UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

GUSTAVO HENRIQUE DENZIN TONOLI

**ASPECTOS PRODUTIVOS E ANÁLISE DO DESEMPENHO DO
FIBROCIMENTO SEM AMIANTO NO DESENVOLVIMENTO DE
TECNOLOGIA PARA TELHAS ONDULADAS**

Pirassununga
2006

GUSTAVO HENRIQUE DENZIN TONOLI

**ASPECTOS PRODUTIVOS E ANÁLISE DO DESEMPENHO DO
FIBROCIMENTO SEM AMIANTO NO DESENVOLVIMENTO DE
TECNOLOGIA PARA TELHAS ONDULADAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Zootecnia.

Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal

Orientador: Prof. Dr. Holmer Savastano Júnior

Pirassununga
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

preparada pela

Biblioteca da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo

T666a	<p>Tonoli, Gustavo Henrique Denzin</p> <p>Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas / Gustavo Henrique Denzin Tonoli – Pirassununga, 2006.</p> <p>129f.</p> <p>Dissertação (Mestrado) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – Universidade de São Paulo. Departamento de Zootecnia.</p> <p>Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Holmer Savastano Júnior.</p> <p>Unitermos: 1. Fibrocimento 2. Amianto 3. Telhas onduladas 4. Fibras Vegetais I. Título.</p>
-------	--

À minha mulher Cláudia e filha Clara,
pela parceria, pela paciência e pelo amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Holmer Savastano Júnior, pela orientação, compreensão e pela confiança depositada durante esse importante período de formação profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

À FINEP pelo financiamento do equipamento de produção de telhas.

Às instituições que direta ou indiretamente financiaram este trabalho de pesquisa, como FAPESP, CNPq, CAPES Procad e NSF (USA).

Ao Professor Doutor Júlio César de Carvalho Balieiro, pelo apoio nos delineamentos experimentais e nas avaliações estatísticas.

Ao grupo Fibrocimento, pelo apoio e principalmente à equipe da Indústria Infibra Ltda, pela disposição dos equipamentos e ajustes necessários durante a fase inicial. Também pela contínua disponibilidade das matérias-primas durante o experimento. Em especial aos funcionários que prestaram auxílio técnico para a finalização e aplicação final dos compósitos.

Aos colegas do Laboratório de Construções e Ambiente da FZEA-USP, que tanto contribuíram no dia-a-dia, em especial ao colega engenheiro agrimensor Zaqueu Dias de Freitas.

Ao Doutor Sérgio Francisco dos Santos pela ajuda com a revisão do trabalho.

Aos colegas Cleber Dias (POLI/USP), Gustavo Rocha (UFSCAR) e Mário Massayuki Akiyoshi (UFSCAR) pela ajuda e cooperação nas análises realizadas nessas instituições.

Aos amigos da graduação que ainda contribuíram nesta nova etapa de estudo. Principalmente Vássia Soares (UFV) e Samuel Coura (INPE).

Aos meus pais, pelo contínuo apoio psicológico e financeiro.

À minha mulher Cláudia pela parceria, sem a qual não haveria tranquilidade e tempo hábil para a elaboração dessa pesquisa.

A todos os que de alguma forma apoiaram ou ofereceram apoio e não foram citados.

Cordiais saudações e muito obrigado!

“Não sei que idéia o mundo faz de mim, mas na minha própria opinião, creio ter sido apenas como um menino brincando na praia, divertindo-me ao encontrar de vez em quando uma pedra mais lisa ou uma concha mais bonita do que as comuns, enquanto se estendia na minha frente o grande oceano da verdade, ainda por descobrir”.

Isaac Newton.

RESUMO

TONOLI, G.H.D. **Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas**. 2006. 129p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2006.

Estudos anteriores utilizando matriz cimentícia reforçada exclusivamente com fibras vegetais propiciaram a produção de telhas com desempenho aceitável nas idades iniciais. Porém, com o envelhecimento natural, as telhas apresentaram significativa redução do desempenho mecânico, fato este atribuído principalmente ao ataque alcalino da matriz cimentícia. A presente pesquisa teve como objetivo o aprimoramento de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto, a partir de processo automatizado. A primeira etapa do trabalho consistiu na avaliação do efeito da intensidade de refino da polpa *Kraft* de sisal (*Agave sisalana*) nas propriedades mecânicas e físicas de placas planas baseadas em matriz de cimento Portland, e o uso conjunto com fibras de polipropileno (PP). Esta etapa envolveu também a caracterização dos principais atributos das polpas celulósicas refinadas, bem como a caracterização microestrutural (microscopia eletrônica de varredura e porosimetria por intrusão de mercúrio) do material resultante após envelhecimento acelerado e em ambiente natural. Na segunda etapa, séries de telhas onduladas de fibrocimento foram produzidas por técnica de sucção do excesso de água e prensagem, utilizando os melhores parâmetros definidos na etapa anterior. Os efeitos da cura acelerada em autoclave e dos envelhecimentos acelerados (carbonatação acelerada, imersão-secagem e calor-chuva) nas propriedades mecânicas e físicas das telhas foram avaliados. Os resultados obtidos mostraram a grande contribuição do refino da polpa celulósica na melhoria da resistência dos compósitos. Altas intensidades de refino apresentaram os melhores resultados para compósitos reforçados somente com polpa celulósica, mesmo após os envelhecimentos, porém intensidades intermediárias em compósitos híbridos mostraram-se suficientes. A adição das fibras de polipropileno como reforço híbrido teve como ponto forte a manutenção da resistência ao impacto, propriedade esta fortemente afetada pelo envelhecimento acelerado nos compósitos reforçados somente com polpa de sisal. As telhas produzidas mostraram-se mais eficientes no amortecimento térmico do que

telhas comerciais de fibrocimento amianto. Melhorias no processo de produção das telhas mostraram efetiva contribuição no desempenho mecânico em relação aos trabalhos anteriores, tanto no curto como no longo prazo. Os resultados também indicaram a utilização da carbonatação acelerada como um procedimento eficiente na mitigação da degradação sofrida pelas fibras celulósicas em meios menos agressivos, no caminho para tornar viáveis os materiais reforçados com fibras vegetais.

Palavras-chave: autoclavagem; carbonatação acelerada; cimento Portland; compósitos; conforto térmico; durabilidade; envelhecimento acelerado; fibras celulósicas; fibras de polipropileno; fibras de sisal; fibras vegetais

ABSTRACT

TONOLI, G.H.D. **Productive aspects and performance of fibrecement without asbestos in the development of technology for undulate roofing tiles.** 2006. 129p. M.Sc. Dissertation – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2006.

Previous studies using exclusively vegetal fibres as the sole reinforcement of cement matrix have propitiated the production of roofing tiles with acceptable performance at the first ages. However, with the natural ageing, the roofing tiles have presented significant reduction in the mechanical performance, attributed to the alkaline attack of the cimentitious matrix mainly. The present research had as objective the improvement of undulate fibrecement roofing tiles without asbestos with automated equipment for production. The study also evaluated the physical, mechanical and microstructural behaviour of the obtained composites. The first stage consisted of evaluating the refinement effect of sisal *Kraft* pulp on mechanical and physical properties of flat pads based on Ordinary Portland cement and the jointly use of polypropylene fibres (PP). This stage also involved the characterization of the main attributes of refined cellulosic pulps, as well as the microstructural characterization (scanning electron microscopy and mercury intrusion porosimetry) of the resultant material after the accelerated and natural ageing. In the second stage, series of fibrecement roofing tiles were produced by slurry dewatering technique and pressing, using the best parameters of the first stage. Effects of autoclaved curing and accelerated ageing (accelerated carbonation, soak-dry and heat-rain) on mechanical and physical properties of tiles were evaluated. Results showed the great contribution of pulp refinement on mechanical strength improvement. Higher intensities of refinement provided the best results for composites only reinforced with sisal pulp, despite ageing mechanism. Intermediate refinement revealed to be enough for hybrid composites. Addition of polypropylene fibres as hybrid reinforcement provided toughness maintenance after ageing, which was strongly affected only in sisal reinforced composites. Asbestos free tiles showed to be more efficient on thermal insulating properties than commercial asbestos cement. Improvements on tiles production process showed effective contribution on mechanical performance in

relation to the previous works, both at initial ages and after ageing. The results have also indicated the utilization of accelerated carbonation as an effective procedure to mitigate the degradation suffered by the cellulosic fibres in the less aggressive medium, in way of the viability of the cement based materials reinforced by vegetal fibres.

Keywords: autoclave; accelerated ageing; accelerated carbonation, cellulosic fibres; composites, durability; polypropylene fibres; Portland cement; sisal fibres; thermal comfort; vegetable fibres

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do processo Hatschek para produção de fibrocimento (COUTTS, 1988).....	3
Figura 2 – Representação esquemática do comportamento à flexão de um compósito sem fibras e um reforçado com fibras (MEHTA; MONTEIRO, 1994).....	6
Figura 3 – Diagramas tensão x deformação. (a) Comportamento frágil; (b) comportamento dúctil: 1 - módulo de ruptura e 2 - limite de proporcionalidade; (c) área hachurada sob a curva indica a energia específica do material (adaptado de Mehta e Monteiro, 1994).....	7
Figura 4 – Representação esquemática do caminhamento da fissura através da matriz reforçada com fibras: (1) e (2) descolamento da fibra; (3) arrancamento da fibra; (4) rompimento da fibra (COUTTS, 1988).....	8
Figura 5 – Seção transversal de fibra de sisal (aglomerado de células) – (adaptado de NUTMAN, 1937).....	10
Figura 6 – Esquema da estrutura das células de fibra vegetal. (adaptado de GRAM, 1988; e ILLSTON; DINWOODIE; SMITH, 1979).....	10
Figura 7 – a) Planta de sisal (<i>Agave sisalana</i>); b) representação da parte útil da planta para produção das fibras (adaptado de LI; MAI; YE, 2000).....	12
Figura 8 – Representação do processo de fibrilação durante o refino de uma fibra: (1) fibrilação externa; (2) formação inicial de finos; (3) Fibrilação interna e inchamento; (4) corte e encurtamento da fibra (RODRIGUES, 2001).....	15
Figura 9 – Fotografias das superfícies de fratura das telhas produzidas por Roma Júnior (2004): (a) e (b). A seta (1) aponta os feixes de fibras de sisal (polpa <i>Kraft</i>). A seta (2) indica os poros provenientes do arrancamento dos feixes ou bolhas de ar aprisionado.....	22
Figura 10 – Fluxograma da primeira fase experimental - compósitos placas planas.....	31
Figura 11 – Fluxograma da segunda fase experimental – telhas onduladas.	32
Figura 12 – Planta de refino utilizada no experimento e detalhe do refinador de discos (300 mm de diâmetro), aberto para visualização das estrias.....	34
Figura 13 – Equipamento para avaliação da drenabilidade da polpa celulósica pelo método CSF “Canadian Standard Freeness”.....	35
Figura 14 – Difrátogramas dos materiais particulados utilizados nas placas planas (fases majoritárias): (a) cimento Portland (CP II-E); (b) material carbonático (Calcário Mineral [®]).	37

Figura 15 – Distribuição granulométrica dos materiais particulados utilizados na confecção das placas planas: (a) cimento Portland (CP II-E); (b) material carbonático (Calcário Mineral [®]).	38
Figura 16 – Difractogramas dos materiais particulados utilizados nas telhas onduladas (fases majoritárias): (a) cimento Portland (CP V-ARI); (b) material carbonático (Calcário Itaú [®]).	38
Figura 17 – Distribuição granulométrica dos materiais particulados utilizados nas telhas onduladas: (a) cimento Portland (CP V-ARI); (b) material carbonático (Calcário Itaú [®]).	39
Figura 18 – Ilustração do processo de sucção e prensagem: (1) mistura; (2) sucção do excesso de água; (3) adensamento manual; (4) sucção final; (5) prensagem (SILVA, 2002).	40
Figura 19 – Corpos-de-prova (165 x 40 x 5 mm) originados das placas planas (200 x 200 x 5 mm).	41
Figura 20 – (a) Representação do equipamento automatizado para moldagem das telhas; (b) vista geral do equipamento.	42
Figura 21 – (a) Prensagem na câmara de moldagem (seta 1), sucção do excesso de água (seta 2); (b) sucção pelo dispositivo superior (seta 3) e retirada da telha da câmara de moldagem (seta 4); (c) deslocamento horizontal do equipamento (seta 5) e re-preenchimento da câmara de moldagem com a mistura (seta 6); (d) deposição da peça no molde ondulado; (e) produto final.	45
Figura 22 – (a) Autoclave utilizada para a cura acelerada; (b) disposição das telhas dentro da autoclave.	46
Figura 23 – (a) Câmara climática Thermotron [®] utilizada na carbonatação acelerada das telhas onduladas. (b) Seção transversal de telhas com fenolftaleína antes da carbonatação acelerada (1) e após uma semana na câmara climática (2).	48
Figura 24 – (a) Estufa automática de operação dos ciclos de imersão-secagem; (b) Disposição das telhas no interior do equipamento.	51
Figura 25 – (a) Vista geral da estrutura calor-chuva; (b) Sistema de aquecimento em funcionamento; (c) Sistema de aspersão de água nas telhas em funcionamento.	52
Figura 26 – (a) e (b) Bancada de envelhecimento natural no campus da USP Pirassununga. (c) Estação meteorológica da FZEA – USP.	53
Figura 27 – (a) Esquema de ensaio de permeabilidade de telhas (SAVASTANO	

JÚNIOR, 2000); (b) telhas com os tubos fixados durante o ensaio de permeabilidade.....	56
Figura 28 – Equipamento universal de ensaios mecânicos: Emic® modelo DL-30000.	57
Figura 29 – (a) Configuração com quatro cutelos para placas planas. (b) Visualização da instalação no equipamento universal de ensaios.....	58
Figura 30 – (a) Configuração de três cutelos para telhas onduladas. (b) Representação da medição das flechas. (c) Dispositivo de ensaio para telhas onduladas (cutelo se ajustando à ondulação da telha).	60
Figura 31 – (a) Representação do arranjo dos paralelepípedos para análise de fio quente. (b) Preparo dos paralelepípedos com a colocação do fio quente e termopar. (c) Avaliação e coleta dos dados à temperatura ambiente. (d) Colocação no forno a 60°C. (e) Avaliação e coleta dos dados dentro do forno. (f) Aparatos utilizados na coleta dos dados (circuito de medida).	63
Figura 32 – a) Sensor acoplado ao datalogger para aquisição dos dados. b) Datalogger instalado na superfície inferior da telha.	65
Figura 33 – Micrografias ópticas nas diferentes intensidades de refino: (a) e (b) polpa não refinada (CSF 680 mL); (c) e (d) polpa submetida ao refino intermediário (CSF 220 mL); (e) e (f) polpa com a maior intensidade de refino.	70
Figura 34 – Distribuição de comprimento médio das fibras inteiras e do material fibroso.	72
Figura 35 – Distribuição da largura das fibras inteiras e do material fibroso.	73
Figura 36 – Micrografias de fibras nas diferentes intensidade de refino: (a) ausência de fibrilação (CSF 680 mL); (b) arrancamento em espiral da parede primária (CSF 220 mL); (c) fibrilação (CSF 220 mL); (d) remoção completa da parede primária (CSF 220 mL); (e) fibras após corte intensivo e arrancamento das fibrilas (CSF 20 mL); (f) detalhe da diminuição do diâmetro da fibra com o refino excessivo (CSF 20 mL).	74
Figura 37 – Micrografia da superfície de fratura de compósito híbrido com fibras de PP e polpa CSF 220 mL (seta - detalhe da superfície na matriz deixada pelo arrancamento das fibras de PP).	77
Figura 38 – Distribuição do diâmetro equivalente de poros em compósitos reforçados somente com sisal aos 28 dias (sem envelhecimento).	79
Figura 39 – Distribuição do tamanho de poros em compósitos reforçados somente	

com sisal e com sisal+PP aos 28 dias.	79
Figura 40 – Distribuição do tamanho de poros em compósitos reforçados somente com sisal, aos 28 dias e após 100 ciclos.	80
Figura 41 – Distribuição do tamanho de poros em compósitos reforçados com sisal+PP, aos 28 dias e após 100 ciclos.	80
Figura 42 – Curvas tensão-deformação para compósitos com polpa de sisal nas três intensidades de refino (CSF 20, 220 e 680 mL): (a) sem envelhecimento; (b) 50 ciclos; (c) 100 ciclos; (d) envelhecimento natural por 1 ano.....	82
Figura 43 – Micrografias das superfícies de fratura dos compósitos reforçados somente com sisal (CSF 680 mL): (a) predominância de arrancamento das fibras (200 μ m) aos 28 dias; (b) menor comprimento de arrancamento aos 100 ciclos (50 μ m); (c) 100 ciclos, descolamento das fibras não refinadas; (d) 100 ciclos, fibras pouco aderidas permitem grande variação higroscópica (interface de 3 μ m); (e) 100 ciclos, fratura da fibra e descolamento na interface; (f) envelhecimento natural, fratura da fibra, baixa aderência e ausência de fibrilação.....	87
Figura 44 – Micrografias das superfícies de fratura dos compósitos com polpa CSF 220 mL aos 100 ciclos de envelhecimento: (a) predominância de fratura das fibras; (b) detalhe da fratura das fibras; (c) preenchimento da interface fibra-matriz com produtos de hidratação.	88
Figura 45 – Micrografias das superfícies de fratura dos compósitos reforçados com polpa refinada à CSF 20 mL: (a) 100 ciclos, fibra bem aderida à matriz; (b) camadas primária soltando-se da fibra; (c) fibra se soltando da camada primária bem aderida à matriz; (d) envelhecimento natural, camada primária ficou aderida à matriz; (e) 100 ciclos, fibra é arrancada e deixa camada primária aderida à matriz; (f) 100 ciclos.	89
Figura 46 – Curvas tensão-deformação para compósitos com polpa de sisal em três intensidades de refino (CSF 20, 220 e 680 mL): (a) sem envelhecimento; (b) 50 ciclos; (c) 100 ciclos; (d) 1 ano de envelhecimento natural.....	92
Figura 47 – Micrografias das superfícies de fratura de compósitos híbridos com fibras de PP e polpa de sisal: (a) CSF 680 mL envelhecidos naturalmente (fratura das fibras de sisal); (b) CSF 220 mL aos 50 ciclos, arrancamento simultâneo de fibras de sisal e PP.	94

