbourne, CSIRO Division of Forestry and Forest Products, 1996.
- Higgins, H.G.; Irvine, G.M.; Puri, V.; Wardrop, A.B. Conditions for obtaining optimum properties of radiata and slash pine thermomechanical and chemithermomechanical pulps. **Appita**, v.32, n.1, p.23-33, July 1978.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Fibre/agro-industrial by products bearing walls. São Paulo, AMPC/DCC/IPT, 1989. v.1. (Relatório, 27.937)
- International Symposium on Natural Polymers and Composites, 2., Atibaia, 1998. **Anais**. São Carlos, Embrapa, 1998.
- Irvine, G.M. **Chemical and paper laboratory course: chemical pulping**. Melbourne, Monash University/CSIRO-FFP, 1995, p.1-17.
- John, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. São Paulo, 1995. 112p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- _____. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, São Paulo, 1996. **Anais**. São Paulo, EP-USP/Antac, 1997. p. 21-30.
- John, V.M.; Agopyan, V. Materiais reforçados com fibras vegetais. In: Simpósio Internacional sobre Materiais Reforçados com Fibras para Construção Civil. São Paulo, 1993. **Anais**. São Paulo, EP-USP, 1993. p.29-38.
- John, V.M., Agopyan, V.; Derolle, A. Durability of blast furnace-slag-based cement mortar reinforced with coir fibres. In: International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials, 2., Salvador, 1990. **Proceedings**. London, Chapman and Hall, 1990. p.87-97. (Rilem Proceedings, 7)
- John, V.M.; Agopyan, V.; Prado, T.A. Durabilidade de compósitos de cimentos e fibras vegetais para telhados. In: Simpósio Ibero-Americano de Telhados para Habitação, 3., São Paulo, 1998. **Anais**. São Paulo, Cytel/USP, 1998. p.51-9.
- Lea, F.M. **The chemistry of cement and concrete**. London, Edward Arnold Ltd, 1970.
- Lee, A. (2000). **O impacto da substituição do telhado de fibrocimento**. São Paulo, 2000. 11p. (Monografia. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo)
- MacVicar, R.; Matuana, L.M.; Balatinecz, J.J. Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, v.21, p.189-96, 1999.

- Marikunte, S.; Soroushian, P. Statistical evaluation of long-term durability characteristics of cellulose fiber reinforced cement composites. **ACI Materials Journal**, v.91, n.6, p.607-16, Nov.-Dec. 1994.
- McKenzie, A.W. **A guide to pulp evaluation**. Melbourne, CSIRO, 1994.
- Misra, D.K. Pulping and bleaching of nonwood fibers. In: Casey, J.P. **Pulp and paper: chemistry and chemical technology**. 3.ed. New York, Wiley, 1983, v.1, p.504-30.
- Nolasco, A.M. (coord.) **Aproveitamento dos resíduos da agroindústria da banana no Vale do Ribeira**. Piracicaba, LED-Esalq-USP/SCTDE-SP, 1997. 102p. (Relatório do projeto, 11)
- Nolasco, A.M.; Soffner, M.L.A.P.; Nolasco, A.C. Physical-mechanical characterization of banana fiber – *Musa cavendishii*, cultivar nanicão. In: International Symposium on Natural Polymers and Composites, 2., São Carlos, 1998. **Proceedings**. Brasília, Embrapa/SPI, 1998. p.191-194.
- Oliveira, C.T.A.; John, V.M.; Agopyan, V. Pore water composition of activated granulated blast furnace slag cements pastes. In: International Conference on Alkaline Cements and Concretes, 2., Kyiv, 1999. **Proceedings**. Kyiv, Kyiv State Technical University of Construction and Architecture, May 1999. 9p.
- Padilha, A.F.; Ambrozio Filho, F. **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo, Hemus, 1985.
