



COMUNICADOS TÉCNICOS

VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE FIBRAS VEGETAIS PARA FINS DE OBTENÇÃO DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Holmer Savastano Junior¹ & Lia Lorena Pimentel²

RESUMO

O presente estudo abordou a existência e as principais características de vinte resíduos de fibras vegetais, resultantes de processos agroindustriais, voltados para a obtenção de oito diferentes tipos de fibras comerciais. Com base em critérios de seleção inicialmente estabelecidos, foram identificados seis resíduos de maior interesse. Os resultados indicaram a potencialidade do seu emprego, no reforço de matrizes frágeis, à base de cimento Portland, para aumento de sua ductilidade. Telhas produzidas a partir de compósitos reforçados com fibras residuais de sisal “baler twine”, coco, polpa de eucalipto, malva e banana, além de combinação entre fibras de coco e polpa de eucalipto, resistiram a cargas na flexão, superiores a 680 N, em conformidade com especificações internacionais.

Palavras-chave: reciclagem de resíduos, fibrocimentos, sistema de cobertura, telhas

SUITABILITY OF VEGETABLE FIBER RESIDUES AS CONSTRUCTION MATERIAL

ABSTRACT

Twenty vegetable fiber by-products from agro-industrial production of eight different commercial fibers were analyzed in this study. Based on previously established selection criteria, six main types of residue were identified. Results showed that the selected by-products may be used as reinforcement of fragile cementitious matrices, for ductility improvement. Tiles produced with composites reinforced by residual fibers of sisal baler twine, coir, eucalyptus pulp, malva, banana, or a mixture of coir fibers and eucalyptus pulp, supported flexural loads in excess of 680N in keeping with international specifications.

Key words: residues recycling, fiber-cement, roof systems, tiles

Recebido em 14/09/1998, Protocolo 121/98

¹ Prof. Dr., FZEA/USP, CP 23, CEP 13630 - 000, Pirassununga, SP. Telefax: (0xx19) 561 1689. E-mail: holmersj@usp.br

² Técnica Laboratorial, Eng. Civil, Unimep, Rod. Sta. Bárbara D'Oeste-Iracemápolis, km 1,5, CEP 13450 - 000, Sta. Bárbara D'Oeste, SP. Fone: (0xx19) 422 1515, Fax: (0xx19) 422 2600. E-mail lia_pimentel@hotmail.com

INTRODUÇÃO

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;
- perecibilidade dos produtos;
- poucas informações disponíveis de como se destinar resíduos a utilizações alternativas. É quase inexistente a prática de “bancos de resíduo”, para fins de re-alocação desses materiais em outros mercados.

Um material deixa de ser resíduo pela sua valorização como matéria-prima, para a produção 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).

Guimarães (1990) e Agopyan (1991) relataram diversas experiências sobre o uso de matrizes à base de cimento reforçado com fibras naturais, no Brasil, para produção de componentes construtivos, como telhas, painéis de vedação vertical, caixas d'água e pias de cozinha. 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 Saxena et al. (1992), Gram & Gut (1994) e Delvasto et al. (1995). 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., 1995 e Basin-Ras, 1994).

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 e Coutts & Warden, 1992) empregaram polpas celulósicas como reforço e o 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 trabalho 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.

MATERIAL E MÉTODOS

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 (Tabela 1). A polpa celulósica de eucalipto, neste caso, foi proveniente de diversos estágios dos processos kraft e branqueamento, enquanto todas as demais fibras foram obtidas na forma de fio ou macro-fibras (isto é, feixes de fibras individuais).

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 coleta de amostras para caracterização física dos resíduos de maior interesse.

Preparação e ensaio dos compósitos

Foram produzidos compósitos com matriz de argamassa de cimento Portland CII-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

Tabela 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
Piaçava	<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 nanicação	<i>Musa cavendishii</i>	Pseudocaule	Vale do Ribeira, SP
Malva	<i>Urena lobata</i> Linn.	Caule	Amazônia

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 da grande quantidade de fibra empregada 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 utilizadas foram cortadas 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 um microscópio eletrônico de varredura DSM940A-Zeiss, com as amostras previamente metalizadas em ouro por 120 s num metalizador Balzers Union, MED-010.

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 fibras 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.