Figura 48 – Micrografias das superfícies de fratura de compósitos híbridos com fibras de PP e polpa CSF 20mL: (a) 28 dias, partículas de matriz aderidas à superfície da fibras de PP; (b) envelhecimento natural, camada primária aderida à matriz; (c) 100 ciclos, rompimento da fibra de PP; (d) envelhecimento natural, camada primária aderida à matriz.....	95
Figura 49 – Ensaio de permeabilidade de telhas, após 24 h com a coluna d'água de 250 mm: (a) manchas para a série S3PP1_7 aos 28 dias (seta – manchas de até 70 mm); (b) manchas para série S4_7 aos 28 dias (seta – manchas de até 30 mm de diâmetro); (c) manchas para série S3PP1_7 carbonatada e envelhecida 100c (C-100c).	99
Figura 50 – Superfície lixiviada pela ação da água durante o estágio de aspersão (fase chuva).	100
Figura 51 – Curvas força-deformação para telhas reforçadas com 4,7% de sisal, nos diversos envelhecimentos.	103
Figura 52 – Curvas força-deformação para telhas reforçadas com 3% de Sisal e 0,5% de PP, nos diversos envelhecimentos.	103
Figura 53 – Curvas força-deformação para telhas reforçadas com 3% sisal e 1% de PP, aos 28 dias e 100 ciclos de envelhecimento imersão-secagem.....	104
Figura 54 – Curvas força-deformação para telhas reforçadas com 3% Sisal e 1,7% de PP, nos diversos envelhecimentos.	104
Figura 55 – Seção transversal de telha reforçada com polpa de sisal refinada demonstrando a superfície de ruptura.	106
Figura 56 – Difrátogramas para série S4_7: (a) aos 28 dias não carbonatada; (b) envelhecida com 100 ciclos de imersão-secagem, não carbonatada; (c) carbonatada e envelhecida com 100 ciclos de imersão-secagem.	109
Figura 57 – Curvas de temperatura em função do tempo para os corpos-de-prova prismáticos de fibrocimento à temperatura ambiente (em torno de 25°C).	113
Figura 58 – Curvas de temperatura em função do tempo para os corpos-de-prova prismáticos de fibrocimento à temperatura de 60°C.	113
Figura 59 – Curvas de temperatura de superfície inferior em função da hora do dia e da radiação solar para os três tipos de telhas avaliados. Dados coletados no dia 20/12/05.	115
Figura 60 – Curvas de temperatura de superfície inferior em função hora do dia e da radiação solar para os três tipos de telhas avaliados. Dados coletados no dia	

22/12/05.....	116
---------------	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas das fibras.....	11
Tabela 2 – Variáveis e níveis de avaliação para os experimento com placas planas e telhas onduladas.	33
Tabela 3 – Características da fibra de PP.....	36
Tabela 4 – Composição aproximada para o calcário Minercal [®] (informações provenientes do fornecedor).	37
Tabela 5 – Formulações empregadas na produção das placas planas.	39
Tabela 6 – Formulações empregadas na produção das telhas onduladas.	43
Tabela 7 – Principais características climáticas no período de maio/2004 a maio/2005.	54
Tabela 8 – Caracterização morfológica de fibras inteiras por meio de microscopia óptica.	69
Tabela 9 – Características físicas da polpa de sisal (todo o material fibroso) após o refino, obtidas pelo equipamento Galai CIS-100 ^a	71
Tabela 10 – Médias e desvio-padrão para absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA) de placas planas nas três intensidades de refino (q) com e sem fibras de polipropileno, nos diversos envelhecimentos (r). [*]	76
Tabela 11 – Valores médios e os respectivos desvios-padrões das propriedades mecânicas: limite de proporcionalidade (LOP), módulo de ruptura (MOR), módulo elástico (MOE) e energia específica (EE) dos compósitos com polpa nas três intensidades de refino (q) com e sem fibras de polipropileno (p), e ainda, com os envelhecimentos acelerados e o natural (r). [*]	84
Tabela 12 – Resultados de Fator R (norma EN 494,1994) para placas planas nos diversos envelhecimentos.	96
Tabela 13 – Valores médios e desvio-padrão para absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA) das formulações com diversos teores de fibras (p) de telhas avaliadas nos diversos envelhecimentos (r). [*]	98
Tabela 14 – Valores médios e desvios-padrões para força máxima aplicada (FM), flecha na força máxima (FFM), flecha na energia total (FET) e energia total (ET) das formulações de telhas com diferentes teores de fibras (p) avaliadas nos	

diversos envelhecimentos (r).*	102
Tabela 15 – Resultados dos teores de hidróxidos e de carbonatos obtidos por meio da titulação potenciométrica.	108
Tabela 16 – Resultados de fator R conforme norma EN 494 (1994) para telhas onduladas nos diversos envelhecimentos.	111
Tabela 17 – Valores de condutividade térmica (k), do calor específico (c) e da difusividade térmica (α_1) dos materiais avaliados.	112
Tabela 18 - Principais características climáticas dos dias 20/12/2005 e 22/12/2005.	115

LISTA DE ABREVIações E ABREVIATURAS

A28d	autoclavem e ensaios aos 28 dias
A-100c	autoclavagem e 100 ciclos de molhagem-secagem
100c	envelhecimento acelerado com 100 ciclos de imersão-secagem
AA	absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C-100c	carbonatação acelerada e 100 ciclos de molhagem-secagem
C-C	envelhecimento calor-chuva (50 ciclos)
CP V ARI	cimento Portland de alta resistência inicial
CSF	<i>Canadian Standard Freeness</i>
DA	densidade aparente
DRX	difração de raios x
EAF	escória de alto forno
EE	energia específica (tenacidade)
ET	energia total
FM	força máxima
FM ₁	força máxima aos 28 dias
FM ₂	força máxima após envelhecimento
FCM	flecha no ponto da força máxima
FET	flecha no ponto da energia total
FZEA	Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
ISO	<i>International Standard Organization</i>
ILO	<i>International Labour Office</i>
LOP	limite de proporcionalidade
Mass	massa do material (kg)
MEV	microscopia eletrônica de varredura
MOE	módulo de elasticidade
MOR	módulo de ruptura
MOR ₁	módulo de ruptura aos 28 dias
MOR ₂	módulo de ruptura após envelhecimento
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação

NSF	<i>Natural Science Foundation</i>
OPC	<i>ordinary portland cement</i>
PA	porosidade aparente
PIM	porosimetria por intrusão de mercúrio
PP	polipropileno
PVA	álcool polivinílico
rpm	rotações por minuto
SKAT	<i>Swiss Center for Appropriate Technology</i>
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

S1	camada secundária externa da fibra
S2	camada secundária intermediária da fibra
S3	camada secundária interna da fibra
θ	ângulo de orientação
ρ	densidade (g/cm ³)
ε	deformação específica (mm/mm)
δ	flecha (deslocamento em mm)
k	condutividade térmica
σ	tensão (força / área)
P ₁	força máxima na região elástica
P	força máxima
b	largura na seção transversal dos corpos-de-prova
h	espessura (mm)
L _v	distância entre cutelos (mm)
dp ₁	desvio padrão aos 28 dias
dp ₂	desvio padrão após envelhecimento
C _{HCl}	concentração da solução padrão de HCl
C _{HCl2}	concentração da solução de HCl para V(2)
C _{NaOH}	concentração da solução padrão de NaOH
V(1) _{HCl}	volume de HCl de equivalência para titulação potenciométrica
V(2) _{HCl}	volume total de solução padrão de HCl
V _{NaOH}	volume de solução padrão de NaOH
n _{total}	o número de mols total de carbonatos e hidróxidos
n _{carbonatos}	número de mols dos carbonatos
n _{hidróxidos}	número de mols dos hidróxidos
V	tensão (V)
I	corrente dissipada através do fio quente (A)
L	comprimento do fio quente (m)
Ei	função exponencial integral da forma $\int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$
c	calor específico (J/kg.K)

t	tempo decorrido desde o início da liberação de calor (s)
ρ_g	massa específica volumétrica (kg/m ³)
d	distância radial até fonte de calor (m)
T	temperatura (K)
α_1	difusividade térmica (m ² /s)
y_{pqr}	variável observada no envelhecimento $\underline{r}$, na intensidade de refino $\underline{q}$ no tipo de fibra $\underline{p}$
μ	constante inerente a todas observações
p	tipo de fibra
q	intensidade de refino
r	envelhecimento
s	espessura
F_p	efeito fixo do tipo de fibra $\underline{p}$
R_q	efeito fixo da intensidade de refino (drenabilidade) $\underline{q}$
E_r	efeito fixo do envelhecimento $\underline{r}$
FR_{pq}	efeito da interação dupla do tipo de fibra $\underline{p}$ com a intensidade de refino $\underline{q}$
FE_{pr}	efeito da interação dupla do tipo de fibra $\underline{p}$ com o envelhecimento $\underline{r}$
RE_{qr}	efeito da interação dupla da intensidade de refino $\underline{q}$ com o envelhecimento $\underline{r}$
FRE_{pqr}	efeito da interação tripla do tipo de fibra $\underline{p}$ com a intensidade de refino $\underline{q}$ e com o envelhecimento $\underline{r}$
e_{pqr}	efeito residual associado às observações nas placas planas, no envelhecimento $\underline{r}$, na intensidade de refino $\underline{q}$ e no tipo de fibra $\underline{p}$
y_{prs}	variável observada no envelhecimento $\underline{r}$ dentro do tipo de fibra $\underline{p}$
$EF_{r(p)}$	efeito fixo do envelhecimento $\underline{r}$ dentro do tipo de fibra $\underline{p}$
b_1	coeficiente de regressão linear da característica y_{prs} em relação à espessura das telhas
h_{prs}	espessura da telha $\underline{s}$, em milímetros, observada no tipo de fibra $\underline{p}$ com o envelhecimento $\underline{r}$
$\bar{h}$	média das espessuras das telhas avaliadas
$e_{(rs)p}$	efeito aleatório residual associado às observações nas telhas, no envelhecimento $\underline{r}$ no tipo de fibra $\underline{p}$
α	nível de significância

SUMÁRIO

Lista de figuras

Lista de tabelas

Lista de abreviações e abreviaturas

Lista de símbolos

Resumo

Abstract

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Histórico do desenvolvimento de fibrocimento sem amianto	3
2.2. O papel das fibras na matriz cimentícia	5
2.2.1 <i>Mecanismos de tenacificação proporcionados pelas fibras</i>	6
2.3. Fibras vegetais.....	8
2.3.1 <i>Fibras de Sisal (Agave sisalana)</i>	12
2.3.2 <i>Produção da polpa celulósica (polpação Kraft)</i>	13
2.3.3 <i>Refino das fibras celulósicas</i>	14
2.4. Ligações e microestrutura dos compósitos reforçados com fibras.....	16
2.4.1 <i>Ligações químicas</i>	16
2.4.2 <i>Ligações mecânicas</i>	17
2.5. Durabilidade dos compósitos	18
2.6. Compósitos fibrosos para produção de elementos de cobertura	20
2.7. Métodos para melhorar a durabilidade dos compósitos.....	22
2.7.1 <i>Compósitos com reforço híbrido</i>	24
2.7.1.1 Fibras de polipropileno	25
2.7.2 <i>Cura em autoclave</i>	25
2.7.3 <i>Carbonatação acelerada</i>	27
2.8. Influência do material de cobertura no conforto térmico	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Planejamento dos experimentos.....	31
3.2. Fibras	33
3.2.1 <i>Fibras celulósicas</i>	33

3.2.1.1	Preparo e refino da polpa celulósica	33
3.2.2	<i>Fibras sintéticas</i>	35
3.3.	Matrizes cimentícias	36
3.3.1	<i>Matrizes cimentícias utilizadas para produzir os compósitos (placas planas)</i>	36
3.3.2	<i>Matrizes cimentícias utilizadas para produzir as telhas onduladas</i>	38
3.4.	Produção dos compósitos	39
3.4.1	<i>Moldagem das placas planas</i>	39
3.4.2	<i>Ajustes do equipamento de moldagem das telhas onduladas</i>	41
3.4.3	<i>Moldagem das telhas onduladas</i>	43
3.4.3.1	<i>Cura acelerada das telhas em autoclave</i>	46
3.5.	Envelhecimentos	47
3.5.1	<i>Envelhecimento acelerado</i>	47
3.5.1.1	<i>Carbonatação acelerada</i>	47
3.5.1.1.1	<i>Determinação por titulação potenciométrica dos teores de carbonatos</i> ...	48
3.5.1.2	<i>Imersão-secagem</i>	50
3.5.1.3	<i>Envelhecimento calor-chuva (C-C)</i>	51
3.5.2	<i>Envelhecimento Natural</i>	53
3.6.	Ensaio de caracterização	54
3.6.1	<i>Caracterizações físicas</i>	54
3.6.1.1	<i>Absorção de água (AA), Porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA)</i>	54
3.6.1.2	<i>Ensaio de permeabilidade à água</i>	55
3.6.1.3	<i>Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)</i>	56
3.6.2	<i>Caracterizações mecânicas dos compósitos - Tração na flexão</i>	56
3.6.2.1	<i>Caracterização mecânica das placas planas</i>	57
3.6.2.2	<i>Caracterização mecânica das telhas onduladas</i>	59
3.6.3	<i>Avaliação da Degradação - Fator R</i>	60
3.6.4	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i>	61
3.7.	Comportamento térmico	61
3.7.1	<i>Avaliação da condutividade térmica pela técnica do fio-quente paralelo</i>	61
3.7.2	<i>Avaliação das temperaturas da superfície inferior das telhas</i>	65
3.8.	Análises estatísticas	66
3.8.1	<i>Análises estatísticas dos resultados dos ensaios físicos e mecânicos das placas planas</i>	66

3.8.2 <i>Análises estatísticas dos resultados dos ensaios físicos e mecânicos das telhas onduladas</i>	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1. Refino e caracterização das fibras.....	69
4.2. Resultados dos ensaios físicos dos compósitos (placas)	75
4.2.1 <i>Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)</i>	78
4.3. Resultados dos ensaios mecânicos das placas planas	81
4.3.1 <i>Efeito do refino da polpa de sisal nas placas planas</i>	81
4.3.2 <i>Efeito do uso de fibras de polipropileno</i>	91
4.3.2.1 Fator R para placas planas	95
4.4. Resultados relativos às telhas onduladas	97
4.4.1 <i>Resultados das propriedades físicas para telhas onduladas</i>	97
4.4.1.1 Permeabilidade à água.....	99
4.4.2 <i>Resultados mecânicos das telhas onduladas</i>	100
4.4.2.1 Efeito da cura acelerada em autoclave	107
4.4.2.2 Efeito da carbonatação acelerada	108
4.4.2.3 Fator R para telhas onduladas	111
4.5. Comportamento térmico.....	112
4.5.1 <i>Condutividade térmica pelo método do fio-quente paralelo</i>	112
4.5.2 <i>Comparação das temperaturas da superfície inferior de diferentes telhas</i> ..	114
5. CONCLUSÃO	118
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	120
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

1. INTRODUÇÃO

Fibras naturais como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios têm despertado grande interesse nos países em desenvolvimento pelo seu baixo custo, disponibilidade, economia de energia, e também no que se refere às questões ambientais (MACVICAR; MATUANA; BALATINECZ, 1999). Segundo Swamy (1980), o emprego dos compósitos em placas, telhas de cobertura e componentes pré-fabricados, pode representar significativa contribuição para a infraestrutura desses países.

Nos países desenvolvidos, o uso de fibrocimentos que utilizam polpa celulósica 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, 2005).

O Fibre Composites Group do Forestry and Forest Products (FFP), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Austrália, aparece como instituição de pesquisa precursora no estudo de materiais cimentícios reforçados com polpas de celulose, comercializados a partir do início da década de 80 (COUTTS, 1986).

Em diversos países, inclusive no Brasil, há uma crescente tendência de rever a utilização do amianto crisotila, especialmente no reforço de matrizes de cimento, que ainda representa em torno de 74% do fibrocimento produzido anualmente na América do Sul e Central, principalmente para elementos de cobertura (HEINRICKS et al., 2000). Como suporte para essa tendência, alegam-se graves problemas de saúde, com incidência preocupante, sobretudo nos trabalhadores da indústria da construção (GIANNASI; THÉBAUD-MONY, 1997; HARRISON et al., 1999).

O fato de o Brasil ser um dos maiores produtores de fibras naturais demonstra a grande expectativa em se adaptar o seu uso para reforço em matrizes cimentícias como uma alternativa ao uso das fibras de amianto. Porém, alguns aspectos ainda permanecem pouco esclarecidos, como por exemplo, a durabilidade dessas fibras em meio alcalino.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é o estudo de telhas onduladas a partir de processo automatizado em pequena escala de produção, à base de fibrocimento sem amianto com desempenho comparável ao proposto pelas normas vigentes, e com ênfase no emprego conjunto da matéria-prima celulósica e sintética como reforço da matriz de cimento.

Quanto aos objetivos específicos, tem-se:

- Caracterização e preparo de matérias-primas da matriz cimentícia e do reforço fibroso (fibras sintéticas e estudo da influência da intensidade de refino da polpa celulósica);
- Avaliação da cura acelerada em autoclave, e da carbonatação acelerada nas telhas;
- Avaliação da durabilidade dos compósitos fibrosos e das telhas desenvolvidas após envelhecimentos acelerados;
- Estudo do comportamento térmico das telhas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Histórico do desenvolvimento de fibrocimento sem amianto

Um dos equipamentos mais utilizados para a produção de chapas de fibrocimento é o Hatschek, desenvolvido a partir de uma máquina cilíndrica para produção de papel, como ilustra a Figura 1. Uma suspensão bem diluída de fibras, de cimento e de outros aditivos, é misturada em um grande tanque onde cilindros rotatórios captam essa pasta através de sucção, removendo a água da mistura até a obtenção de placas com a espessura desejada (formada por lâminas de aproximadamente 1 mm).

Figura 1 – Esquema do processo Hatschek para produção de fibrocimento (COUTTS, 1988)

James Hardie e Coy Pty Ltda tiveram um grande interesse no uso de celulose como um substituto econômico ao amianto, em fibrocimentos reforçados com fibras, no início dos anos 40. Este trabalho foi intensificado durante os anos seguintes à Segunda Guerra Mundial, quando houve escassez de fibras de amianto. Uma investigação foi conduzida em Camélia, NSW, pela Heath and Hackworthy (JAMES HARDIE E COY PTY LTDA, 1947) para descobrir se polpa de papel poderia ser usada para substituir amianto completamente ou parcialmente em placas de cimento amianto. Dentre as fontes de fibras estudadas, estavam bagaço de cana, madeiras

nativas, palha de trigo, sacos de cimento e papel não branqueado. Experimentos com placas autoclavadas mostraram que o melhor resultado foi obtido com o papel não branqueado (*Kraft*), que forneceu grande resistência ao material compósito. Entretanto, quando o suprimento de amianto foi restaurado, este trabalho foi interrompido.

O interesse pelas fibras vegetais renovou-se quase inadvertidamente em 1960 (GREENWOOD, 1983; SEACH, 1987). James Hardie foi considerado o único grupo no mundo que naquela época autoclavava suas placas. Para fazer um painel barato como uma alternativa, placas foram feitas com a metade do amianto substituído por fibras de madeira. Foi verificado, entretanto, que este material apresentou melhores resultados que o produto antes comercializado somente reforçado com amianto, sendo mais fácil para fixar e cortar e melhor conformação e uniformidade (COUTTS, 2005).

Em 1982 o governo e as indústrias alemãs concordaram em reduzir o consumo de amianto em 30 a 50% antes de 1986 e, em 1984, já negociavam para que todos os materiais de construção fossem livres de amianto em 1990. Desde 1988, dois produtores de fibrocimento na Alemanha, Eternit e Fulgurit, receberam aprovação para produzir telhas grandes, livres de amianto, com pressão e cura ao ar. Infelizmente, na Alemanha o governo subsidiou as coberturas de metal em detrimento das indústrias de fibrocimento. Esta pode ter sido a possível causa da Fulgurit fechar a planta em Wunstorf, onde se vinha produzindo fibrocimentos reforçados com fibras de madeira (COUTTS, 2005).