- Pires Sobrinho, C.W.A. Coconut and sisal fibre reinforced cement and gypsum matrices. In: International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete, 4., Sheffield, 1992. **Proceedings**. London, E & FN Spon, 1992. p.1193-1202. (Rilem Proceedings, 17)
- Ramírez Sarmiento, C. **Argamassa de cimento reforçada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar e sua utilização como material de construção**. Campinas, 1996. 105p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- Ramírez Sarmiento, C.; Freire, W.J. Tratamentos aplicados ao bagaço de cana-de-açúcar visando sua utilização para fins de material de construção. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, São Paulo, 1996. **Anais**. São Paulo, EP-USP/Antac, 1997. p.131-136.
- Ramos, J.; Davalos, F.; Navarro, F. High yield pulping from sugar cane bagasse and other non wood plant fibers, an state of the art review. In: Nanjing International Symposium on High Yield Pulping, Nov. 1997. **Proceedings**. Nanjing, Chinese Academy of Forestry, 1997. p.152-86.
- RAS Technical Bulletin. **Fibre concrete roofing (FCR) and micro concrete roofing (MCR)**. St. Gallen, Basin, Jan. 1994. 4p. (Issue nr. 3)

- Regourd, M. Ciments speciaux et ciments avec additions (theme 3) – caracteristiques et activation des produits d’addition (sous-theme 3.1). In: Proc. 8th International Congress on the Chemistry of Cement, 8., Rio de Janeiro, 1986. v.1, 3.1/1-30.
- Richardson, I.G.; Wilding, C.R.; Dickson, M.J. The hydration of blastfurnace slag cements. **Advances in Cement Research**, v.2, n.8, p.147-57, Oct. 1989.
- Rilem. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. **Materiaux et Constructions**, v.17, n.102, p.441-56, 1984. (Rilem Draft Recommendations, Technical Committee 49 TFR)
- Rongxi, S. Current status, trends of world fibre-cement industry and its impact on China fibre-cement industry. In: National Fibre-Cement Technology, Standards and Information Conference, 4., Beijing, Sep. 1995. **Proceedings**.
- Sato, K.; Konishi, E.; Fukaya, K. Hydration of blast furnace slag particle. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 8., Rio de Janeiro, 1986. **Proceedings.**, v.4, 3.1/1-6.
- Savastano Jr., H. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito**. São Paulo, 1992. 249p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Savastano Jr., H.; Agopyan, V. Microestrutura x desempenho dos compósitos reforçados com fibras vegetais. In: Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil, São Paulo, 1996. **Anais**. São Paulo, Epusp/Antac, 1997. p.153-8.
- _____. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. **Cement & Concrete Composites**, v.21, n.1, p.49-57, 1999.
- Savastano Jr., H.; Agopyan, V.; Nolasco, A.M.; Pimentel, L. Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construction and Building Materials**, v.13, n.8, p.433-8, 1999.
- Savastano Jr., H.; Dantas, F.A.S.; Agopyan, V. **Materiais reforçados com fibras: correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas**. São Paulo, IPT/Pini, 1994. 56p. (Publicação IPT 2158 - boletim 67)
- Savastano Jr., H.; Luz, P.H.C.; Nolasco, A.M. Seleção de resíduos de alguns tipos de fibra vegetal, para reforço de componentes de construção. In: Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1., Canela, nov. 1997. **Anais**. Porto Alegre, Antac, 1997a. p.107-12.
- Savastano Jr., H.; Mabe, I.; Devito, R.A. Fiber cement based composites for civil construction. In: International Symposium on Natural Polymers and Composites - ISNaPol 98, 2., May 1998. **Proceedings**. São Carlos, Unesp/Embrapa/USP, 1998. p.119-22.

- Savastano Jr., H.; Nolasco, A.M.; Oliveira, L. Disponibilidade de resíduos de alguns tipos de fibra vegetal, no Brasil, para uso em componentes de construção. In: Seminario Iberoamericano 1997 de Materiales Compuestos Fibrorreforzados, 1., y Reunión Proyecto PIP VIII.5 Cytel, 3., Cali, mai. 1997. **Memorias**. Cali, Universidad del Valle/Cytel, 1997b. p.128-32. (Artículo 16)
- Saxena, M.; Morchhale, R.K.; Meshram, A.N.; Khazanchi, A.C. Development of sisal cement composites as substitute for asbestos cement components for roofing. In: International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete, 4., Sheffield, 1992. **Proceedings**. London, E&FN Spon, 1992. p.1140-51. (Rilem Proceedings, 17)
- Shi, C. Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.12, p.1789-99, 1996.