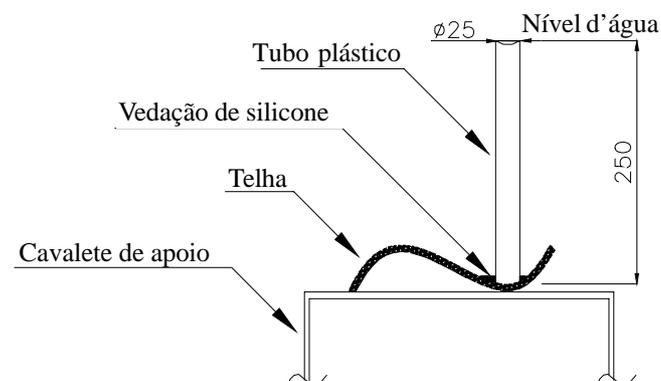
Para caracterização dos compósitos na condição recém-misturada, optou-se pela determinação da massa específica e do índice de consistência (mesa de consistência ou “flow-table”). Os ensaios na condição endurecida, cada um deles com seis repetições por série, foram, por seu turno: tração na flexão com quatro cutelos (vão inferior de 270 mm), utilizando-se corpos-de-prova prismáticos de 300 x 150 x 5 mm (Rilem, 1984), compressão axial (corpos-de-prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm 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⁻¹ e monitoramento 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.

Preparação e ensaio das telhas

Foram moldadas três telhas por série, conforme a mesma dosagem já descrita; para tanto, utilizou-se equipamento da Parry Associates, Reino Unido, para moldagem e adensamento por vibração das telhas; seu formato, similar ao das telhas cerâmicas tipo “romana”, apresenta as dimensões (medidas do quadro de moldagem) de 487 x 263 mm. Tal equipamento consiste numa simples mesa vibratória, acionada por motor elétrico de 736 W 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 e o conjunto plástico-placa arrastado para uma forma ondulada, que confere à telha seu formato final. Após 24 h, as telhas foram desformadas e os filmes plásticos destacados de suas superfícies

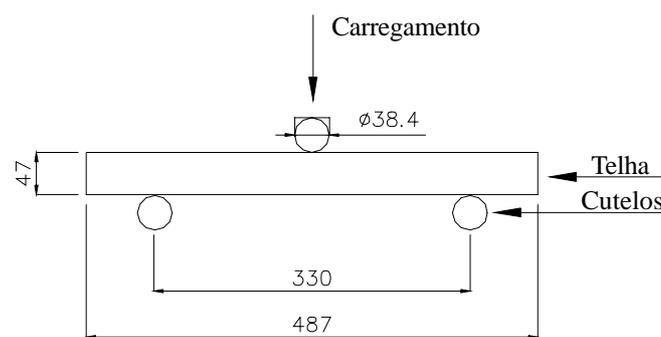
(aquelas em contato com as formas), seguindo as telhas para cura úmida em atmosfera saturada por 7 dias. Por fim, as telhas foram conservadas em ambiente de laboratório, até a data dos testes.

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 1), absorção de água e desempenho mecânico à flexão com três cutelos (velocidade de carga de $100 \pm 10 \text{ N s}^{-1}$, equipamento Emic DL 30000 com célula de carga de 5 kN e programa de controle M-Test v.1.01/96, ver esquema do ensaio na Figura 2). 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. Obs.: sem escalas, medidas em mm

Figura 1. Esquema de ensaio de permeabilidade de telhas (NBR 13858-2)



Legenda: Vista Lateral. Obs.: sem escala, medidas em mm

Figura 2. Esquema de ensaio de flexão de três cutelos, para telhas (NBR 13858-2)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resíduos de uso viável

A Tabela 2 apresenta vinte tipos de resíduos, oriundos do processo agroindustrial de obtenção das fibras vegetais comerciais em estudo.

Sisal: Os resíduos mais abundantes acontecem no desfibramento; cada tonelada de fibra verde (antes da 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. 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

Tabela 2. Resíduos do processamento de fibras vegetais

Fibra	Resíduo					
	Produto Principal	Denominação	Aproveitamento para outros Fins	Valor* (US\$ t ⁻¹)	Quantidade** (t ano ⁻¹)	Relação % (Resí/Prod.)
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⁾
	“Baler twine” (fio agrícola)	Bucha (tingim. c/ anilina e mist. c/ 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 fio (tingim. 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 prod. vassouras	Fibras fora de padrão	Reprocessamento (parcial)	270	12 – Valença	10 – 15 ⁽⁵⁾
Coco	Fibras longas e médias	Fibras curtas (1 – 3 cm)	Parcial: filtros, mantas, tapetes e substratos agrícola	270	3000 – Brasil	40 ⁽⁶⁾
	Fibras longas	Pó residual não peneirado – umidade aprox: 80% em massa	Desprezível	90 (máx.)	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 aprox: 80% em massa	Parcial: o pó (50% em massa) é utilizado como substrato agrícola	90	3000 – Diniz	200 ⁽⁸⁾
Algodão	Fio 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 aprox.: 60% em massa	Papel de qualidade inferior	15	17000 – Aracruz	0,5 ⁽¹⁰⁾
Rami	Fibra curta de 1 ^a para tecelagem	Resíduo do amaciamento	Substrato de uso agropecuário	Nulo	250 – Brasil	5 ⁽¹¹⁾
	Fibra curta de 2 ^a para tecelagem	Resíduo do amaciamento	Substrato de uso agropecuário	Nulo	140 – Brasil	20 ⁽¹¹⁾
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⁾