A Austrália foi o primeiro país no mundo a usar tecnologia totalmente livre de amianto na produção de fibrocimento (Nova Zelândia adotou esta tecnologia imediatamente). As indústrias James Hardie vêm produzindo fibrocimento sem amianto desde 1981 (ANON, 1981); produtos moldados e tubulações sem amianto vêm sendo produzidos desde 1987. O sucesso da tecnologia de James Hardie tem animado outros dois produtores de produtos cimentícios reforçados com fibras naturais a começar operações na Austrália: BGC Fibre Cements e CSR Fibre Cements. James Hardie tem fornecido sua tecnologia de produção sem amianto para Nova Zelândia, Ásia, América do Norte e recentemente para América do Sul (COUTTS, 2005).

No começo de 1970, esforços globais foram iniciados com legislações para remoção do amianto como reforço em uma grande gama de produtos. O mercado de

fibrocimento é o maior usuário de amianto e, por este motivo, nesta classe de materiais de construção, novas alternativas de fibras para reforço estão sendo procuradas para a substituição do amianto (COUTTS, 2005). Ao longo das últimas três décadas, pesquisas consideráveis têm sido executadas com o objetivo de encontrar uma fibra alternativa em substituição ao amianto em produtos de fibrocimento no Brasil (AGOPYAN; SAVASTANO JÚNIOR, 1997; JOHN; AGOPYAN, 1993; SAVASTANO JÚNIOR; DANTAS; AGOPYAN, 1994). Técnicas alternativas de produção e processamento dos compósitos também vêm sendo desenvolvidas pelo laboratório de construções e ambiência do departamento de Engenharia de Alimentos da FZEA – USP (DEVITO, 2003; PIMENTEL, 2000; SAVASTANO JÚNIOR et al., 1999; SAVASTANO JÚNIOR, 2002).

2.2. O papel das fibras na matriz cimentícia

Normalmente, o concreto contém numerosas fissuras. A rápida propagação de fissuras sob tensão aplicada é consequência da baixa resistência à tração do material. Inicialmente, foi considerado que as resistências à tração na flexão do concreto podiam ser aumentadas substancialmente, pela introdução de fibras próximas umas das outras, as quais poderiam obstruir a propagação de microfissuras, retardando, portanto, o início das fissuras e aumentando a resistência à tração do material. Estudos experimentais, porém, mostraram que determinadas argamassas ou concretos convencionais reforçados com fibras não oferecem melhora substancial na resistência mecânica comparados às correspondentes misturas sem fibras. Entretanto, pesquisadores obtiveram considerável melhora na energia específica, criando possibilidade de trabalho no estágio pós-fissurado (Figura 2) e conferindo isolamento termo-acústico aceitável (AGOPYAN; SAVASTANO JÚNIOR, 1997). Fica claro que o advento do reforço com fibras aumenta a versatilidade da argamassa como um material, propiciando um método efetivo para superar suas características de fragilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Figura 2 – Representação esquemática do comportamento à flexão de um compósito sem fibras e um reforçado com fibras (MEHTA; MONTEIRO, 1994)

Mangat e Azari (1988) e Balaguru e Shah (1992) ressaltaram o reforço de matrizes à base de cimento com fibras para combater retração plástica por secagem. A retração plástica ocorre nas primeiras horas após a moldagem, em decorrência da evaporação diferenciada, ao longo do produto, da água empregada na produção. Os efeitos desse tipo de retração são mais evidentes em componentes com áreas grandes de exposição.

Sabe-se que compósitos de fibrocimento apresentam maiores energias específicas, ductilidade, capacidade de flexão e resistência à fratura quando comparados a materiais não fibro-reforçados. Fibras de polpa celulósica são o único material de reforço que oferece inúmeras vantagens. Elas são não-tóxicas, renováveis e disponíveis a relativo baixo custo quando comparadas a outras comercialmente disponíveis (MACVICAR; MATUANA; BALATINECZ, 1999). Compósitos de fibrocimento com polpa podem ser encontrados em produtos comerciais como caixas d'água e materiais de construção não estruturais, principalmente produtos em folhas finas, como telhas de cobertura (ACI544.1R, 1996).

2.2.1 Mecanismos de tenacificação proporcionados pelas fibras

Compósitos convencionais sem fibras rompem repentinamente, com um comportamento frágil (Figura 3a), quando a deformação correspondente à resistência à tração na flexão for superada. Por outro lado, um material reforçado

com fibras continua a resistir a cargas consideráveis (Figura 3b), mesmo com deformações bastante superiores à deformação de fratura do compósito convencional (MEHTA; MONTEIRO, 1994), originando grandes energias específicas (Figura 3c).

Figura 3 – Diagramas tensão x deformação. (a) Comportamento frágil; (b) comportamento dúctil: 1 - módulo de ruptura e 2 - limite de proporcionalidade; (c) área hachurada sob a curva indica a energia específica do material (adaptado de Mehta e Monteiro, 1994).

Durante o carregamento do material, a tensão necessária para o aparecimento da primeira fissura (final da fase elástica - Figura 3b – ponto 1) costuma aumentar com a aderência e, ainda, com a relação comprimento/diâmetro e concentração de fibras (GRAY, 1984). O compósito suportará cargas cada vez maiores, após o limite de proporcionalidade (LOP), se a resistência das fibras ao arrancamento na primeira fissura for maior do que a carga na primeira fissuração (módulo de ruptura - Figura 3b – ponto 2); em uma seção fissurada, a matriz não resiste a nenhuma tração e as fibras suportam todo o carregamento do compósito (após MOR) .

Com um aumento de carga no compósito, as fibras tendem a transferir a tensão adicional para a matriz, através das tensões de aderência. Se essas tensões de aderência não excedem a resistência de aderência, pode haver um descolamento fibra-matriz e fissurações adicionais na matriz (Figura 4 – pontos 1 e 2). Este processo de fissuração múltipla continuará até que haja o seu arrancamento (Figura 4 – ponto 3), devido à perda de aderência local acumulada; caso contrário, a partir do momento em que o escorregamento da fibra é substituído pela sua ruptura (Figura 4 - ponto 4), ocorre a redução da ductilidade (SHAH, 1984).

Figura 4 – Representação esquemática do caminhamento da fissura através da matriz reforçada com fibras: (1) e (2) descolamento da fibra; (3) arrancamento da fibra; (4) rompimento da fibra (COUTTS, 1988).

O tipo, a distribuição, a relação comprimento-diâmetro, a durabilidade da fibra e a umidade assim como o seu grau de aderência com a matriz determinam o comportamento mecânico do compósito e o desempenho do componente fabricado (BARTOS, 1981; BENTUR, 1989; GRAY; JOHNSTON, 1987).

A energia específica ou tenacidade é uma propriedade importante para telhas, pois é a avaliação da resistência ao impacto, o que evitaria a ruptura frágil durante o transporte ou durante a instalação devido aos esforços dinâmicos envolvidos (AGOPYAN et al., 2005). Busca-se, assim, a situação ótima em que se compatibilizam energias específicas elevadas e resistências aceitáveis.

2.3. Fibras vegetais

A escolha das fibras de polpa de madeira como preferidas na substituição do amianto em fibrocimentos não foi por acaso. Deve-se lembrar que durante a década de 70, fibrocimentos reforçados com fibra de vidro foram aclamados como a primeira alternativa para cimentos reforçados com amianto (HANNANT, 1978). Também fibras de aço, uma gama de fibras sintéticas poliméricas e outras fibras naturais

fizeram parte de várias pesquisas em muitos países (HODGSON, 1985).

Entre os diversos tipos de fibra, as vegetais têm sido muito estudadas, principalmente para reforço de componentes para construções de interesse social, em virtude do seu baixo custo, ao serem empregadas na própria região de origem, ou como rejeitos de outras aplicações (SAVASTANO JÚNIOR, 1992). Por outro lado, o desempenho delas em matrizes frágeis tem sido insatisfatório, por necessitarem aumento de aderência com a matriz e melhoria da durabilidade em presença de meio alcalino e de umidade. O estudo da estrutura da interface fibra-matriz tem importante papel no desenvolvimento dos compósitos fibrosos, para que o seu comportamento mecânico se torne ótimo.

Segundo Savastano Júnior (1992), 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. A Figura 5 ilustra esquematicamente a secção transversal do aglomerado de células de fibras vegetais e serve para interpretar tanto fibras de madeiras como não-madeiras. A estrutura de uma célula individual é apresentada na Figura 6, mostrando as camadas de microfibrilas que formam a parede celular. As microfibrilas são compostas por moléculas orientadas de celulose, polímero vegetal de cadeias longas (grau de polimerização da ordem de 25000), e estão aglomeradas por hemicelulose amorfa (grau de polimerização entre 50 e 200).

As células da fibra têm de 10 a 25 μm de diâmetro e, segundo Gram (1988), são compostas por quatro camadas de microfibrilas:

- (i) Camada primária, mais externa, de estrutura reticulada, com grande conteúdo de hemicelulose;
- (ii) Camada secundária S1, onde as microfibrilas estão orientadas em espiral segundo um ângulo de aproximadamente 45° , com relação ao eixo longitudinal da célula;
- (iii) Camada secundária S2, também com as microfibrilas em forma de espiral (18°); e
- (iv) Camada secundária S3, mais interna, reticulada.

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 secção elíptica, com dimensão de 5 a 10 μm , denominada lúmen. As diversas células que compõem a fibra encontram-

se aglomeradas pela lamela intercelular ou lamela média, composta de hemicelulose, pectina e, principalmente, lignina (70% em média). A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade que se chama lacuna.

Figura 5 – Seção transversal de fibra de sisal (aglomerado de células) – (adaptado de NUTMAN, 1937).

Figura 6 – Esquema da estrutura das células de fibra vegetal. (adaptado de GRAM, 1988; e ILLSTON; DINWOODIE; SMITH, 1979).

Em consequência da grande incidência de poros permeáveis, que incluem as lacunas e os lúmens, as fibras vegetais apresentam grande absorção de água (30 a 400%) e massa específica aparente bastante inferior à real, como se observa na Tabela 1.

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas das fibras.

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
Polpa celulósica (<i>Pinus eliotti</i>)	1200 a 1500	400,0	nd	300 a 500	10 a 40
Polpa celulósica kraft (<i>Pinus radiata</i>)	1500	nd	nd	500	nd
Polpa celulósica TMP (<i>Pinus radiata</i>)	500	nd	nd	125	nd
Bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>)	1158	145,0	3,2	73 a 505	5,1 a 24,6
Juta (<i>Corchorus capsularis</i>)	nd ^a	214,0	3,7 a 6,5	230	nd
Piaçava (<i>Attalea funifera</i>)	1054	34,4 a 108,0	6	143	5,6
Banana (<i>Musa cavendishii</i>)	1031	407,0	2,7	384	20 a 51
Cânhamo (<i>Cannabis sp</i>)	1500	85,0 a 105,0	nd	900	34
Amainto crisotila	2200 a 2600	nd	2	560 a 750	164
Polipropileno	913	nd	22,3 a 26,0	250	2,0

FONTES: Agopyan e Savastano Júnior (1997); Beaudoin (1990); Campbell e Coutts (1980); Li, Wang, Wang (2005); Nolasco, Soffner, Nolasco (1998); Swamy (1988).

^a nd = informação não disponível

A resistência e outras propriedades do material fibroso em células individuais pode ser maior do que aquelas da fibra inteira e isso muito vezes causa confusão nos dados reportados na literatura. Curvas tensão-deformação para fibras mostram deformações totais de 1-5%, que podem ser muito maiores do que da matriz. As condições de umidade têm um efeito considerável nas propriedades mecânicas. Fibras secas normalmente apresentam uma curva tensão-deformação linear e fratura frágil, enquanto que fibras úmidas ou molhadas podem apresentar deformações maiores e redução no módulo de elasticidade (MAI; HAKEEM, 1984).

Fibras vegetais de plantas fibrosas (não-madeiras) constituem matéria-prima abundante e de baixo custo em muitos países em desenvolvimento (GUIMARÃES, 1990). Muitas fibras apresentam potencial para utilização como reforço em materiais compósitos. O sucesso em muitos campos de aplicação pode influenciar a escolha de métodos de produção e aproveitar o ótimo desempenho das fibras celulósicas (COUTTS, 1992).

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.

2.3.1 Fibras de Sisal (*Agave sisalana*)

As plantas de sisal (Figura 7a) são nativas das regiões tropicais e subtropicais da América do Norte e do Sul, e são amplamente cultivadas em países tropicais da África, Índia e extremo oriente (BISANDA; ANSELL, 1992). São facilmente cultivadas e crescem rápida e naturalmente nos campos (CHAND, 1988). Atualmente, em torno de 300 mil toneladas de fibras de sisal são produzidas todos os anos no mundo (FAOSTAT, 2005). O Brasil e a Tanzânia são os principais países produtores.

As fibras de sisal são extraídas das folhas. Um esquema demonstrando as dimensões aproximadas da planta e das folhas está apresentado na Figura 7b. A planta de sisal produz em torno de 200 – 250 folhas e cada folha contém em torno de 1000 – 1200 feixes de fibras, compostos por 4% de fibras, 0,75% de cutícula, 8% de matéria seca e em torno de 88% de água (MURHERJEE; SATYANARAYANA, 1984). Normalmente uma folha pesa 600 g e um rendimento em fibras de 3% do peso.

(a)

(b)

Figura 7 – a) Planta de sisal (*Agave sisalana*); b) representação da parte útil da planta para produção das fibras (adaptado de LI; MAI; YE, 2000).

2.3.2 Produção da polpa celulósica (polpação Kraft)

Fibras celulósicas individualizadas podem ser obtidas dos vegetais por processos de polpação. Essas polpas processadas quimicamente são tipos dominantes usados na produção de produtos cimentícios como placas finas em países desenvolvidos, principalmente pela compatibilidade com o processo Hatschek (BENTUR; MINDESS, 1990).

Sob o ponto de vista técnico, o termo polpa de celulose compreende o resíduo fibroso proveniente da deslignificação parcial ou total da matéria-prima vegetal empregada. A preparação das fibras é conseguida por meio de produtos químicos que agem principalmente sobre a lignina. Essa deslignificação inicial recebe o nome de cozimento ou digestão, conduzido sob determinadas condições de temperatura, tempo e composição do licor. O processo alcalino mais utilizado na preparação das fibras é o *Kraft*, que tem como agentes deslignificadores o hidróxido de sódio e o sulfeto de sódio. A celulose produzida por esse processo contém quantidades negligenciáveis de lignina e é esperado que sofra menor ataque alcalino do cimento (BENTUR; AKERS, 1989).

Considerando a aplicabilidade das fibras celulósicas bem como outras fibras naturais, para reforço em matrizes cimentícias, os potenciais efeitos deletérios de certos tipos de fibras devem ser levados em conta. A hidratação e a cura da matriz cimentícia podem ser retardadas por vários componentes orgânicos, em particular os açúcares e a lignina presentes nas fibras. Neste ponto de vista, fibras produzidas pela polpação alcalina podem apresentar vantagens (BENTUR; MINDESS, 1990). O Instituto Americano do Concreto (ACI 544, 1996) recomenda o uso de fibras de polpa *Kraft* como reforço em materiais cimentícios, já que grande parte da lignina e hemiceluloses, menos resistentes à alcalinidade do que a celulose, são retiradas durante o processo de polpação (MOHR; NANKO; KURTIS, 2005).

Embora as fibras de polpa de madeira sejam consideradas apropriadas, elas são razoavelmente caras. Muitas pesquisas foram conduzidas com métodos alternativos de produção de fibras de polpa de madeira (químicos, mecânicos e várias combinações), estendendo assim a variação de fibras naturais adequadas ao reforço de produtos cimentícios (CAMPBELL; COUTTS, 1980; COUTTS, 1984).

2.3.3 Refino das fibras celulósicas

Refino pode ser definido como o tratamento mecânico da polpa na presença de água, normalmente pela passagem da suspensão da polpa fibrosa através de vãos relativamente estreitos entre um disco giratório e um estacionário (BRITT, 1970; CLARK, 1987). Antes do uso das polpas como reforço, pode ser empregada tanto a dispersão como o refinamento da polpa, para adequação da fibra à formação de estrutura reticulada e homogênea, no interior da matriz. Nos processos 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 método Hatschek), com posterior drenagem por sucção da água, a rede formada pelas fibras é crucial para a retenção das partículas de cimento e evita estratificação e perdas de material (COUTTS, 1984).

A Figura 8 é uma representação da seqüência envolvida durante o refino de uma fibra celulósica. Um efeito do refino é a fibrilação externa, que pode facilmente ser observada por microscopia eletrônica de varredura. As fibrilas ou lamelas fibrilares agregadas à superfície da fibra podem variar muito em dimensões e forma. Nesse primeiro estágio do refino (ponto 1 da Figura 8), camadas superficiais de fibrilas são arrancadas parcialmente (principalmente a camada primária da fibra). Com a continuação desse processo de fibrilação externa, o arrancamento das fibrilas da superfície da fibra dá início à formação de finos (ponto 2 da Figura 8).

Entre os principais efeitos do refino está a fibrilação interna, que pode ser considerada concomitante à fibrilação externa. Os efeitos da fibrilação interna são dificilmente observados somente com microscópio, mas podem ser considerados por analogia como um pedaço de corda. Quando se torce uma corda na direção do emaranhado helicoidal, a corda se torna rígida; caso contrário, se torcer na direção oposta, a corda desenrola abrindo a estrutura e se tornando frouxa, semelhante ao caso com fibrilação interna. O principal efeito da fibrilação interna é o aumento da flexibilidade da fibra e inchamento (ponto 3 da Figura 8). As fibras podem também se tornar excessivamente enroladas e retorcidas (COUTTS, 2005).

Encurtamento da fibra é o outro efeito atribuído ao refino e pode ser evitado, utilizando-se intensidades intermediárias de refino (COUTTS; NI, 1995). Um indicativo de que o encurtamento está ocorrendo é a mudança observada na

distribuição do tamanho das partículas, que é um resultado da ação de corte dos discos nas fibras individualizadas (ponto 4 da Figura 8).

Figura 8 – Representação do processo de fibrilação durante o refino de uma fibra: (1) fibrilação externa; (2) formação inicial de finos; (3) Fibrilação interna e inchamento; (4) corte e encurtamento da fibra (RODRIGUES, 2001).

O refino tem uma importante função na produção de grande área de superfície para fibra-fibra ou fibra-matriz (COUTTS; KIGHTLY, 1984). O refino afeta as propriedades hidráulicas das fibras e efetivamente reduz o diâmetro médio. Esta mudança afeta a tendência de floculação da mesma capturando as partículas equidimensionais de cimento, sílica ativa, etc. O menor diâmetro efetivo permite boa formação de filme na máquina Hatschek e isto é que distingue fibras de polpa celulósica das fibras sintéticas (COUTTS, 1984). Fibras sintéticas são de ordem de grandeza maior em diâmetro do que fibras celulósicas e, portanto, não podem por elas mesmas formar filmes e capturar as partículas. Esta é uma das principais vantagens das fibras vegetais comparadas com fibras sintéticas como vidro, aço, etc., e o fator chave no sucesso destas fibras naturais na substituição do amianto enquanto usando o processo Hatschek de produção (COUTTS, 2005).

Mudanças observadas na estrutura da fibra como resultado da ação mecânica no material fibroso dependem do tipo de refinador, condições de refino usadas, tipo de fibra (folhosas, coníferas e não madeiras) e tipo de polpa (mecânica e química).