- Shimizu, G.; Jorillo Jr., P. Coir fibre reinforced cement based composite - part 1: microstructure and properties of fibre-mortar. In: International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete, 4., Sheffield, 1992. **Proceedings**. London, E&FN Spon, 1992. p.1080-95. (Rilem Proceedings, 17)
- Silva, O.R.R.; Beltrão, N.E.M. **O agronegócio do sisal no Brasil**. Brasília/Campina Grande, Embrapa-SPI-CNPA, 1999.
- Simpósio de Ciências da Engenharia Ambiental, 2., e Simpósio do Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, 4., São Carlos, ago. 1997. **Anais**. São Carlos, CRHEA-EESC-USP, 1997.
- Simpósio Ibero-Americano de Telhados para Habitação, 3., São Paulo, jul. 1998. **Anais**. São Paulo, Cytel/USP, 1998.
- Soroushian, P.; Marinkute, S.; Won, J.-P. Statistical evaluation of mechanical and physical properties of cellulose fiber reinforced cement composites. **ACI Materials Journal**, v.92, n.2, p.172-80, Mar.-Apr. 1995a.
- Soroushian, P.; Shah, Z.; Won, J.-P. Aging effects on the structure and properties of recycled wastepaper fiber cement composites. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 29 (June 1996) 312-7
- _____. Optimization of waste fiber-cement composites. **ACI Materials Journal**, v.92, n.1, p.82-92, Jan.-Feb. 1995b.
- Soroushian, P.; Shah, Z.; Won, J.-P.; Hsu, J.-W. Durability and moisture sensitivity of recycled wastepaper-fiber-cement composites. **Cement & Concrete Composites**, v.16, p.115-28, 1994.
- Swamy, R.N. (editor). **Natural fibre reinforced cement and concrete**. Glasgow, Blackie, 1988. 288p.
- Swamy, R.N. Vegetable fibre reinforced cement composites - a false dream or a potential reality? In: International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials, 2., Salvador, 1990. **Proceedings**. London, Chapman and Hall, 1990. p.3-8. (Rilem Proceedings, 7)

- Swift, D.G. Sisal-cement composites and their potential for rural Africa. In: Composite Structures, 3. **Proceedings**. London, Elsevier Applied Science Publishers, 1985. p.774-787
- Textília. Milano, v.22, out./nov./dez. 1996.
- Tolêdo Filho, R.D. Materiais compósitos reforçados com fibras naturais vegetais. In: Tolêdo Filho, R.D.; Nascimento, J.W.B.; Ghavami, K. (coord.). **Materiais não convencionais para construções rurais**. Campina Grande, UFPB/SBEA, 1997. cap.2, p.49-82.
- Valle, C.E. **Qualidade ambiental: o desafio de ser competitivo protegendo o meio ambiente**. São Paulo, Pioneira, 1995. 117p.
- Wang, S.-D., Pu, X.-C.; Scrivener, K.L.; Pratt, P.L. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. **Advances in Cement Research**, v.7, n.27, p.93-102, July 1995.
- Wang, S.-D.; Scrivener, K.L. Hydration products of alkali activated slag cement. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.3, p.561-71, 1995.
- Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, São Paulo, nov. 1996. **Anais**. São Paulo, Antac/EP-USP, 1997.
- Zhu, W.H. **Utilisation of banana fibre in composite materials**. Melbourne, 1993. Dissertation (Master Thesis) - Victoria University of Technology.
- Zhu, W.H.; Tobias, B.C.; Coutts, R.S.P.; Langfors, G. Air-cured banana-fibre-reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, v.16, n.1, p.3-8, 1994.