* US\$ 1,00 = R\$ 1,755 (cotação média do câmbio paralelo em 9/4/99)

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

de diversos comprimentos, quase isentas de pó, sem tratamento químico e consideradas subprodutos, em decorrência do baixo valor de mercado (Tabela 2); já a fabricação de “baler twine” (fio agrícola para exportação e principal uso do sisal) 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 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).

Piçava: Na fase de limpeza e penteamento da fibra, cerca de 30% de refugo, atualmente queimados ao ar livre, podem ser aproveitados, desde que separados da palha; outro resíduo de fácil aproveitamento advém das fábricas de vassoura, onde se descarta grande parte das fibras com menos de 50 cm de comprimento.

Coco: A agroindústria brasileira dessa fibra pode originar fibras de 1 a 3 cm (comprimento considerado ideal para reforço de matrizes cimentícias) hoje pouco direcionadas a outras aplicações.

Algodão e polpa de celulose de eucalipto: As fibras-resíduo são bastante curtas (comprimento inferior a 5 mm), o que as direciona para reforço de pastas; além disso, são disponíveis de forma concentrada geograficamente, junto aos centros geradores.

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, em razão da concorrência de fibras naturais importadas e sintéticas.

Banana: Fibras de excelente qualidade (Nolasco, 1997) e regiões geradoras relativamente próximas 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.

Malva: Diversos subprodutos (denominação técnica: tipo 4, bucha, “cutting” e aparas) já enfrentam forte concorrência dos produtos sintéticos. Essas fibras residuais apresentam, como vantagem, presença de fibrilas (ramificações superficiais), que aumentam a ancoragem da fibra na matriz; já a presença de impurezas não fibrosas interfere negativamente, o que sugere sua limpeza prévia.

Seleção de resíduos: Com base nos critérios anteriormente apresentados, foram pré-selecionados seis resíduos vegetais:

– bucha verde de campo do sisal. Aspectos positivos: grande disponibilidade e interesse comercial quase nulo. 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 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 e significativo potencial de produção; além disso, características microestruturais (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 potencial produtivo e baixo custo de produção, desde que extraída por processos elementares.

– malva tipo 4: subproduto que alcança preços relativamente altos (Tabela 2) porém com boa potencialidade de uso futuro, na construção civil, tendo em vista a tendência de redução em sua participação no mercado têxtil.

Propriedades físicas dos resíduos

As principais propriedades físicas dos resíduos selecionados foram determinadas e estão listadas na Tabela 3. Para efeito de referência, realizou-se compilação de propriedades mecânicas de fibras similares, a partir de resultados apresentados por Nolasco et al. (1998), Agopyan & Savastano Jr. (1997), Tolêdo Filho (1997) e Swamy (1988), também disponíveis na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades físicas dos resíduos pré-selecionados e propriedades mecânicas de fibras similares

Fibra	Comprimento Médio* (mm)	Diâmetro Médio* (µm)	Massa Específica (kg m ⁻³)		Volume de Vazios Permeáveis** (%)	Absorção Máxima** (%)	Alongamento na Ruptura (%)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
			Real**	Aparente**					
Sisal									
Bucha verde	22,0	187	1104	280	77,3	201	Nd	Nd	Nd
Bucha “baler twine”	23,8	204	1387	400	72,4	151	4,3 ⁽⁴⁾	458 ⁽⁴⁾	15,2 ⁽⁴⁾
Coco pó residual	20,6	223	1165	370	73,1	146	23,9 – 51,4 ⁽¹⁾	95 – 118 ⁽¹⁾	2,8 ⁽¹⁾
Rejeito de polpa de eucalipto	0,66	10,9	1609	230	89,2	643	Nd	300 – 500 ⁽¹⁾	10 – 40 ⁽¹⁾
Banana	19,1	154	1031	170	84,5	407	2,7 ⁽²⁾	384 ⁽³⁾	20 – 51 ⁽³⁾
Malva	23,8	42,6	1374	254	81,5	377	5,2 ⁽¹⁾	160 ⁽¹⁾	17,4 ⁽¹⁾