2.4. Ligações e microestrutura dos compósitos reforçados com fibras

De acordo com a teoria dos compósitos, a interface (que é a região de íntimo contato entre a fibra e a matriz) desenvolve uma função importante na transmissão da tensão entre as duas fases, no aumento da energia de fratura do compósito e no deslocamento das fissuras. A ligação interfacial pode ser química, física ou uma combinação entre elas. Ligações muito fortes entre fibras e matriz resultam em um material frágil com grande resistência, enquanto ligações fracas resultam em menores resistências e altas energias específicas. O desempenho mecânico do compósito está diretamente relacionado com as propriedades da interface fibra-matriz (COUTTS, 1988; SAVASTANO JÚNIOR, 1992).

A zona de transição mostra-se de forma diferenciada do restante da matriz, por sua maior porosidade, concentração de macrocristais de portlandita (CaOH_2) e microfissuras. Essas características, que podem apresentar-se com diferentes intensidades, estão diretamente ligadas à aderência fibra-matriz e, conseqüentemente, ao desempenho mecânico do compósito. O aumento da aderência faz com que se torne maior a resistência à tração do compósito e também a sua ductilidade, desde que não haja redução excessiva do comprimento crítico de ancoragem da fibra (SAVASTANO JÚNIOR, 1992). A redução da porosidade e da concentração de portlandita (CaOH_2) são apresentadas por Massazza e Costa (1986) como os principais indicadores para modificação da zona de transição.

A idade do compósito também deve ser levada em conta, por influenciar a porosidade e os produtos de hidratação que se formam na interface. Para as idades mais avançadas, também é importante a análise de degradação das fibras vegetais e sua relação com a presença de portlandita (CaOH_2).

2.4.1 Ligações químicas

Sabe-se que o cimento é extremamente alcalino ($\text{pH} > 12$) e apresenta grupos metal-hidroxila como $-\text{Ca}-\text{OH}$, $-\text{Si}-\text{OH}$, $-\text{Al}-\text{OH}$ e $-\text{Fe}-\text{OH}$ (devido à hidratação e

hidrólise). As fibras celulósicas contêm grupos hidroxílicos covalentes, $-C-OH$, e também fenólicos (da lignina residual) ou alcoólicos (dos componentes da celulose), bem como grupos carboxílicos, $-COOH$, pela oxidação das extremidades. Pontes de hidrogênio que podem ser formadas entre fibras e entre fibras e matriz são as principais ligações nos compósitos reforçados com fibras (COUTTS, 1988).

Soroushian e Marikunte (1992) reportaram o efeito da umidade no desempenho mecânico de fibrocimentos com fibras celulósicas e mostraram que, quando se aumenta a umidade nos compósitos, a resistência à flexão diminui e a energia específica é incrementada. Esses resultados podem ser suportados pela hipótese de que as pontes de hidrogênio são as principais ligações e responsáveis pelo desempenho mecânico (COUTTS; KIGHTLY, 1982, 1984).

Em compósitos secos, grande número de pontes de hidrogênio são encontradas na interface entre as duas fases e, durante a aplicação da força, ocorre a transferência da tensão para as fibras, ocasionando sua fratura, já que estão bem aderidas à matriz. Já com umidade, as pontes de hidrogênio entre as fibras e entre fibra-matriz são quebradas pela inserção de moléculas de água entre ligações dos grupos hidroxílicos. Além disso, como as fibras estão inchadas pela presença de água, energias consideráveis ocorrem com o atrito durante arrancamento dessas fibras (COUTTS, 1988).

2.4.2 Ligações mecânicas

Segundo Coutts (1988), a forma das fibras (cilíndricas, contorcidas, achatadas, etc.), a rugosidade e a fibrilação são aspectos relacionados às ligações físicas. Esses aspectos influenciam as energias de fratura da fibra e de atrito no arrancamento da fibra. Tratamentos mecânicos, como o refino das fibras (seção 2.3.3), aumentam os pontos de ancoragem na matriz e conseqüentemente o número de ligações físicas. Sabe-se também que o emprego de fibras de perfil irregular chega a conferir acréscimos de até 10% para a resistência à tração do compósito, ao ser comparada com resistência obtida com fibras retas e lisas (MASSAZZA; COSTA,

1986). Efeitos semelhantes foram obtidos por Savastano Júnior (1992), quer seja pela fibrilação, no caso das fibras de amianto, quer pela variação do diâmetro ao longo do comprimento, para as fibras vegetais.

Morrissey, Coutts e Grossman (1985) estudaram o comprimento crítico (comprimento acima do qual as fibras rompem antes de escorregar) para fibras vegetais em matriz de pasta de cimento. Concluíram que a resistência de aderência das fibras não é proporcional ao comprimento de ancoragem e depende, sobretudo, de pontos localizados onde a aderência é maior. Considera-se, assim, comprimento crítico não como aquele em que a tensão de atrito distribuída uniformemente na superfície da fibra se iguala à sua resistência à ruptura, mas sim como o comprimento em que se torna maior a probabilidade de ocorrência de ancoragem localizada e de alta resistência ao cisalhamento. Pode-se atribuir esse comportamento à descontinuidade da zona de transição entre fibra e matriz, que apresenta variações quanto à constituição, porosidade, espessura e ainda descolamentos ao longo do comprimento da fibra.

Como consequência de sua estrutura, as fibras vegetais apresentam elevada capacidade de absorção de água e inchamento. Isso faz reduzir a resistência da fibra e a aderência dela com a matriz, o que permite maior deslizamento entre as fases. Para combater esse tipo de comportamento, Coutts e Warden (1992) sugeriram que o compósito seja moldado sob pressão, com a consequente redução da relação água-cimento. Uma vez retirada a pressão, a fibra porosa devolve à matriz parte da água por ela absorvida, o que ajuda a manter a interface mais densa.

2.5. Durabilidade dos compósitos

A água geralmente está envolvida em toda forma de deterioração e, em sólidos porosos, a permeabilidade do material à água habitualmente determina a taxa de deterioração (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Há evidências de que as fibras sofrem alterações no seu desempenho mecânico, em conjunto com a matriz, dependendo da idade do compósito e das condições de exposição. Em particular, na presença de umidade, o gradual

preenchimento do núcleo da fibra com produtos hidratados e a densificação da matriz ao redor das fibras podem gerar fragilidade da fibra sob *stress* e provocar a fragilização dos compósitos (BENTUR; AKERS, 1989). Este fenômeno, no caso de polpas com baixas concentrações de lignina, pode causar o aumento da resistência à flexão e módulo de elasticidade do compósito, enquanto reduz sua energia específica (SOROUSHIAN; MARIKUNTE, 1992).

Muitas tentativas de produção de argamassas ou pastas de cimento Portland comum reforçadas com fibras vegetais fracassaram, por apresentarem vida útil entre 2 a 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 aproximadamente igual a 13, que leva à rápida decomposição da lignina e da hemicelulose presentes nas fibras. No caso dos países tropicais, a elevação da temperatura ambiente provoca sensível aceleração na velocidade de degradação.

A durabilidade é diminuída, como uma consequência da redução da resistência e energia específica (AKERS; STUDINKA, 1989). Esse comportamento está associado com o aumento da resistência da fratura da fibra e redução do arrancamento devido à combinação do enfraquecimento das fibras pelo ataque alcalino, à mineralização da fibra e à variação do volume causada por sua alta absorção de água (TOLÊDO FILHO et al., 2000).

A degradação dos compósitos pode ser estudada por envelhecimento natural, mais confiável, ou por ensaios acelerados, cuja vantagem é a de fornecer resultados em menor intervalo de tempo (SAVASTANO JÚNIOR, 1992). Soroushian e Marikunte (1992) testaram, por meio de 120 ciclos de umedecimento e secagem acelerados, a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras de celulose. Constataram a redução da energia específica dos compósitos, provavelmente pela "petrificação" das fibras. Sabe-se também que a alternância entre molhagem e secagem é favorável à degradação e posterior lixiviação da lignina, presente na estrutura das fibras vegetais, o que pode reduzir ainda mais a atuação dessas fibras como reforço no interior da matriz. A água capilar, por ter alcalinidade elevada, dissolve a lignina e a hemicelulose, elementos responsáveis pela aderência entre fibrilas (GRAM, 1983).

Bentur e Akers (1989) estudaram a evolução da zona de transição em compósitos à base de cimento com fibras de celulose e registraram a ocorrência do

aumento de porosidade e do acúmulo de CaOH_2 já nas primeiras idades. Em seguida, foram empregadas diversas condições de envelhecimento e constatou-se a "petrificação" das fibras, cujos vazios internos teriam sido preenchidos por produtos de hidratação do cimento, sob condições propícias de carbonatação. Como conclusão do trabalho, constataram a redução da energia específica do compósito após o seu envelhecimento, com predominância de quebra das fibras.

Em pesquisas utilizando-se fibras vegetais em fibrocimento, Savastano Júnior, Warden e Coutts (2003) avaliaram o desempenho de fibrocimento produzido pelo processo Hatscheck, com polpas de materiais alternativos como sisal, fibras de banana e polpa residual de eucalipto. Os resultados indicaram que o desempenho mecânico dos compósitos estudados foi satisfatório, mas colocam que uma otimização da formulação e parâmetros de processo devem ser investigados.

2.6. Compósitos fibrosos para produção de elementos de cobertura

Produtos de cimento amianto apresentam vital importância para a indústria de construção de baixo custo, especialmente para coberturas (LEE, 2000). Segundo o Instituto Brasileiro do Crisotila (2005), o mercado brasileiro de telhas e caixas d'água de fibrocimento com amianto é um dos maiores do mundo, com um consumo anual superior a 160 milhões de metros quadrados em telhas e 1,5 milhão de unidades de caixas d'água.

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 muitas vezes 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 alternativas (COUTTS; WARDEN, 1992). Por fim, outra preocupação é a durabilidade dos produtos, bem como sua compatibilidade à vida útil dos demais

componentes das construções destinadas a populações de baixa renda.

Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com elementos de cobertura à base de cimento reforçados com fibras vegetais, obtendo-se resultados aceitáveis nas idades iniciais, porém o envelhecimento desses materiais provocou drásticas reduções no desempenho mecânico desses componentes (AGOPYAN et al., 2005; LEAL; NASCIMENTO; BARBOSA, 2004). Na maioria dos casos essa queda no desempenho pode ser explicada pelo fato de usarem fibras não individualizadas, com grande presença de lignina e facilmente degradadas pela matriz cimentícia. Outro enfoque importante é o efeito inibitório na hidratação do cimento provocado pela lignina, que compromete a aderência das fibras à matriz cimentícia.

Gram (1988) estudou o emprego de argamassa de cimento reforçada com fibras de sisal, em componentes de cobertura. Notou que as condições de exposição natural são muito mais agressivas na Tanzânia que na Suécia, em virtude da temperatura e umidade elevadas que ocorrem no primeiro caso.

Utilizando em torno de 7% em massa de resíduo de *Pinus caribaea* e Cimento Portland CPV-ARI, Pimentel (2000) produziu telhas, por processo de adensamento em mesa vibratória (equipamento desenvolvido pela empresa Parry Associates – Reino Unido), e obteve resultados de força máxima aos 28 dias compatíveis com a referência sem fibras, demonstrando ser 124% superior à referência para a energia absorvida. Devito (2003), também utilizando adensamento por vibração com o mesmo equipamento, avaliou telhas reforçadas com 5% (em massa) de polpa *Kraft* residual de *Eucaliptus grandis* (95% de Cimento Portland). O pesquisador notou então uma queda de 37% para força máxima e de 50% para energia total após envelhecimento natural de 1 ano. No mesmo experimento, com o mesmo nível de reforço, mas variando a matriz cimentícia (88% de EAF), observou redução de 47% na força máxima e 65% na energia total após envelhecimento de 1 ano. A perda da resistência das telhas à base de escória foi também observada por outros pesquisadores como Savastano Júnior (2000).

Roma Júnior (2004), também com adensamento por vibração, produziu telhas reforçadas com polpa *Kraft* de sisal que apresentaram, após 155 dias de envelhecimento, resistências abaixo dos valores recomendados por Gram e Gut (1994) com redução de até 55% no valor de força máxima na ruptura. O autor atribuiu esse decréscimo das propriedades mecânicas à degradação das fibras vegetais, que foi rápida devido ao ambiente alcalino da matriz cimentícia, combinado

com clima quente e úmido. A Figura 9a e Figura 9b mostram superfície de fratura de telhas produzidas pelo Roma Júnior (2004). Observa-se problemas com a dispersão da polpa celulósica e presença de nódulos ou feixes de fibras que comprometeram o reforço eficiente da matriz.

Figura 9 – Fotografias das superfícies de fratura das telhas produzidas por Roma Júnior (2004): (a) e (b). A seta (1) aponta os feixes de fibras de sisal (polpa *Kraft*). A seta (2) indica os poros provenientes do arrancamento dos feixes ou bolhas de ar aprisionado.

Agopyan et al. (2005) produziram telhas pelo mesmo processo, com matriz de escória de alto forno e o reforço de 2% em volume ($\sim 3,7\%$ em massa) de fibras de côco, polpa de eucalipto e híbrido de polpa de eucalipto (1%) + fibra de sisal (1%). Os autores notaram queda acentuada nas propriedades mecânicas após envelhecimento de 60 meses e atribuíram à evolução da carbonatação natural da matriz e à mineralização das fibras.

2.7. Métodos para melhorar a durabilidade dos compósitos.

Para combater o problema de degradação da fibra em um meio alcalino, existem alguns métodos de tratamentos físicos e químicos que, quando aplicados à fibra, podem aumentar o seu tempo de vida dentro da matriz cimentícia.

O aumento da durabilidade das fibras vegetais como reforço em cimento tem sido estudado por vários pesquisadores, incluindo estudos com impregnação das fibras com agentes bloqueadores e repelentes à água, selando os poros da matriz,

redução da alcalinidade da matriz, combinação da impregnação das fibras e modificação da matriz para prevenir a fibra da mineralização (DELVASTO et al., 2004; GRAM, 1983; GUIMARÃES, 1990; MOTTA, 2006).

Como alternativas para se evitar a deterioração das fibras vegetais, como consequência da alcalinidade ou da umidade do meio a que estão expostas, existem diversos procedimentos de aplicação viável. Um deles consiste na substituição parcial ou total do cimento Portland por outros aglomerantes alternativos, menos alcalinos. John (1995) obteve bons resultados com aglomerante composto por mais de 80% de escoria de alto-forno, além de cal hidratada e gipsita, e demonstrou a viabilidade de argamassas à base de escoria reforçadas com fibras de coco, para produção de painéis. Chatveera e Nimityongskul (1992) também obtiveram aumento da durabilidade de compósitos com fibras de sisal e matriz composta por 70% de cimento Portland comum e 30% de cinzas de casca de arroz, em massa.

Em trabalho de revisão de literatura, Lu, Wu e McNabb Junior (2000) apresentaram um resumo geral dos pré-tratamentos que podem ser utilizados com a finalidade de melhorar a adesão entre madeira/matriz e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas. Esses autores destacam os agentes de acoplamento mais utilizados (mais de quarenta têm sido usados em pesquisa e produção) que são os anidridos, os isocianatos, os copolímeros modificados com anidrido, os silano derivados, entre outros. Embora as abordagens feitas por Lu, Wu e McNabb Junior (2000) sejam relativas a polímeros, as modificações químicas descritas e aplicadas aos lignocelulósicos podem ser de grande valia quando se considera a necessidade de mudar o caráter hidrofílico das fibras ao se trabalhar com compósitos à base de cimento. Esses tratamentos com agentes de cobertura ou impregnação de fibras com repelentes de água reduziriam o movimento da água ao redor e dentro das fibras (zona de transição e lúmen), já presumido que a progressão da mineralização seria diminuída ou prevenida.

Oliveira (1989) conseguiu melhoria da durabilidade de argamassa de cimento reforçada com fibras de malva, nos casos em que essas fibras eram previamente lavadas com detergente comum. Guimarães (1990) submeteu fibras de sisal à impregnação com acetato de polivinila (PVA) e obteve melhoria sensível do desempenho do compósito resultante, após envelhecimento acelerado.

Na literatura, são encontrados trabalhos que descrevem a utilização de silano-derivados para a modificação química da superfície da celulose como, por exemplo,

os desenvolvidos por Delvasto et al. (2004) e Abdelmouleh et al. (2004). Este tratamento aparece como bastante promissor no campo do fibrocimento. Estes agentes de acoplamento possuem estrutura semelhante às estruturas orgânicas. Desta forma, podem ser acoplados à celulose, através de reações específicas e depois podem se ligar a cadeias inorgânicas que possuam grupos hidroxila. Como podem possuir grupos hidrofóbicos, a utilidade é dupla: promovem melhor adesão entre celulose e matriz cimentícia e age como “hidrofugante”, impedindo o acesso de solução alcalina para dentro da fibra celulósica, evitando assim a mineralização da fibra.

2.7.1 Compósitos com reforço híbrido

Ao se utilizarem fibras vegetais associadas a fibras sintéticas, surge a oportunidade de melhorar o desempenho dos compósitos ao longo da vida útil, no caminho para tornar viáveis os materiais reforçados com fibras vegetais. O reforço híbrido se viabiliza em conjunção com a cura úmida ao ar, que é o processo vigente na grande maioria das linhas de produção de fibrocimento operantes no Brasil.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos para o aprimoramento das fibras sintéticas como reforço de matrizes cimentícias, tendo em vista o seu bom desempenho mecânico. Segundo Kalbskopf et al. (2002), as fibras sintéticas demonstraram ser duráveis, por não apresentarem redução na resistência mecânica e no peso molecular, depois de extraídas de compósitos de fibrocimento envelhecidos natural e artificialmente.

De Lhoneux et al. (2002) também estudaram durabilidade de telhados produzidos a partir de fibrocimentos com reforço de polivinil álcool (PVA) na Bélgica e na Suíça e constataram que a vida útil pode ultrapassar 20 anos, para o caso desses países de clima temperado.

2.7.1.1 Fibras de polipropileno

Fibras de polipropileno (PP) são produzidas em uma grande variedade de formas e com diferentes propriedades. As principais vantagens dessas fibras são sua resistência a álcalis, elevada ductilidade e energia específica, alto ponto de fusão (165°C) e baixo preço da matéria-prima (FU; HU; YUE, 1999). Entretanto, apresentam algumas características desvantajosas associadas ao baixo módulo de elasticidade (MOE ~ 3 GPa), fracas ligações químicas devidas à sua hidrofobicidade, pobre ancoragem mecânica à matriz cimentícia relacionada com as propriedades físicas, baixa resistência ao fogo e sensibilidade ao raios solares e ao oxigênio. Essas desvantagens não são necessariamente críticas. Encobertas pela matriz, elas estão protegidas contra o fogo e outros efeitos do ambiente. As propriedades mecânicas, em particular o módulo de elasticidade e as ligações, podem ser melhoradas e fibras especiais para o uso com matrizes cimentícias têm sido desenvolvidas e comercializadas (BENTUR; MINDESS, 1990).

As fibras de PP são produzidas com polipropileno de alto peso molecular. Devido ao arranjo atômico regular das moléculas, elas podem ser produzidas em forma cristalina alongando-se até alcançar um alto grau de orientação, necessário para obter fibras com boas propriedades (BENTUR; MINDESS, 1990).

Fibras de polipropileno têm sido estudadas como fibras alternativas para fibrocimentos (BEZERRA; JOAQUIM; SAVASTANO JÚNIOR, 2004). Hibbert e Hannant (1982) e Krenchel e Shah (1985) também avaliaram compósitos com fibras de PP e concluíram que a energia absorvida na fratura foi muito maior do que compósitos com fibras de vidro e fibras de amianto em concentrações iguais.

2.7.2 Cura em autoclave

Um dos desenvolvimentos mais incisivos para os fibrocimentos foi a redução do tempo de cura realizado por alguns fabricantes utilizando produtos autoclavados.

Desta forma, o custo poderia ser diminuído. Este procedimento permite a substituição parcial do cimento (em torno de 40%) por areia fina de sílica, que reage na temperatura da autoclavagem e com o excesso de material carbonático no cimento, produzindo silicato de cálcio hidratado, similar à matriz cimentícia normal. Tanto a sílica como outro agregado são muito mais baratos do que o cimento. Com as altas pressões, a água é capaz de atingir os grãos anidros dentro dos compósitos, permitindo uma hidratação mais eficiente.

A fissuração provocada pela retração plástica nas primeiras horas de moldagem poderia ser reduzida quando se utilizam processos de cura acelerada em autoclaves. O processo Hatschek seguido de cura em autoclave de alta pressão tem sido aplicado comercialmente para a produção de produtos cimentícios reforçados com fibras de madeira. Cura sob pressão a temperaturas próximas de 180°C permite a substituição de 40 a 60% do cimento Portland por uma sílica de menor custo; esta reage com o cimento para formar uma matriz de silicato de cálcio com resistência aceitável (COUTTS; NI, 1995).

Merece atenção o experimento de Bentur e Akers (1989), com o emprego de autoclave para tratamento de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de celulose. Tanto para a situação de envelhecimento natural como acelerado, a deterioração foi considerada pequena por não apresentarem as fibras preenchidas com produtos de hidratação, apesar da carbonatação do material. Um aspecto indesejável foi a redução da energia específica e o aumento do módulo de elasticidade do compósito submetido a esse tratamento. Resultados semelhantes foram obtidos por Akers e Studinka (1989).

O emprego da cura em autoclave é uma opção ao uso das fibras sintéticas (que representam alto custo no valor final do produto). Além disso, torna possível a rápida disponibilidade dos produtos para a comercialização, já que se trata de um processo acelerado de cura (no máximo 72 horas). Esse aspecto reduz a necessidade de estoques e de grande espaço físico para armazenamento dos materiais fabricados. As desvantagens do uso da autoclave são o investimento inicial para aquisição do equipamento e o consumo elevado de energia elétrica.

2.7.3 Carbonatação acelerada

Pode-se dizer que carbonatação é a reação dos produtos hidratados do cimento com dióxido de carbono (CO_2) disponível no ar. Dentre os componentes da pasta de cimento, aquele que reage mais rapidamente é o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultando no CaCO_3 (GRAM, 1988). Esse processo começa na camada mais externa da superfície do compósito e se move gradualmente para as camadas mais internas, através das fissuras e do sistema de poros.

O valor de pH para a água capilar em compósitos comuns excede 13 e, segundo Coutts (1988), a carbonatação pode causar uma redução do valor de pH na água do poro (capilar) para níveis abaixo de 9. Os mecanismos que compõem a sequência da carbonatação são parcialmente desconhecidos. O processo de carbonatação é lento e a taxa de carbonatação é determinada pela concentração de dióxido de carbono presente no ambiente, pela permeabilidade da matriz cimentícia, pela umidade do compósito, pela temperatura e pela amplitude de mudança na temperatura e umidade. Dependendo desses fatores, a frente de carbonatação se move a uma taxa de 0,01 – 3 mm por ano. O processo de carbonatação é promovido pela alta umidade no sistema de poros da matriz, alta concentração de CO_2 no ambiente e altas temperaturas (GRAM, 1988).

Quando telhas de fibrocimento reforçadas com fibras de sisal, na Tanzânia, foram avaliadas mecanicamente aos 10 anos de idade, o carregamento causou uma ruptura frágil (GRAM, 1983). Na investigação da superfície de fratura, as fibras localizadas na superfície das telhas pareciam estar intactas, com comprimento de arrancamento 90% superior às fibras do centro da secção transversal das telhas. Quando a profundidade da carbonatação foi determinada, o pH da espessura carbonatada ficou abaixo de 9 e na região central não carbonatada excedeu 13.

Tentativas de carbonatação acelerada foram desenvolvidas por Gram (1983), com disposição de amostras em câmara com altas concentrações de CO_2 por alguns dias. Porém, a penetração da carbonatação não foi completa, atribuindo-se esse comportamento à relação água-cimento (0,5), que interferiu na permeabilidade do compósito, bem como à alta umidade relativa (50%) dentro da câmara, o que aumentou a umidade nos poros da matriz.

Testes envolvendo carbonatação artificial de produtos com fibras de amianto mostraram que foi formado em torno de 35 - 40% de CaCO_3 , e com isso um aumento na resistência à flexão e diminuição da energia específica e da absorção de água (JONES, 1946).

Purnell et al. (2000) propuseram a utilização de dióxido de carbono (CO_2) pressurizado, em torno de 75 atmosferas, a uma temperatura em torno de 40°C em compósitos de matrizes de cimento Portland, após processo de cura. A esse processo deram o nome de carbonatação super-crítica e, em ensaios preliminares, obtiveram um significativo aumento da durabilidade do compósito com algumas horas de exposição ao CO_2 .

Um fator considerado por Gram (1988) é que a carbonatação do hidróxido de cálcio presente na matriz, embora ajude a reduzir a alcalinidade e aumentar a resistência e densidade, é responsável pela retração e, conseqüentemente, pela fissuração do material. Outro aspecto negativo da carbonatação é enfatizado por Mehta e Monteiro (1994), indicando que a presença de CO_2 livre após a precipitação do $\text{Ca}(\text{CO})_3$, que é insolúvel, transformaria o próprio $\text{Ca}(\text{CO})_3$ em bicarbonato solúvel, como representado nas reações indicadas na eq.(1) e na eq.(2):

Por isso, de acordo com a eq.(2), a presença de CO_2 livre auxilia a hidrólise do hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Uma vez que a segunda reação (eq.2) é reversível, uma certa quantidade de CO_2 livre, referido como o CO_2 de equilíbrio, é necessária para manter o equilíbrio da reação. Qualquer concentração de CO_2 acima do CO_2 de equilíbrio seria agressiva à pasta de cimento porque ao direcionar a segunda reação (eq.2) para a direita, ele aceleraria o processo de transformação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente na pasta hidratada em bicarbonato de cálcio solúvel (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.8. Influência do material de cobertura no conforto térmico

A principal proteção contra a insolação direta em uma instalação é conseguida através da cobertura. Um bom material de cobertura apresenta temperaturas superficiais amenas, devendo para isso ter alta refletividade solar na superfície superior conjugada à baixa emissividade térmica na parte inferior (BAETA; SOUZA, 1997; SEVEGNANI; GUELFILHO; DA SILVA, 1994). A cobertura ideal também deve possuir considerável capacidade de isolamento térmico, baixo coeficiente de absorção, baixa condutividade térmica, baixa difusividade térmica e maior retardo térmico. Com essas características, a pequena quantidade de radiação solar absorvida pela telha terá dificuldade em atravessar o material e, ao fazê-lo, atingirá seu interior com certa defasagem, aquecendo o ambiente interior quando a temperatura deste estiver mais baixa (à noite por exemplo).

Tratando-se de animais, os fatores térmicos, representados por temperatura do ar, umidade, radiação térmica e movimentação do ar, são os fatores ambientais que afetam diretamente a produção. Para a manutenção da homeotermia, o animal emprega mecanismos orgânicos de controle que provocam severas compensações fisiológicas. Esses ajustes são feitos em detrimento da produção. Quando não ocorre nenhum desperdício de energia metabólica, seja para compensar o frio ou para dissipar o calor, diz-se que está em condições de conforto e, conseqüentemente, de produtividade máxima (GARRET; BOND; PEREIRA, 1967).

Provavelmente, o meio mais econômico de ajudar um animal a manter o balanço de energia é controlar a entrada de radiação térmica. A radiação do sol e do céu, somada à grande carga térmica é simples e substancialmente reduzida com telhados que minimizem a incidência da energia solar direta.

A fabricação de telhas sem amianto e estudos do conforto térmico promovido por essas telhas foram realizados por Kawabata (2003); Martello (2003); Roma Júnior (2004) e Savastano Júnior (2000). Devito (2003), utilizando telhas à base de escória de alto-forno e fibras vegetais (eucalipto), encontrou diferença de 7°C na temperatura superficial interna, em relação à externa. Resultado atribuído à sua coloração clara, com alta refletividade. Kawabata (2003) encontrou diferenças significativas para conforto térmico de animais, entre diferentes sistemas de cobertura, onde telhas à base de cimento e fibras celulósicas apresentaram

desempenho superior em relação às telhas simples de fibrocimento-amianto. Roma Júnior (2004), também com telhas à base de cimento e fibras vegetais de eucalipto e sisal, chegou a resultados com diferença de 1°C na temperatura de pele de vacas holandesas em relação às instalações com telhas de amianto.

Portanto, observa-se a necessidade da avaliação das propriedades térmicas dos materiais de cobertura nas instalações animais, já que influenciam diretamente no ambiente construído. O uso estratégico dos materiais com propriedades térmicas adequadas permite um melhor controle dos fatores ambientais nas instalações, na busca pelas condições de conforto térmico dos animais e consequentemente pelo seu máximo desempenho produtivo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção aborda o planejamento dos experimentos, composto por duas fases. A primeira fase visou verificar (em placas planas) a interferência da intensidade do refino da polpa celulósica sobre o desempenho mecânico e as características físicas dos compósitos a base de matriz cimentícia. Na segunda fase, utilizando os parâmetros definidos na primeira fase, foram produzidas telhas pequenas onduladas, para realizar ensaios de durabilidade e conforto térmico. Além disso, esta seção também aborda as características dos materiais utilizados e as metodologias empregadas na produção dos corpos-de-prova e nos ensaios.

3.1. Planejamento dos experimentos

A Figura 10 mostra um fluxograma com a descrição das etapas da primeira fase dos experimentos, que envolveu o refino e a caracterização da polpa celulósica em diferentes intensidades (sem refino, média intensidade e altamente refinada); a produção de placas planas; as seqüências de envelhecimento; e as caracterizações.

Figura 10 – Fluxograma da primeira fase experimental – compósitos placas planas.

A Figura 11 mostra fluxograma em que estão descritas as etapas envolvidas na segunda fase dos experimentos, que envolveu a produção das telhas onduladas, os envelhecimentos acelerados e as caracterizações físicas e mecânicas.

Figura 11 – Fluxograma da segunda fase experimental – telhas onduladas.

As variáveis e os níveis avaliados nos experimentos com placas planas e telhas onduladas estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis e níveis de avaliação para os experimento com placas planas e telhas onduladas.

VARIÁVEIS		NÍVEIS AVALIADOS			
		1	2	3	4
PLACAS PLANAS	Tipo de fibras (% massa)	Sisal 4,7%	Sisal 3% + PP 1,7%	-	-
	Drenabilidade (CSF - mL)	680	220	20	-
	Matriz	CP IIE + calcário	-	-	-
	Cura	28d ^a	-	-	-
	Envelhecimentos	28d (sem envelhecimento)	50c	100c	Natural
TELHAS ONDULADAS	Tipo de fibras (% massa)	Sisal 4,7%	Sisal 3% + PP 1,7%	Sisal3% + PP 1,0%	Sisal 3% + PP 0,5%
	Drenabilidade (CSF - mL)	220	-	-	-
	Matriz	CP VARI + calcário	-	-	-
	Cura	Autoclave ^b	28 dias ^c	-	-
	Envelhecimentos	28d (sem envelhecimento)	28d + C ^d + 100c	100c ^e	C-C ^f

^a 2 dias em atmosfera saturada, 5 dias imerso em água e 21 dias em bancada de laboratório; ^b autoclavagem aos 2 dias de cura em temperatura de 140°C (somente pra telhas reforçadas com sisal); ^c 2 dias cobertas com sacos plásticos e 26 dias imersas em água; ^d carbonatação em câmara climática (7 dias); ^e ciclos de imersão-secagem em estufa automática; ^f cura em 28 dias + calor-chuva.

3.2. Fibras

3.2.1 Fibras celulósicas

3.2.1.1 Preparo e refino da polpa celulósica

A polpa *Kraft* de sisal (*Agave sisalana*) não branqueada, proveniente da Lwarcel Celulose AS, foi mantida em água de torneira por 4h para hidratação completa das fibras. Em seguida foi submetida a um processo de dispersão em água numa concentração de aproximadamente 5 g/L por 1 h. Parte da polpa ainda não refinada foi separada, para representar a polpa com a drenabilidade original, ou seja, CSF 680 mL. O restante da polpa foi submetida ao processo de refino, ainda com a concentração de 5 g/L em água, com refinador de discos (300 mm de diâmetro) em

corrente elétrica constante de 50 A (Figura 12). A polpa foi passada 10 e 15 vezes pelo refinador, para intensidades de refino CSF 220 mL e 20 mL respectivamente. O método “*Canadian Standard Freeness*” (CSF) é uma estimativa da intensidade de refino da polpa (Figura 13) e é uma mensuração arbitrária das propriedades de drenagem ou drenabilidade da polpa. Esse método se correlaciona bem com a taxa inicial de drenagem da polpa úmida durante o processo de retirada da água por aplicação de pressão negativa. Baixos valores de CSF (menores que 300 mL) são um indicativo de altos graus de fibrilação externa das fibras e provocam longos períodos de drenagem durante a realização deste procedimento. Os valores de CSF para cada polpa foram determinados de acordo com a norma brasileira NBR 14344 (2003). Os principais atributos das polpas foram caracterizados por avaliação de partículas com equipamento Galai® CIS-100 e também por microscopia óptica, assim como por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 12 – Planta de refino utilizada no experimento e detalhe do refinador de discos (300 mm de diâmetro), aberto para visualização das estrias.

Figura 13 – Equipamento para avaliação da drenabilidade da polpa celulósica pelo método CSF “Canadian Standard Freeness”.

As análises realizadas com o equipamento Galai® CIS-100 consistem na avaliação dos atributos de todo o material fibroso presente na polpa e são realizadas por meio de uma solução de 0,001% de fibras em água, previamente hidratada por 4 h. Essa suspensão com 700 mL é submetida à circulação em uma cubeta de quartzo, em velocidade constante. A incidência de um feixe de laser gera imagens que são coletadas e armazenadas por uma câmera de vídeo, para análise pelo software Wshape v.1.0. Comprimento médio, largura média, “coarseness”, número de fibras por grama e conteúdo de finos são as propriedades avaliadas por esse método.

A microscopia óptica somente avaliou as fibras inteiras e foi realizada por aquisição de imagens no equipamento Olympus® PV10-CB. Além do comprimento médio e da largura média das fibras inteiras, essas análises também avaliaram a largura do lúmen e da parede celular das fibras.

3.2.2 Fibras sintéticas

Fibras de polipropileno (PP) nacionais (Fitesa® 50T) foram utilizadas no reforço híbrido dos compósitos. Seu uso já é comum na produção de materiais cimentícios e com boa durabilidade em meios alcalinos ao longo da vida útil dos compósitos. Essas fibras apresentam comprimento em torno de 6 mm e diâmetro de aproximadamente 30 μm . Algumas de suas propriedades estão descritas na Tabela 3.

A seleção foi feita com base na disponibilidade das fibras, por ser um produto nacional e de menor custo que a fibra de PVA importada, bem como também baseada nas propriedades mecânicas e geométricas das fibras.

Tabela 3 – Características da fibra de PP.

	Densidade (g/cm ³)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Polipropileno (PP)	0,90 – 0,95	22,3 – 26,0	550 – 760	1,6 – 3,5

FONTE: Laboratório de Microestrutura/PCC – Escola Politécnica – USP (adaptado)

3.3. **Matrizes cimentícias**

Os componentes da matriz cimentícia foram previamente caracterizados. A identificação das fases cristalinas por difração de raios-X, foi realizada com equipamento Rigaku®. Para análise da distribuição do tamanho de partículas foi usado o equipamento Malvern® e software Martersizer S long bed versão 2.19.

3.3.1 **Matrizes cimentícias utilizadas para produzir os compósitos (placas planas)**

O cimento CP II E (NBR 11578, 1991) foi utilizado na confecção das placas planas. O compósito empregou “filler” de material carbonático (calcário moído Minercal®) na tentativa de otimizar a utilização do cimento Portland (OPC) através de sua substituição parcial. A composição aproximada do material carbonático está apresentada na Tabela 4. Os difratogramas dos materiais particulados e as distribuições granulométricas estão na Figura 14 e na Figura 15.

Tabela 4 – Composição aproximada para o calcário Mineral[®] (informações provenientes do fornecedor).

Calcário ^a	
Teores em massa (%)	
Perda ao fogo (PF)	41,0
SiO ₂	7,6
CaO	28,0
Al ₂ O ₃	1,8
Fe ₂ O ₃	1,3
MgO	19,2
Na ₂ O	0,0
K ₂ O	0,5
SO ₃	0,6

^a área superficial = 450 m²/kg

(a)

(b)

Figura 14 – Difratogramas dos materiais particulados utilizados nas placas planas (fases majoritárias): (a) cimento Portland (CP II-E); (b) material carbonático (Calcário Mineral[®]).

Figura 15 – Distribuição granulométrica dos materiais particulados utilizados na confecção das placas planas: (a) cimento Portland (CP II-E); (b) material carbonático (Calcário Mineral[®]).

3.3.2 Matrizes cimentícias utilizadas para produzir as telhas onduladas

A matriz cimentícia utilizada na produção telhas foi composta por cimento CPV ARI (NBR 5733, 1991) e “filler” carbonático (calcário moído Itaú[®]). Os difratogramas dos materiais particulados e as distribuições granulométricas estão na Figura 16 e na Figura 17.

Figura 16 – Difratogramas dos materiais particulados utilizados nas telhas onduladas (fases majoritárias): (a) cimento Portland (CP V-ARI); (b) material carbonático (Calcário Itaú[®]).

Figura 17 – Distribuição granulométrica dos materiais particulados utilizados nas telhas onduladas: (a) cimento Portland (CP V-ARI); (b) material carbonático (Calcário Itaú®).

3.4. Produção dos compósitos

3.4.1 Moldagem das placas planas

O estudo com placas planas foi dedicado à avaliação do efeito das intensidades de refino nas propriedades mecânicas e microestruturais assim como no desempenho final dos compósitos após envelhecimento acelerado e natural. As formulações utilizadas (Tabela 5) foram adaptadas de estudos publicados anteriormente (BEZERRA; SAVASTANO JÚNIOR, 2004; BEZERRA et al., 2004).

Tabela 5 – Formulações empregadas na produção das placas planas.

Matérias-primas	SS-680, SS-220, SS-20	SP-680, SP-220, SP-20
	(% em massa)	
Polpa de Sisal (CSF 680, 220, 20mL)	4,7 ^a	3,0 ^b
Fibras de Polipropileno (PP)	-	1,7 ^c
Cimento Portland (CP II-E) ^d	78,8	78,8
Material carbonático (calcário Mineral [®]) ^e	16,5	16,5

^a % equivalente em volume de polpa de sisal = 4,5%; ^b % equivalente em volume de polpa de sisal para formulações SP = 3%; ^c % equivalente em volume de fibras de PP = 2,5%; ^d NBR 11578, 1991 (escória de alto-forno = 6 - 34%; material carbonático = 0 - 10%). Área superficial = 360 m²/kg. ^e Área superficial = 450 m²/kg.