Nd = informação não disponível

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

(**) NBR-9778

Fontes: (1) Agopyan & Savastano Jr. (1997); (2) Nolasco et al. (1998); (3) Swamy (1988); (4) Tolêdo Filho (1997)

Propriedades dos compósitos

Na condição recém-misturada os compósitos mostraram massa específica inferior à da matriz de referência (Tabela 4), justificável pela presença das fibras, que possuem reduzida massa específica aparente (Tabela 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), mesmo com o emprego de relação água-cimento maior que para a matriz sem fibra.

Os resultados das propriedades mecânicas (Tabela 4) 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 compacidade 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 provável presença elevada de extrativos e impurezas (por exemplo, mucilagem) 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 em água, uso de técnicas de “mineralização” da fibra (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 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 demonstra 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 (Tabela 3): elevada resistência mecânica, tratamento impermeabilizante recebido durante processamento e relação comprimento-diâmetro adequada (aproximadamente igual a 100, conforme sugerido em Swamy, 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 fibra-matriz aumentando, assim, a dissipação de energia.

Caracterização das telhas

As telhas apresentaram propriedades físicas (Tabela 5) consideradas satisfatórias, segundo critérios da NBR-13858-2:

– empenamento, importante na avaliação do encaixe das telhas, foi inferior a 3mm, 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 24 h 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) 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, banana e malva, com peso cerca de 15% 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 h, mostrou-se sempre inferior a 15%, o que é aceitável pela NBR-7581

Tabela 4. Propriedades físicas e mecânicas dos compósitos

Fibra	Massa Espec. – Condição Recém- Misturada (kg m ⁻³) ⁽¹⁾	Índice de Consistência (mm) ⁽²⁾	Resistência à Tração na Flexão aos 42 Dias (MPa) ⁽³⁾	Energia de Fratura na Flexão aos 42 dias* (N mm ⁻¹) ⁽³⁾	Resistência aos 28 dias	
					Compressão (MPa) ⁽⁴⁾	Tração (MPa) ⁽⁵⁾
Sisal bucha de campo	2024	220	3,44	237**	19,8	2,82
Sisal bucha de baler twine	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
Padrão sem fibra	2148	316	5,84	283	37,3	4,61

(*) 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

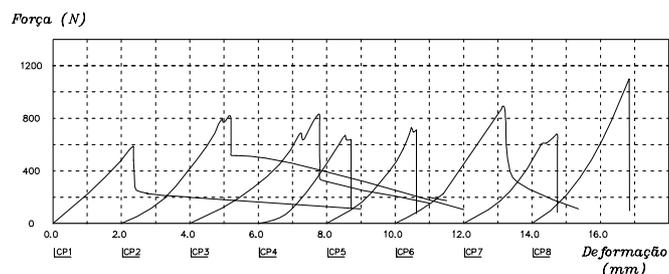
Tabela 5. Propriedades físicas e mecânicas das telhas, aos 28 dias de idade (NBR-13858-2)

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 Absorvida (N mm)
Sisal bucha de campo	0,95	Mancha	13,6	2547	12,0	607	1422
Sisal bucha de "baler twine"	0,85	Nada	13,4	2605	12,3	864	2762
Coco pó residual	2,10	Nada	13,4	2594	11,8	845	1458
Rejeito de polpa de eucalipto	2,05	Nada	12,3	2555	11,5	768	1054
Banana	3,23	Nada	13,7	2611	12,2	681	877
Malva fibra tipo 4	0,60	Mancha	13,5	2763	12,9	804	1476
Coco + polpa de eucalipto	1,90	Nada	12,8	2490	10,6	717	1096
Padrão sem fibra	2,02	Nada	10,7	2700	10,9	1012	1242

(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.

O desempenho mecânico (Tabela 5) diferenciou positivamente alguns tipos de fibra empregados, no que se refere à energia absorvida. As telhas reforçadas com fibras de sisal, coco e malva, atingiram energia à flexão, na condição pós-fissurada, pelo menos 15% superior ao padrão sem fibra, além da vantagem de ausência de ruptura frágil do componente. Como discutido para os compósitos no subitem anterior (Tabela 4) a maior absorção de energia foi alcançada com o reforço de fibra de sisal "baler twine".

A Figura 3 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 (CPs 2 e 3, por exemplo), ocorre a breve manutenção ou mesmo acréscimo da força aplicada, pelo efeito de reforço das fibras que atravessam a região da microfissura recém-iniciada na matriz. Conforme apontado por Tolêdo Filho (1997), esse comportamento do compósito resulta da combinação ótima entre fração volumétrica e comprimento das fibras.



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.

Figura 3. Curvas de força x deformação das telhas ensaiadas à flexão

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, conforme já evidenciado na Tabela 5, 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) 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.

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.

Considerações adicionais

Estudos anteriores (Agopyan, 1991) também demonstraram a viabilidade do emprego das fibras vegetais na produção de compósitos à base de matrizes frágeis, em especial com aglomerantes alternativos de baixa alcalinidade, escória de alto forno e cinza de casca de arroz, por exemplo, o que contribui para a maior durabilidade das fibras. 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.

CONCLUSÕES

1. As avaliações de disponibilidade e dispersão geográfica permitiram a escolha de seis resíduos com maior potencial de aproveitamento na construção civil, a preços bem inferiores aos de outras fibras substitutas (preço internacional de polipropileno por volta de US\$ 900 t⁻¹). Esses resíduos pré-selecionados foram sisal bucha de campo, sisal bucha de "baler twine", coco pó residual, rejeito de polpa de eucalipto, banana e malva tipo 4. 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.

2. 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 pesquisada, com destaque para a elevada absorção de energia na condição pós-fissurada.

3. Estudos futuros serão 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.

AGRADECIMENTOS

À Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) - FNDCT programa BID, pelo suporte financeiro; ao Prof. Dr. Hélio Dias da Silva, do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba (Unimep) pelo empréstimo do equipamento de moldagem das telhas. Aos alunos de graduação Reginaldo A. Devito (bolsa de treinamento da Pró-Reitoria de Pesquisa da USP) e Guilherme Vilhena (bolsa-trabalho da Coordenadoria de Assistência Social da USP) pelo apoio laboratorial. Ao NAP-MEPA-ESALQ-USP, pela ajuda na caracterização física das fibras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: Uso de fibras vegetais. São Paulo: USP, 1991. 204p. Tese Livre-Docência
- 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 FIBROREFORZADOS, 1, y REUNION PROYECTO PIP VIII.5 CYTED, 3, 1997, Cali. Memorias... Cali: Universidad del Valle, 1997. p. 23-40. (Artículo 03)
- BASIN-RAS. Roofing from waste materials. Basin-News, St. Gallen, p. 28-30, Jan. 1994.
- COUTTS, R.S.P.; WARDEN, P.G. Sisal pulp reinforced cement mortar. Cement & Concrete Composites, Kidlington, 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
- 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., 1990, Salvador. Proceedings... London: Chapman and Hall, 1990. p. 98-107. Rilem Proceedings, 7
- JOHN, V.M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: EP-USP/Antac, 1997. p. 21-30.
- NOLASCO, A.M. (coord.) Relatório do projeto de aproveitamento dos resíduos da agroindústria da banana no Vale do Ribeira, 11. Piracicaba: LED-ESALQ-USP/SCTDE-SP, 1997. 102p.
- NOLASCO, A.M.; SOFFNER, M.L.A.P.; NOLASCO, A.C. Physical-mechanical characterization of banana fiber – Musa cavendishii, cultivar nanicao. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES, 2, 1998, São Carlos. Proceedings... Brasília: Embrapa/SPI, 1998. p. 191-194.
- RAMIREZ SARMIENTO, C.S.; 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, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: EP-USP/Antac, 1997. p. 131-136.
- RAS TECHNICAL BULLETIN. Fibre concrete roofing (FCR) and micro concrete roofing (MCR). St. Gallen: Basin, Jan. 1994. 4p. Issue No. 3
- RILEM. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. Materiaux et Constructions, Paris, v. 17, n. 102, p. 441-456, 1984. RILEM Draft Recommendations, Technical Committee 49 TFR
- SAVASTANO Jr., H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. Cement & Concrete Composites, Kidlington, v. 21, n. 1, p. 49-57, 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
- SAXENA, M.; MORCHHALE, R.K.; MESHARAM, 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, 1992, Sheffield. Proceedings... London: E&FN Spon, 1992. p. 1140-1151. Rilem Proceedings, 17
- SOROUSHIAN, P.; SHAH, Z.; WON, J.P. Optimization of waste fiber-cement composites. ACI Materials Journal, Farmington Hills, v. 92, n. 1, p. 82-92, Jan. - Feb. 1995.
- SWAMY, R.N. (editor). Natural fibre reinforced cement and concrete. Glasgow: Blckie, 1988. 288p.
- 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
- 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, PB: 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.