Placas de fibrocimento com dimensões nominais de 200 mm x 200 mm foram preparadas em laboratório por sucção do excesso de água e posterior prensagem de acordo com procedimento descrito por Eusebio et al. (1998). A Figura 18 mostra um esquema do processo de fabricação das placas planas.

As polpas foram previamente dispersas em água durante 1 h usando um agitador mecânico de alta rotação (1700 rpm) de eixo vertical, com capacidade nominal de 25L. Os outros insumos foram adicionados e homogeneizados por mais 0,5 h, e então a suspensão formada por aproximadamente 20% de sólidos foi transferida para uma câmara de moldagem onde o vácuo foi aplicado. Placas de cada formulação foram prensadas simultaneamente (três placas por vez) a 3,2 MPa por 5 min, seladas em sacos plásticos para cura em ambiente saturado durante dois dias e então imersas em água durante outros cinco dias.

Figura 18 – Ilustração do processo de sucção e prensagem: (1) mistura; (2) sucção do excesso de água; (3) adensamento manual; (4) sucção final; (5) prensagem (SILVA, 2002).

As placas com espessura aproximada de 5 mm foram cortadas em quatro corpos-de-prova (165 x 40 mm) com disco diamantado refrigerado com água, como mostra a Figura 19. Os corpos-de-prova foram dispostos em ambiente de laboratório para cura ao ar a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $60 \pm 5\%$ de umidade relativa até completar um período total de cura de 28 dias.

Figura 19 – Corpos-de-prova (165 x 40 x 5 mm) originados das placas planas (200 x 200 x 5 mm).

Com a finalização da cura inicial citada acima (28 dias), séries compostas por 10 corpos-de-prova de cada formulação foram testadas na condição saturada, e as demais séries destinadas ao envelhecimento acelerado de imersão-secagem e envelhecimento natural, descritos posteriormente em detalhes.

Independente do tipo de envelhecimento a que foram submetidos, os corpos-de-prova foram ensaiados na condição saturada, ou seja, imersos em água por pelo menos 24 h antes dos ensaios mecânicos e físicos.

3.4.2 Ajustes do equipamento de moldagem das telhas onduladas

Para a moldagem foi utilizado o equipamento adquirido com recursos do convênio financiado pela Finep-Habitare e CEF (Figura 21a e Figura 20b) que resultou em depósito de patente (SAVASTANO JÚNIOR, 2002).

Figura 20 – (a) Representação do equipamento automatizado para moldagem das telhas; (b) vista geral do equipamento.

O processo de produção das telhas onduladas está bem representado pela sequência de fotos na Figura 21. No princípio da fase experimental, foram iniciados alguns testes, adaptações e ajustes para adequar a produção das telhas.

Algumas dificuldades foram encontradas com a relação água/cimento da mistura. Primeiramente uma concentração de 50 - 60% de sólidos foi utilizada, originando problemas com o preenchimento da câmara de moldagem, já que a mistura apresentou-se muito consistente. Já com uma concentração de 30 - 35% de sólidos as telhas apresentaram espessuras inferiores à 6 mm. Notou-se também com essa relação, grande perda de água e massa da mistura no recipiente de armazenamento do equipamento.

Foram também encontrados problemas com os pistões adensadores, responsáveis pela conformação da mistura dentro da câmara de moldagem. Pressões inferiores à 10 kPa não foram suficientes para o espalhamento da mistura, e formação da espessura desejada nas telhas. A pressão utilizada no pistão que desloca horizontalmente o equipamento foi de aproximadamente 400 kPa. Notou-se que pressões menores que esta (em torno de 250 Kpa) não foram suficientes para o deslocamento do equipamento sobre os eixos carreadores.

Outra dificuldade encontrada foi o ajuste da pressão negativa necessária para sucção da telha, tanto do dispositivo inferior, responsável pela drenagem da água da mistura dentro da câmara de moldagem, como também do dispositivo superior, responsável pela retirada da peça já conformada. Pressões negativas de vácuo da ordem de 35 kPa não foram suficientes para retirada da peça da câmara de

moldagem. Foram observados também problemas como a perda de material durante a sucção da água, causando entupimento dos poros dos dispositivos inferior e superior, durante a drenagem da pasta. Foi utilizado para esse controle uma camisa de malha bem fina, de tal forma que minimizasse a perda de material particulado da mistura.

O equipamento foi finalmente ajustado com a implantação de vácuo em torno de 50 kPa e dois pistões pneumáticos atuando com uma pressão em torno de 15 kPa na câmara de moldagem (Figura 21a).

3.4.3 Moldagem das telhas onduladas

Nesta fase foram moldadas telhas utilizando os melhores parâmetros definidos na fase inicial através do estudo com placas planas. As formulações utilizadas na produção das telhas estão descritas na Tabela 6 e foram baseadas em estudos anteriores (DEVITO, 2003; ROMA JÚNIOR, 2004) e adaptadas das formulações utilizadas na primeira fase, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 6 – Formulações empregadas na produção das telhas onduladas.

Matérias-primas	S4_7	S3PP0_5	S3PP1_0	S3PP1_7
	(%) massa			
Polpa de Sisal (CSF 220mL) ^a	4,7	3,0	3,0	3,0
Fibras de Polipropileno (PP) ^b	-	0,5	1,0	1,7
Cimento Portland (CP V-ARI) ^c	78,8	79,8	79,4	78,8
Material carbonático (calcário Itaú [®])	16,5	16,7	16,6	16,5

^a % equivalentes em volume de polpa de sisal: S4_7 = 4%; S3PP0_5 = 3%; S3PP1_0 = 3%; S3PP1_7 = 3%

^b % equivalentes em volume de fibras de PP: S3PP0_5 = 2%; S3PP1_0 = 1%; S3PP1_7 = 0,5%

^c NBR 5733 (clínquer+gesso = 100 - 95%; material carbonático = 0 – 5%).

A ordem de mistura seguiu o procedimento utilizado para as placas planas (seção 3.4.1). No entanto, a mistura foi formada por aproximadamente 40% de sólidos.

A mistura é colocada em recipiente de armazenamento no próprio equipamento (Figura 21a). Esse recipiente desloca-se sobre um sistema de eixos

carreadores que deposita a massa sobre uma câmara de moldagem retangular com dimensões aproximadas de 500 mm de comprimento por 275 mm de largura e 8 mm de espessura. Forma-se então uma placa ondulada que é adensada pelos pistões pneumáticos e succionada para retirada do excesso de água por cerca de 30 s (Figura 21a – seta 1 e 2). Em seguida, a sucção é transferida para o dispositivo superior (por mais 30 s, Figura 21b – seta 3), que retira a peça conformada da câmara de moldagem (Figura 21b – seta 4), e com o deslocamento horizontal (Figura 21c – seta 5) deposita-a em um molde ondulado que confere à telha seu formato final (50 x 27,5 x 8 mm) (Figura 21d e Figura 21e).

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 21 – (a) Prensagem na câmara de moldagem (seta 1), sucção do excesso de água (seta 2); (b) sucção pelo dispositivo superior (seta 3) e retirada da telha da câmara de moldagem (seta 4); (c) deslocamento horizontal do equipamento (seta 5) e re-preenchimento da câmara de moldagem com a mistura (seta 6); (d) deposição da peça no molde ondulado; (e) produto final.

A cura inicial para as telhas foi realizada em ambiente de laboratório ($23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $60 \pm 5\%$ de umidade relativa do ar) deixando-as ainda nos moldes e totalmente cobertas com saco plástico durante 2 dias. Após esse período, as telhas foram retiradas dos moldes e parte delas seguiu para cura imersa em água por 26 dias.

Duas séries, de oito telhas cada, foram destinadas à cura acelerada em autoclave que será posteriormente descrita no item 3.4.3.1.

Séries de cada formulação, curadas aos 28 dias, foram submetidas aos ensaios físicos e mecânicos. As séries restantes foram destinadas aos estudos de envelhecimento acelerado, imersão-secagem e calor-chuva, bem como de carbonatação acelerada descritos na seção 3.5.

Similar ao procedimento para as placas planas, as telhas destinadas tanto para o ensaio aos 28 dias como após os envelhecimentos foram ensaiadas na condição saturada (pelo menos 24 h de imersão em água).

3.4.3.1 Cura acelerada das telhas em autoclave

Após a cura inicial durante 2 dias em ambiente saturado, cobertas com sacos plásticos, as telhas seguiram para cura acelerada em autoclave (Figura 22) por 8 h à temperatura em torno de 140°C (pressão aproximada de 1,5 MPa), como proposto por Coutts e Kightly (1982) e Coutts (1984). As 2 séries curadas em autoclave permaneceram em ambiente de laboratório ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $60 \pm 5\%$ UR) até completar os 28 dias pós-moldagem. Uma das séries foi então ensaiada após cura total de 28 dias e a outra envelhecida com 100 ciclos de imersão-secagem.

(a)

(b)

Figura 22 – (a) Autoclave utilizada para a cura acelerada; (b) disposição das telhas dentro da autoclave.

3.5. Envelhecimentos

Séries de corpos-de-prova de placas planas foram submetidas tanto a ciclos de envelhecimento acelerado de imersão-secagem quanto a envelhecimento natural. As séries de telhas foram submetidas, além da carbonatação acelerada, a ciclos de envelhecimento acelerado imersão-secagem e calor-chuva.

3.5.1 Envelhecimento acelerado

3.5.1.1 *Carbonatação acelerada*

A carbonatação acelerada consistiu na disposição das telhas em câmara climática Thermotron® (Figura 23a) com temperatura e umidade relativa controladas (25°C e 75% respectivamente), além da saturação do ambiente com dióxido de carbono (CO₂). As telhas foram dispostas durante uma semana até a carbonatação completa das amostras, avaliada por titulação com solução fenolftaleína 2%. Esse procedimento foi descrito por Agopyan et al. (2005) e Silva (2002), em que se goteja a solução na seção transversal de uma amostra submetida à câmara climática e se avalia a coloração resultante. Esta solução de fenolftaleína é incolor e, se em contato com a matriz aos 28 dias (antes do processo de carbonatação acelerada) adquire coloração violeta (Figura 23b – ponto 1), indica que o material apresenta-se rico em produtos de hidratação alcalinos, como o hidróxido de cálcio (CaOH₂). A ausência de coloração violeta na seção transversal da telha após o gotejamento da solução indica a ocorrência do processo de carbonatação (Figura 23b – ponto 2).

Figura 23 – (a) Câmara climática Thermotron® utilizada na carbonatação acelerada das telhas onduladas. (b) Seção transversal de telhas com fenolftaleína antes da carbonatação acelerada (1) e após uma semana na câmara climática (2).

3.5.1.1.1 Determinação por titulação potenciométrica dos teores de carbonatos

O objetivo desta análise foi determinar os teores de carbonatos formados em detrimento do consumo dos hidróxidos, principalmente de cálcio, nas amostras antes do envelhecimento (28 dias), em amostras após envelhecimento de 100 ciclos de imersão-secagem e em amostras submetidas à carbonatação acelerada bem como ao envelhecimento 100 ciclos.

O procedimento de análise foi baseado em titulações do tipo ácido base, com controle de volumes de equivalência por indicador visual fenolftaleína e potenciometricamente utilizando-se um eletrodo de vidro (HARRIS, 2001; MENDHAM et al., 2002).

Neste procedimento, são pesados cerca de 200 mg do sólido a ser analisado. Esta massa é dispersa em um béquer com 40 mL de água destilada. Esta solução é então titulada com solução padrão de 0,1 mol/L de HCl na presença de indicador visual de fenolftaleína e ainda um eletrodo de vidro acoplado a um pHmetro.

O primeiro ponto de viragem do indicador de vermelho para um rosa muito claro, com pH em torno de 8, tanto da amostra carbonatada quanto da não carbonatada, corresponde ao volume de HCl necessário para neutralizar o hidróxido existente na suspensão. Após o primeiro ponto de viragem, continuou-se a adicionar

solução padrão de HCl até que o pH atingisse um valor em torno de 2, valor este controlado pelo eletrodo de vidro. Neste ponto, a mistura foi submetida a uma leve fervura e borbulhamento de nitrogênio para garantir que todo ácido carbônico gerado fosse eliminado da solução. Feito isso, titulou-se o excesso de HCl com solução padrão de 0,1 mol/L de NaOH na presença de fenolftaleína novamente, com pH em torno de 7. A adição de indicador fenolftaleína no momento da titulação do excesso de HCl pode ser feita porém não é necessária, já que a adição inicial de fenolftaleína é suficiente para monitorar toda a transformação do sistema durante a titulação.

A partir do primeiro volume de equivalência obtido na titulação, $V(1)_{HCl}$ em mL e da concentração da solução padrão de HCl, C_{HCl} , em mol/L, calcula-se o número de mols de hidróxidos, $n_{hidróxidos}$, presente na porção de amostra pesada de acordo com a eq.(3) a seguir:

$$n_{hidróxidos} = \frac{V(1)_{HCl} \cdot C_{HCl}}{2000} \quad (3)$$

O número total de mols, ou seja, a soma de $n_{hidróxidos}$ e $n_{carbonatos}$, pode ser calculado a partir do volume total adicionado de solução padrão de HCl em mL para que fosse atingido o pH próximo de 2, $V(2)_{HCl}$, bem como a concentração desta solução em mol/L, C_{HCl} , e ainda o volume em mL de solução padrão de NaOH, V_{NaOH} , de concentração em mol/L, C_{NaOH} , segundo a eq.(4):

$$n_{total} = \frac{V(2)_{HCl} \cdot C_{HCl}}{2000} - \frac{V_{NaOH} \cdot C_{NaOH}}{2000} \quad (4)$$

A eq.(5) representa o cálculo do número de mols de carbonatos, $n_{carbonatos}$, dado pela diferença entre o número de mols total, n_{total} , e o número de mols de hidróxidos, $n_{hidróxidos}$, presentes na porção da amostra:

$$n_{carbonatos} = n_{total} - n_{hidróxidos} \quad (5)$$

Obtendo-se o número de mols de carbonatos, $n_{carbonatos}$, e o número de mols de hidróxidos, $n_{hidróxidos}$, presentes na porção de amostra analisada, é possível calcular-se a porcentagem de cada espécie na amostra de interesse pelas eq.(6) e

eq.(7):

$$\% \text{hidróxidos} = \frac{n_{\text{hidróxidos}}}{n_{\text{total}}} \cdot 100 \quad (6)$$

$$\% \text{carbonatos} = \frac{n_{\text{carbonatos}}}{n_{\text{total}}} \cdot 100 \quad (7)$$

Com estes dados obtidos foi possível calcular a eficiência do processo de carbonatação da amostra não carbonatada em relação à amostra carbonatada, pela eq.(8):

$$\% \text{ eficiência} = \frac{[\% \text{hidróxidos}_{\text{nãocarbonatada}} - \% \text{hidróxidos}_{\text{carbonatada}}]}{\% \text{hidróxidos}_{\text{nãocarbonatada}}} \cdot 100 \quad (8)$$

Nas mesmas amostras em que foram determinados, por titulação potenciométrica, os teores de carbonatos formados, utilizou-se também da identificação das fases cristalinas por difração de raios-X, com equipamento Rigaku® 200RVB.

3.5.1.2 Imersão-secagem

Um procedimento de imersão-secagem foi desenvolvido com o objetivo de estudar o comportamento do envelhecimento de fibras celulósicas sob os efeitos do ambiente, estimulando o ataque da água alcalina dos poros nas fibras celulósicas (por exemplo, condições envolvendo repetidas exposições à chuva e raios solares). O envelhecimento acelerado de imersão-secagem para as placas planas foi baseado no procedimento descrito no item 7.3.5 da norma europeia EN 494 (1994). Esse ensaio consiste em analisar comparativamente o desempenho físico e mecânico dos corpos-de-prova antes e após a realização de ciclos. Cada ciclo compreende uma imersão em água a temperatura ambiente durante 18 h, e secagem em estufa ventilada a $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ com umidade relativa inferior a 20%

durante 6 h.

Já no caso das telhas o procedimento de imersão-secagem foi adaptado do item 7.4.2 da norma EN 494 (1994). Para esse propósito, foi utilizada uma câmara automática de envelhecimento acelerado que realiza os ciclos. As telhas são submetidas nesta câmara à imersão completa em água por 170 min (até que os poros capilares sejam preenchidos pela água). As telhas são então aquecidas até $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por igual período de 170 min para secagem dos sistemas de poros capilares. Esse procedimento foi repetido até se completarem 100 ciclos (100c). Segundo Soroushian e Marikunte (1992), sob essas condições, as fibras entram em contato com a água alcalina dos poros do cimento durante a imersão, os produtos de decomposição são formados como um resultado da reação entre os componentes da fibra e a água do poro transportada para longe da fibra durante a fase de secagem.

Figura 24 – (a) Estufa automática de operação dos ciclos de imersão-secagem; (b) Disposição das telhas no interior do equipamento.

3.5.1.3 Envelhecimento calor-chuva (C-C)

O envelhecimento acelerado de calor-chuva (C-C) tem por finalidade simular a eventual degradação das telhas pela exposição prolongada às intempéries naturais. Este procedimento, baseado no item 7.4.2 da norma europeia EN 494 (1994) foi adotado somente para as telhas, a fim de detectar todo tipo de

deterioração como fissura (longitudinal e transversal), delaminação ou lixiviação superficial, além de alteração no comportamento mecânico e das propriedades físicas.

Neste procedimento reproduzido em laboratório (Figura 25) as telhas ficam dispostas em uma estrutura metálica com dimensões de 3,3 x 3,3 m e inclinação de 25°, acoplada a uma distância em torno de 0,3 m a um sistema de aquecimento com infravermelho e a um de aspersão de água com vazão de aproximadamente 2,5 L/(m².min). Um ciclo foi composto pelo aquecimento à temperatura de 70°C ± 5°C na superfície superior da telha por 2 h e 50 min, seguido de um intervalo de 10 min e logo em seguida 2 h e 50 min de aspersão de água, seguido de novo intervalo de 10 min. A água aspergida é coletada por calhas que a redirecionam para a aspersão num sistema fechado. As telhas foram submetidas a 50 ciclos de calor-chuva.

(a)

(b)

(c)

Figura 25 – (a) Vista geral da estrutura calor-chuva; (b) Sistema de aquecimento em funcionamento; (c) Sistema de aspersão de água nas telhas em funcionamento.

3.5.2 Envelhecimento Natural

O envelhecimento natural é realizado expondo-se os compósitos produzidos ao ambiente natural, com incidência direta da luz solar e exposição às intempéries por determinado intervalo de tempo. É um ensaio de custo relativamente baixo e de resposta demorada. Os fatores de uso e a sinergia entre estes fatores e os demais fatores de degradação são desconsiderados (JOHN, 1987).

Este ensaio foi realizado no Campus da USP de Pirassununga/SP (FZEA - latitude $21^{\circ}59' S$), numa bancada metálica inclinada a 45° e voltada para a face norte (Figura 26a e Figura 26b). O período de exposição depende do interesse na avaliação da degradação e, por isso, até o presente momento somente foram avaliados para o estudo da intensidade de refino, totalizando um período de 365 dias (um ano).

Telhas produzidas durante o mesmo período continuam expostas ao envelhecimento natural e serão avaliadas ao longo dos próximos cinco anos.

Figura 26 – (a) e (b) Bancada de envelhecimento natural no campus da USP Pirassununga. (c) Estação meteorológica da FZEA – USP.

Na Tabela 7 estão apresentados as principais características climáticas registradas no período de exposição natural (maio/2004 a maio/2005). Esses dados foram acompanhadas e armazenados pela estação climatológica da FZEA – USP (Figura 26c).

Tabela 7 – Principais características climáticas no período de maio/2004 a maio/2005.

Período avaliado	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	Velocidade média do vento (m/s)	Umidade média (%)	Pluviosidade total (mm)	Radiação média (W/m ²)
Maio a dez./2004	37,0	5,1	21,4	2,5	70,0	630	1070
Jan. a maio/2005	35,4	9,3	22,3	2,1	76,4	1000	1071

3.6. Ensaio de caracterização

3.6.1 Caracterizações físicas

3.6.1.1 *Absorção de água (AA), Porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA)*

Avaliações de absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) tanto das placas planas quanto das telhas onduladas foram realizadas segundo o princípio de Arquimedes e conforme os procedimentos da norma ASTM C 948 (1981).

Uma média de oito corpos-de-prova das placas planas foi utilizada para cada série na caracterização física aos 28 dias e após os envelhecimentos.

No caso das telhas onduladas, para a realização desses ensaios físicos foram cortadas de cada exemplar de telha, três amostras com dimensões nominais de 40 mm x 150 mm (totalizando, em média, 24 corpos-de-prova). Cada série de telhas foi avaliada igualmente aos 28 dias e após os envelhecimentos.

A eq.(9) foi utilizada para o cálculo da absorção de água (AA) dos compósitos em %:

$$AA(\%) = \left(\frac{M_{SSS} - M_{seca}}{M_{seca}} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

onde M_{SSS} é a massa do compósito saturado com superfície seca e M_{seca} é a massa do compósito seco em estufa ventilada entre 100°C e 105°C por 24h.

A porosidade aparente (%), também denominada índice de vazios, foi determinada com a eq.(10):

$$PA(\%) = \left(\frac{M_{SSS} - M_{seca}}{M_{SSS} - M_{imersa}} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

Para a determinação da densidade aparente (DA) em g/cm³, utilizou-se a eq.(11):

$$DA = \left(\frac{M_{seca}}{M_{SSS} - M_i} \right) \cdot \rho \quad (11)$$

onde M_i é a massa (g) imersa saturada e ρ é a densidade da água (g/cm³).

3.6.1.2 Ensaio de permeabilidade à água

O dispositivo de ensaio se constitui em um tubo com seção circular, reto, aberto nos extremos, com diâmetro interno de aproximadamente 35 mm e altura suficiente para formar coluna d'água de 250 mm. O tubo é fixado na superfície superior da telha, vedando-se com silicone, preenchido com água, permanecendo desta forma por 24 h, em ambiente coberto e ventilado (UR em torno de 70%). Após esse período, observa-se a face inferior da telha, para visualização de manchas ou formação de gotas. É aceitável, no máximo, o aparecimento de manchas (NBR 13858-2, 1997).

(a)

(b)

Figura 27 – (a) Esquema de ensaio de permeabilidade de telhas (SAVASTANO JÚNIOR, 2000); (b) telhas com os tubos fixados durante o ensaio de permeabilidade.

3.6.1.3 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

A porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) foi realizada com equipamento Micromeritics® Poresizer 9320 (com pressões até 100 kPa). A técnica foi adotada com o objetivo de avaliar a distribuição do diâmetro dos poros de acordo com a intensidade de refino da polpa celulósica, com a adição de fibras sintéticas e com o envelhecimento acelerado das placas planas produzidas.

3.6.2 Caracterizações mecânicas dos compósitos - Tração na flexão

O ensaio de tração na flexão é bastante usado como medida indireta da resistência à tração e da energia específica de materiais fibrosos. Esse ensaio é aconselhável para placas delgadas, pois o carregamento predominante costuma ser o de flexão na maioria das aplicações reais desse material. Além disso, a boa reprodutibilidade e a execução fácil são consideradas as principais razões para a grande aplicação desse ensaio, o que permite a comparação entre resultados de pesquisas análogas (SAVASTANO JÚNIOR, 1992).

Os ensaios mecânicos foram executados em uma máquina de testes universal, Emic® modelo DL-30000 (Figura 28), equipada com célula de carga de 1 kN e 5 kN para as placas planas e telhas corrugadas, respectivamente. Utilizaram-se para a aquisição dos dados o programa M-Tesc v.1.10 e defletoômetro na determinação da deformação. A finalização dos ensaios ocorreu ao se constatar redução de 70% da força máxima de ruptura.

Figura 28 – Equipamento universal de ensaios mecânicos: Emic® modelo DL-30000.

3.6.2.1 Caracterização mecânica das placas planas

A configuração com quatro cutelos (vão inferior igual a 150 mm) e taxa de deflexão de 1,5 mm/min foi empregada para os corpos-de-prova planos (Figura 29), para determinação dos valores de módulo de ruptura (MOR), limite de proporcionalidade (LOP), módulo elástico (MOE) e energia específica (EE) do material. Estas configurações seguiram o procedimento recomendado pelo comitê RILEM 49 TFR (1984) e adaptado por Savastano Júnior (2000), para determinação da energia específica.

(a)

(b)

Figura 29 – (a) Configuração com quatro cutelos para placas planas. (b) Visualização da instalação no equipamento universal de ensaios.

O limite de proporcionalidade (LOP) indica a tensão máxima atingida antes de o material, submetido ao carregamento contínuo, sair do regime elástico. Para o cálculo do LOP de materiais cimentícios reforçados com fibras, baseou-se na recomendação RILEM TC 49 TFR (1984). Para isso, a partir do ensaio de flexão com quatro cutelos, calculou-se LOP com a eq.(12):

$$LOP = \frac{P_1 \cdot L_v}{b \cdot h^2} \quad (12)$$

onde P_1 é a força máxima aplicada (N) antes da curva se desviar da linearidade (ver representação na seção 2.2.1, ponto 1 da Figura 3b), L_v é o espaçamento entre os cutelos inferiores (mm), b é a largura (mm) e h é a espessura do corpo-de-prova (mm).

O módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) para as placas planas foram determinados pelas eq.(13) e eq.(14) respectivamente:

$$MOR = \frac{P \cdot L_v}{b \cdot h^2} \quad (13)$$

$$MOE = \frac{276 \cdot L_v^3}{1296 \cdot b \cdot h^3} \cdot \left(\frac{P}{\delta} \right) \quad (14)$$

onde P é a força máxima (N), L_v é a distância (mm) entre os cutelos de apoio inferiores, b e h são a largura (mm) e espessura dos corpos-de-prova, respectivamente, e δ é a deformação do corpo-de-prova.

A energia específica (tenacidade) é a medida da energia necessária para romper o material. Difere, portanto, da resistência à tração, que é a medida da tensão necessária para provocar o rompimento do material. A energia é o produto de uma força multiplicada pelo deslocamento correspondente. Essa energia para o caso das placas planas é calculada pela integração da curva força-deslocamento e é definida pela energia absorvida dividida pela seção transversal do corpo-de-prova. Os ensaios foram interrompidos após 70% de redução da força em relação ao valor máximo aplicado. A energia específica das placas planas foi determinada pela eq.(15):

$$Energia\ específica = \frac{energia\ absorvida}{b.h} \quad (15)$$

3.6.2.2 Caracterização mecânica das telhas onduladas

Para as telhas onduladas foi utilizada uma configuração de três cutelos (Figura 30) com vão inferior de 350 mm e velocidade de 5 mm/min e determinados os valores de carregamento máximo suportado pelas telhas (FM), flecha na força máxima (FFM), flecha na energia total (FET) e energia total (ET). Os ensaios para telhas também foram interrompidos quando a força diminuiu 70% em relação à força máxima aplicada. Essas configurações seguiram o procedimento experimental adaptado de Gram e Gut (1994). A medida das flechas está representada na Figura 30b.

Figura 30 – (a) Configuração de três cutelos para telhas onduladas. (b) Representação da medição das flechas. (c) Dispositivo de ensaio para telhas onduladas (cutelo se ajustando à ondulação da telha).

3.6.3 Avaliação da Degradação - Fator R

A degradação das placas planas e das telhas foi avaliada com a aplicação da eq.(16) e eq.(17) para cálculo do Fator R conforme descrito na Norma Europeia EN-494. A norma determina que o valor de R seja igual ou superior a 0,7.

$$R_{placas} = \frac{MOR_2 - (0,58 \cdot dp_2)}{MOR_1 + (0,58 \cdot dp_1)} \quad (16)$$

$$R_{telhas} = \frac{FM_2 - (0,58 \cdot dp_2)}{FM_1 - (0,58 \cdot dp_1)} \quad (17)$$

Onde R é o parâmetro de medida de degradação das amostras após um número determinado de ciclos, MOR_1 é a média dos resultados de módulo de ruptura das placas aos 28 dias, MOR_2 é a média dos resultados de módulo de ruptura das placas envelhecidas, FM_1 é a média dos resultados de força máxima das telhas aos 28 dias, FM_2 é a média dos resultados de força máxima das telhas envelhecidas e dp_1 e dp_2 são os respectivos desvios-padrões.

3.6.4 Microscopia eletrônica de varredura

Análises com microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas com equipamento da marca Zeiss® LEO 440, para visualização da superfície de fratura das placas planas e da interface fibra-matriz. As micrografias com imagem de elétrons secundários foram também utilizadas para avaliar as características morfológicas das fibras.

3.7. Comportamento térmico

3.7.1 Avaliação da condutividade térmica pela técnica do fio-quente paralelo

O objetivo foi utilizar uma técnica de medida que possibilitasse a determinação da condutividade térmica dos compósitos de fibrocimento. Dentre as várias técnicas disponíveis para a avaliação da condutividade térmica de materiais refratários, neste trabalho optou-se pela técnica de fio quente paralelo (ISO 8894-2,

1990), pois emprega corpos-de-prova de dimensões representativas (230 x 112 x 59) mm³ e um pequeno gradiente térmico (AKIYOSHI, 2001; SANTOS, 1988).

Os corpos-de-prova prismáticos (paralelepípedos) foram produzidos com placas com as dimensões citadas acima e adensando-as em camadas num molde de madeira até a obtenção da espessura desejada, em torno de 60 mm. Produziram-se paralelepípedos para as formulações S4_7, S3PP1_7 e também para uma formulação com fibras de amianto (10,0% em massa de amianto, 1,7% de celulose, 71,3% de cimento e 17% de calcário), com o objetivo de se avaliar também a condutividade desse material amplamente utilizado na produção comercial de telhas de cobertura.

Os paralelepípedos foram submetidos ao mesmo processo de cura empregado para as telhas e foram ensaiados 40 dias após a moldagem em condições de UR% de equilíbrio. O objetivo de se avaliar os paralelepípedos em condição de equilíbrio foi uma tentativa de se considerar a condição de umidade natural em que o material estaria sujeito no ambiente exposto.

A Figura 31a mostra a representação do arranjo dos paralelepípedos para o ensaio de condutividade térmica. A preparação do arranjo seguiu os procedimentos adotados por Santos (1988). As faces de 112 mm de largura dos paralelepípedos, que ficam em contato com os fios, foram retificadas para garantir a máxima área de contato entre elas. Em uma das faces foram produzidas duas ranhuras longitudinais de 0,5 mm de profundidade para acomodar os fios de platina (0,30 mm de diâmetro). A primeira ranhura ficou localizada no centro do corpo-de-prova e acomodou o fio quente; a segunda ranhura foi produzida na mesma direção, distanciada de 16 mm. Após a colocação do fio quente e do termopar, os sulcos são preenchidos com uma massa feita de pó do próprio material em análise, misturado com 2% de dextrina (Figura 31b). Para proporcionar o melhor contato térmico possível entre as amostras e permitir sua colocação na câmara do forno, os blocos são pressionados um contra o outro, por meio de presilhas de aço (Figura 31c).

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 31 – (a) Representação do arranjo dos paralelepípedos para análise de fio quente. (b) Preparo dos paralelepípedos com a colocação do fio quente e termopar. (c) Avaliação e coleta dos dados à temperatura ambiente. (d) Colocação no forno a 60°C. (e) Avaliação e coleta dos dados dentro do forno. (f) Aparatos utilizados na coleta dos dados (circuito de medida).

O arranjo dos tijolos com o fio quente e o termopar foi avaliado primeiramente à temperatura ambiente em torno de 25°C (Figura 31c) e posteriormente colocado num forno à temperatura de 60°C (Figura 31d e Figura 31e). O objetivo de se utilizar

a temperatura de 60°C foi simular a condição em que as telhas ficam expostas em ambiente natural nas horas mais quentes do dia (em torno das 14 h).

Uma vez atingido o equilíbrio térmico (mínimo de 8 h), o circuito do fio quente é fechado e são registrados os incrementos de temperatura em função do tempo. Os parâmetros fundamentais para que as medidas de condutividade térmica sejam efetuadas na região linear são a potência dissipada pelo fio quente (P) e o tempo máximo de ensaio empregado (t).

A técnica de fio quente é um método absoluto que possibilita a determinação direta da condutividade térmica, uma vez que não necessita de padrões de comparação. Segundo Santos (1988), o modelo teórico no qual a técnica foi concebida considera que o fio quente é uma fonte de calor ideal, longa e fina, que está circundado até o infinito pelo material que se deseja medir. O aumento da temperatura a uma distância (d) conhecida do fio quente pode ser expresso pela eq.(18) pra cálculo da condutividade térmica (k). O calor específico (c) e a difusividade térmica (α) podem ser calculados pelas eq.(19) e eq.(20):

$$k = \frac{V \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left[-\frac{Ei\left(-\frac{\rho_g \cdot c \cdot d^2}{4 \cdot k \cdot t}\right)}{\Delta T(d, t)} \right] \quad (18)$$

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T} \quad (19)$$

$$\alpha_1 = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (20)$$

onde k é a condutividade térmica (W/m.K), V é a tensão aplicada ao fio quente (V), I é a corrente dissipada através do fio quente (A), L é o comprimento do fio quente (m), Ei é a função exponencial integral da forma $\int_x^\infty \frac{e^{-u} du}{u}$, c é o calor específico (J/kg.K), t é o tempo decorrido desde o início da liberação de calor (s), ρ_g é a massa específica volumétrica (kg/m³), d é a distância radial à fonte de calor (m), T é a

temperatura (K), m é a massa do material, Q é a quantidade de energia fornecida (J) e α_l é a difusividade térmica (m^2/s).

3.7.2 Avaliação das temperaturas da superfície inferior das telhas

Foram coletadas as temperaturas da superfície inferior das telhas de fibrocimento sem amianto produzidas neste trabalho, para comparação com dois tipos de telhas bastante utilizados para cobertura de instalações, que são as telhas cerâmicas (tipo "francesa") e as de cimento amianto (6 mm). As temperaturas da superfície inferior das telhas foram obtidas com o auxílio de sensores (termopares) instalados nas telhas no interior da bancada de envelhecimento, conectados a um equipamento de aquisição e armazenamento de dados (*datalogger* HOBO® TMC1-HA - Figura 32a e Figura 32b). Essa avaliação seguiu o procedimento utilizado por Roma Júnior (2004). Foram também monitorados, através da estação meteorológica da FZEA – USP, os dados de temperatura do ar, de velocidade do vento, de pluviosidade e de radiação solar para o período avaliado.

(a)

(b)

Figura 32 – a) Sensor acoplado ao datalogger para aquisição dos dados. b) Datalogger instalado na superfície inferior da telha.

3.8. Análises estatísticas

Estas análises foram aplicadas nos resultados de ensaios físicos e mecânicos das placas e das telhas avaliadas. Foram realizadas segundo o Método de Quadrados Mínimos por meio do procedimento PROC GLM do programa *Statistical Analysis System*, versão 9.1 (SAS, 1995).

3.8.1 Análises estatísticas dos resultados dos ensaios físicos e mecânicos das placas planas

Foi utilizado para as placas planas o delineamento inteiramente casualizado para dados desbalanceados e desdobramento de graus de liberdade em esquema fatorial 2 (tipos de fibras) x 3 (intensidade de refino) x 4 (envelhecimentos).

As observações das características avaliadas nas placas planas (LOP, MOR, MOE, EE, AA, PA e DA) foram descritas de acordo com o modelo de classificação cruzada abaixo eq.(21):

$$y_{pqr} = \mu + F_p + R_q + E_r + FR_{pq} + FE_{pr} + RE_{qr} + FRE_{pqr} + e_{pqr} \quad (21)$$

onde:

y_{pqr} = variável observada no tipo de fibra p , na intensidade de refino (drenabilidade) q e no envelhecimento r ;

μ = constante inerente a todas observações;

F_p = efeito fixo do tipo de fibra p , sendo $p = 1$ (Sisal) e $p = 2$ (Sisal+PP);

R_q = efeito fixo da intensidade de refino (drenabilidade) q , sendo $q = 1$ (CSF 680 mL), $q = 2$ (CSF 220 mL) e $q = 3$ (CSF 20 mL);

E_r = efeito fixo do envelhecimento r , sendo $r = 1$ (28 dias ou 0 ciclos), $r = 2$ (50 ciclos), $r = 3$ (100 ciclos) e $r = 4$ (1 ano);

FR_{pq} = efeito da interação dupla do tipo de fibra p com a intensidade de refino q ;

FE_{pr} = efeito da interação dupla do tipo de fibra p com o envelhecimento r ;

RE_{qr} = efeito da interação dupla da intensidade de refino q com o envelhecimento r ;

FRE_{pqr} = efeito da interação tripla do tipo de fibra p com a intensidade de refino q e com o envelhecimento r ;

e_{pqr} = efeito aleatório residual associado às observações no envelhecimento r , na intensidade de refino q e no tipo de fibra p , com média 0 e variância σ_e^2 .

3.8.2 Análises estatísticas dos resultados dos ensaios físicos e mecânicos das telhas onduladas

Nesta etapa do experimento, como a espessura das telhas foi uma variável contínua que influenciou as variáveis dependentes (propriedades das telhas), foi utilizado um modelo de classificação hierárquica para dados desbalanceados, com auxílio de co-variável (espessura).

As observações das características avaliadas nas telhas (CM, FCM, FET, ET, AA, PA e DA) foram descritas de acordo com o seguinte modelo hierárquico, como descrito pela eq.(22):

$$y_{prs} = \mu + F_p + EF_{r(p)} + b_1(h_{rs(p)} - \bar{h}) + e_{rs(p)} \quad (22)$$

onde:

y_{prs} = variável observada no envelhecimento r dentro do tipo de fibra p ;

μ = constante inerente a todas observações;

F_p = efeito fixo da tipo de fibra p , sendo $p = 1$ (S4_7), $p = 2$ (S3PP0_5), $p = 3$ (S3PP1) e $p = 4$ (S3PP1_7);

$EF_{r(p)}$ = efeito fixo do envelhecimento r dentro do tipo de fibra p , sendo $r = 1$ (28 dias ou sem envelhecimento), $r = 2$ (100 ciclos), $r = 3$ (calor-chuva), $r = 4$ (carbonatação+100 ciclos), $r = 5$ (autoclavada) e $r = 6$ (autoclavada+100 ciclos) para $p = 1$; ou $r = 1, 2, 3$ e 4 para $p = 2$; ou $r = 1$ e 2 para $p = 3$; ou $r = 1, 2, 3$ e 4 para $p=4$;

b_1 = coeficiente de regressão linear da característica y_{prs} em relação à espessura das telhas;

h_{prs} = espessura da telha s , em milímetros, observada no tipo de fibra p com o envelhecimento r ;

$\bar{h}$ = média das espessuras das telhas avaliadas; e

$e_{(rs)p}$ = efeito aleatório residual associado às observações, no envelhecimento $\underline{r}$ no tipo de fibra $\underline{p}$, com média 0 e variância σ^2_e .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Refino e caracterização das fibras

As propriedades morfológicas das polpas determinadas por microscopia óptica estão descritas na Tabela 8. Nesta análise, somente fibras inteiras foram consideradas com o propósito de avaliar as dimensões das fibras não danificadas. Embora praticamente não tenham sido encontradas diferenças significativas, houve tendência de diminuição das variáveis relacionadas com o aumento da intensidade de refino.

Tabela 8 – Caracterização morfológica de fibras inteiras por meio de microscopia óptica.

Polpa CSF (mL)	Comprimento médio (mm)	Largura média (μm)	Largura do lúmen (μm)	Espessura da parede celular (μm)
680	$2,6 \pm 0,7$	$21,3 \pm 4,9$	$9,5 \pm 4,9$	$5,9 \pm 1,1$
220	$2,6 \pm 0,6$	$21,0 \pm 4,0$	$9,1 \pm 4,0$	$6,0 \pm 1,2$
20	$2,3 \pm 0,6$	$19,7 \pm 4,1$	$9,0 \pm 3,3$	$5,4 \pm 1,1$

A redução da espessura da parede celular das fibras pode estar associada com a gradual abertura da camada externa das fibras, o que aumenta com os maiores níveis de refino (MCKENZIE, 1994). As fibras também se tornam achatadas, o que explica a diminuição da largura do lúmen nas polpas intensamente refinadas. As modificações físicas causadas pelas diferentes intensidades de refino podem ser visualizadas na Figura 33.

Figura 33 – Micrografias ópticas nas diferentes intensidades de refino: (a) e (b) polpa não refinada (CSF 680 mL); (c) e (d) polpa submetida ao refino intermediário (CSF 220 mL); (e) e (f) polpa com a maior intensidade de refino.

O maior grau de refino (Figura 33e e Figura 33f) apresenta fibras mais fibriladas. A fibrilação afeta a retenção do material particulado do cimento (finos) durante o processo de fabricação, com reflexo direto no desempenho dos compósitos.

A análise microscópica mostra o efeito do refino sobre a polpa celulósica e como este afeta a morfologia das fibras. Entretanto, isto não reflete as características do conteúdo total de polpa celulósica (todo o material fibroso), pois somente as fibra inteiras foram consideradas.

A caracterização do material fibroso, ou seja, fibras inteiras e fibras danificadas, feita através do equipamento Galai CIS-100, mostra a morfologia geral da polpa. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Características físicas da polpa de sisal (todo o material fibroso) após o refino, obtidas pelo equipamento Galai CIS-100 ^a.

Polpa CSF (mL)	Comprimento médio (mm)	Largura média (μm)	Razão de aspecto	Coarseness (mg/100 m)	Material fibroso (fibras/g)	Conteúdo de finos (%)
680	$1,66 \pm 0,02$	$22,2 \pm 0,5$	75	$12,82 \pm 0,12$	$4,69 \pm 0,02$	$26,2 \pm 1,2$
220	$1,13 \pm 0,05$	$18,7 \pm 0,2$	60	$9,99 \pm 0,61$	$8,88 \pm 0,93$	$40,6 \pm 1,3$
20	$0,79 \pm 0,01$	$20,0 \pm 0,3$	40	$8,06 \pm 0,10$	$15,64 \pm 0,17$	$42,0 \pm 0,7$

^a Análises realizadas pelo Laboratório de Celulose e Papel, do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, MG.

Os resultados na Tabela 9, diferentemente daqueles mostrados na Tabela 8, indicam mais claramente o efeito do refino sobre as fibras presentes na polpa. O comprimento médio foi a característica mais afetada, com um decréscimo de até 52% para maior intensidade de refino (CSF 20 mL), seguido da razão de aspecto e do “coarseness”, com reduções em torno de 40% e de 30% respectivamente. Não houve alteração significativa no valor da largura média. O material fibroso por grama e conteúdo de finos aumentaram 233% e 60% respectivamente. A distribuição de comprimentos e de larguras das fibras inteiras (análise microscópica) bem como do material fibroso (análise pelo Galai CIS-100) podem ser vistas na Figura 34 e na Figura 35 respectivamente.

Savastano Júnior, Warden e Coutts (2000) estudaram polpa de sisal *Kraft* originada de resíduos da fibra de sisal com CSF 650 mL apresentando comprimento médio de fibras de 1,65 mm, largura média de 13,5 μm e razão de aspecto de 122. Observa-se que o comprimento médio da polpa CSF 680 mL (Tabela 9) apresenta um valor próximo ao encontrado por aqueles pesquisadores, enquanto que a largura média é maior e, como consequência, apresenta uma menor razão de aspecto.

A redução do comprimento médio e do “*coarseness*” é uma consequência da intensidade do refino, que está também relacionada com o aumento do conteúdo de finos. O “*coarseness*” representa a quantidade de massa por unidade de comprimento e seu decréscimo está relacionado com o fato de as camadas externas da fibra serem removidas pelo tratamento mecânico da polpa. A definição de finos da polpa representa o conteúdo de fibras menores que 0,074 mm de comprimento e, conseqüentemente, com a baixa capacidade de reforço na matriz.

Figura 34 – Distribuição de comprimento médio das fibras inteiras e do material fibroso.

De acordo com a Figura 34, para a situação em que as fibras não foram refinadas (CSF 680 mL), ou para o refino intermediário (CSF 220 mL), a maioria das fibra inteiras está na região entre 2,0 e 3,0 mm. A distribuição de comprimento médio é extensa na região do menor comprimento (1,5 e 2,0 mm) para o nível de maior refino (CSF 20 mL). O refino aumentou a porção de material fibroso com comprimento de 0 – 1,5 mm em 50% para a polpa com maior nível de refino, com conseqüente decréscimo da porção com maiores comprimentos.

Figura 35 – Distribuição da largura das fibras inteiras e do material fibroso.

A distribuição da largura média (Figura 35) não foi afetada pelo refino ao se considerarem fibras inteiras. As curvas são praticamente coincidentes e a maioria das fibras inteiras está na região entre 15 e 25 μm . Para o material fibroso, a maioria das fibras está situada na região entre 5 e 15 μm . Neste caso, a presença de fibras curtas é significativa, com implicações na razão de aspecto, como discutido anteriormente.

A Figura 36 apresenta as micrografias das polpas realizadas com microscopia eletrônica de varredura (MEV) e traz detalhes do arrancamento das camadas da fibra com o refino.

Figura 36 – Micrografias de fibras nas diferentes intensidade de refino: (a) ausência de fibrilação (CSF 680 mL); (b) arrancamento em espiral da parede primária (CSF 220 mL); (c) fibrilação (CSF 220 mL); (d) remoção completa da parede primária (CSF 220 mL); (e) fibras após corte intensivo e arrancamento das fibrilas (CSF 20 mL); (f) detalhe da diminuição do diâmetro da fibra com o refino excessivo (CSF 20 mL).

Após o refino, o arrancamento da parede primária foi predominante (Figura

36b), provavelmente pelo fato desta ser reticulada e por já estar fragilizada com o processo de polpação *Kraft*. Tal processo ataca a lignina na lamela média e a hemicelulose, presente principalmente na parede primária da célula fibrosa, como detalhado na secção 2.3.3. Para as maiores intensidades (CSF 20mL), essas paredes que estavam destacadas das fibras são parcialmente arrancadas (Figura 36d) e passam a compor a fração de finos da polpa celulósica.

4.2. Resultados dos ensaios físicos dos compósitos (placas)

Os resultados da análise estatística para as propriedades físicas estão apresentados na Tabela 10. Foram encontradas interações significativas ($\alpha = 0,01$) entre as três variáveis avaliadas (tipo de fibra – p , intensidade de refino – q , envelhecimento – r) para a absorção de água (AA) e para a porosidade aparente (PA). No caso da densidade aparente (DA) somente foi encontrada interação dupla entre o tipo de fibra utilizado (p) e a intensidade de refino (q).

A densidade aparente (DA) dos compósitos aumentou significativamente com o refino da polpa (Tabela 10). A dificuldade na compactação do compósito com as polpas não refinadas (SS-680 e SP-680) pode ser definida como a responsável pelo maior conteúdo de ar, ou porosidade, e menor DA. Para compósitos contendo polpa refinada, maiores valores de DA foram obtidos para SS-220 e SP-20. Como comentado nas seções anteriores, estes resultados podem ser atribuídos à fibrilação gerada pelo refino, que melhora o empacotamento do compósito.

Tabela 10 – Médias e desvio-padrão para absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA) de placas planas nas três intensidades de refino (q) com e sem fibras de polipropileno, nos diversos envelhecimentos (r).^{*}

ρ (fibra)	q (CSF mL)	r (envelhecimento)	AA (%)	PA (%)	DA (g/cm ³)
SISAL	680	28 dias	20,5 ± 2,0 ^{Aa}	33,1 ± 1,5 ^{Aa}	1,62 ± 0,08 ^{Cb *}
		50 ciclos	15,1 ± 0,8 ^{Ca}	25,1 ± 1,0 ^{Cb}	1,68 ± 0,07 ^{AB b *}
		100 ciclos	14,8 ± 1,3 ^{Ca}	24,5 ± 2,0 ^{Ca *}	1,66 ± 0,05 ^{BC b}
		1ano	16,8 ± 1,6 ^{Ba *}	28,8 ± 1,9 ^{Ba *}	1,72 ± 0,06 ^{Ab}
	220	28 dias	19,7 ± 0,9 ^{Aa}	33,6 ± 0,8 ^{Aa}	1,71 ± 0,04 ^{Ca *}
		50 ciclos	15,5 ± 1,3 ^{Ba}	27,3 ± 1,0 ^{Ba}	1,76 ± 0,08 ^{Ba *}
		100 ciclos	10,5 ± 0,9 ^{Db}	18,9 ± 1,0 ^{Db}	1,81 ± 0,06 ^{Aa *}
		1ano	13,6 ± 2,2 ^{Cb}	24,5 ± 3,4 ^{Cb}	1,81 ± 0,04 ^{Aa *}
	20	28 dias	20,3 ± 0,7 ^{Aa}	33,7 ± 0,6 ^{Aa}	1,66 ± 0,02 ^{Bb}
		50 ciclos	15,7 ± 1,0 ^{Ba}	26,7 ± 1,6 ^{Ba}	1,70 ± 0,03 ^{AB b}
		100 ciclos	14,4 ± 1,1 ^{BC a}	24,0 ± 1,1 ^{Ca}	1,71 ± 0,01 ^{AB b}
		1ano	13,1 ± 0,9 ^{Cb}	22,8 ± 1,4 ^{Cc}	1,73 ± 0,01 ^{Ab}
SISAL+PP	680	28 dias	21,1 ± 1,3 ^{Aa}	32,8 ± 1,1 ^{Aa}	1,56 ± 0,04 ^{Cb}
		50 ciclos	19,2 ± 3,0 ^{Ba *}	31,5 ± 2,0 ^{Aa *}	1,61 ± 0,09 ^{Bb}
		100 ciclos	13,6 ± 2,4 ^{Cb}	22,9 ± 3,2 ^{Cb}	1,69 ± 0,07 ^{Aa}
		1ano	15,0 ± 0,9 ^{Ca}	26,1 ± 1,4 ^{Ba}	1,73 ± 0,02 ^{Aa}
	220	28 dias	20,9 ± 0,7 ^{Aa *}	33,5 ± 0,6 ^{Aa}	1,61 ± 0,03 ^{Bb}
		50 ciclos	18,5 ± 2,0 ^{Ba *}	29,9 ± 2,4 ^{Ba *}	1,62 ± 0,05 ^{Bb}
		100 ciclos	15,1 ± 1,7 ^{Ca *}	25,4 ± 2,1 ^{Da *}	1,68 ± 0,05 ^{Aa}
		1ano	16,3 ± 0,9 ^{Ca *}	27,7 ± 1,0 ^{Ca *}	1,71 ± 0,04 ^{Aa}
	20	28 dias	20,4 ± 0,8 ^{Aa}	33,5 ± 0,7 ^{Aa}	1,64 ± 0,03 ^{Ba}
		50 ciclos	16,7 ± 0,7 ^{Bb}	27,9 ± 0,8 ^{Bb}	1,67 ± 0,04 ^{AB a}
		100 ciclos	15,5 ± 1,0 ^{Ba}	26,3 ± 1,4 ^{Ca *}	1,71 ± 0,01 ^{Aa}
		1ano	13,6 ± 1,4 ^{Cb}	23,2 ± 2,2 ^{Db}	1,70 ± 0,02 ^{Aa}

* Letras diferentes indicam diferenças significativas, sendo que letras maiúsculas (A, B, C e D) na mesma coluna representam comparações entre os envelhecimentos dentro da mesma série (fixando o tipo de fibra e a intensidade de refino); letras minúsculas (a, b e c) na mesma coluna representam comparações entre as intensidades de refino (fixando o tipo de fibra e o envelhecimento); * indicam diferenças significativas entre os tipos de fibra (fixando a intensidade de refino e o envelhecimento).

A adição de fibras de PP diminuiu a densidade (DA) dos compósitos em relação aos reforçados somente com polpa de sisal. Este fato está diretamente relacionado com a substituição da fração da matriz (ρ em torno de 2,6 g/cm³) e das fibras celulósicas (ρ em torno de 1,5 g/cm³) por fibras de PP (ρ em torno de 0,9 g/cm³).

Apesar das maiores densidades (DA) dos compósitos com polpas refinadas, diferenças significativas na absorção de água (AA) e na porosidade aparente (PA)

não foram observadas pela comparação entre diferentes intensidades de refino. Esse comportamento leva a concluir que poros não permeáveis estão presentes nesses compósitos e não são detectados pelo princípio de Arquimedes utilizado na determinação dessas propriedades.

Maior absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) em alguns casos com reforço híbrido (SP-220) é uma provável consequência dos capilares associados à dificuldade de empacotamento pela adição de fibras sintéticas longas e hidrofóbicas como reportado também por Bentur e Mindess (1990). Essa dispersão deficiente pode ser a responsável pelo baixo desempenho nas idades iniciais e pode ser observada na Figura 37 (seta), onde a superfície deixada na matriz após o arrancamento das fibras de PP revela que as fibras estavam juntas formando um feixe em uma mesma região da matriz.

Figura 37 – Micrografia da superfície de fratura de compósito híbrido com fibras de PP e polpa CSF 220 mL (seta - detalhe da superfície na matriz deixada pelo arrancamento das fibras de PP).

Para todas as séries, o envelhecimento aumentou significativamente a densidade aparente (DA) e diminuiu a absorção de água e a porosidade aparente. Esse comportamento pode ser atribuído à formação de produtos de hidratação ao redor das fibras celulósicas e de PP após o envelhecimento. Segundo Hannant e Highes (1986) observa-se também um efeito cicatrizante (com a presença de umidade) nas fissuras formadas nas fases iniciais, com seu preenchimento por produtos de hidratação. Essas hipóteses são também discutidas nas seções seguintes.

4.2.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

A Figura 38 mostra o comportamento da distribuição de poros dos compósitos com polpa em diferentes intensidades de refino. Picos na região em torno de 800 nm são supostamente relacionados com as fibras celulósicas, como paralelamente discutido por Nita et al. (2004), que refere-se aos poros em torno de 300 nm como aqueles provocados pela adição de fibras celulósicas.

Mehta e Monteiro (1994) mostraram intrusão de mercúrio similar às do presente experimento, em torno de 0,05 mL/g, para poros ao redor de 60 nm em argamassas sem fibras com a mesma relação água/cimento. De acordo com essa afirmação, os picos entre 6 e 100 nm nos gráficos abaixo são relacionados com os poros típicos da matriz cimentícia formados durante a hidratação. Grandes poros (maiores que 1500 nm) podem ser observados nos compósitos com fibras não refinadas (Figura 38). O refino da polpa celulósica causou a diminuição do diâmetro dos poros na região atribuída às fibras celulósicas, como evidenciado pela mudança do pico que está na região entre 700 e 3000 nm para compósitos com polpa não refinada, para a região entre 700 e 1000 nm nos compósitos com polpa refinada. A ausência de fibrilação permitiu o descolamento das fibras na interface com a matriz durante a retração pela perda de água, o que pode gerar espaços vazios na zona de transição da ordem de 2000 nm (Figura 43d e Figura 43e). Nos compósitos com polpa refinada, as microfibrilas ancoraram as fibras na matriz e reduziram o descolamento durante a retração, evitando grandes espaços vazios na interface.

Figura 38 – Distribuição do diâmetro equivalente de poros em compósitos reforçados somente com sisal aos 28 dias (sem envelhecimento).

A Figura 39 apresenta o efeito da adição das fibras de PP na distribuição do tamanho de poros em relação aos compósitos reforçados somente com polpa de sisal. Nota-se que a curva para SP-220 assemelha-se à curva para compósito com polpa não refinada (SS-680) apresentada na Figura 38, com incidência de poros maiores (na região entre 700 e 3000 nm). Esse comportamento pode ser atribuído à deficiência na dispersão dos filamentos longos de PP.

Figura 39 – Distribuição do tamanho de poros em compósitos reforçados somente com sisal e com sisal+PP aos 28 dias.

O efeito do envelhecimento foi observado nos compósitos com polpa refinada (CSF 220 mL) com e sem adição de fibras de PP. As diferenças no comportamento da distribuição de poros foram evidenciadas principalmente para os poros abaixo de 100 nm (Figura 40 e Figura 41). Produtos da hidratação foram formados com o envelhecimento acelerado de 100 ciclos e promoveram a diminuição dos poros da matriz. Resultado similar foi encontrado por Mehta e Monteiro (1994). Poros maiores atribuídos às fibras (em torno de 1000 e 2000 nm) não foram afetados significativamente pelos ciclos de molhagem e secagem.

Figura 40 – Distribuição do tamanho de poros em compósitos reforçados somente com sisal, aos 28 dias e após 100 ciclos.

Figura 41 – Distribuição do tamanho de poros em compósitos reforçados com sisal+PP, aos 28 dias e após 100 ciclos.

4.3. Resultados dos ensaios mecânicos das placas planas

Os resultados da análise estatística para as propriedades mecânicas dos compósitos planos estão apresentados na Tabela 11. Foram encontradas interações significativas ($\alpha = 0,05$) entre as três variáveis avaliadas (tipo de fibra – $\underline{p}$, intensidade de refino – $\underline{q}$, envelhecimento – $\underline{r}$) para todas as propriedades mecânicas (limite de proporcionalidade - LOP, módulo de ruptura - MOR, módulo elástico - MOE e energia específica - EE). Esse comportamento demonstra que as variáveis avaliadas não atuam independentemente.

4.3.1 Efeito do refino da polpa de sisal nas placas planas

As curvas tensão-deformação dos compósitos contendo polpa de sisal com diferentes intensidades de refino são apresentadas na Figura 42. As amostras foram submetidas a 50 e 100 ciclos de molhagem e secagem e 1 ano de envelhecimento natural.

Figura 42 – Curvas tensão-deformação para compósitos com polpa de sisal nas três intensidades de refino (CSF 20, 220 e 680 mL): (a) sem envelhecimento; (b) 50 ciclos; (c) 100 ciclos; (d) envelhecimento natural por 1 ano.

O limite de proporcionalidade (LOP) representa a região elástica da curva tensão-deformação e também está relacionado com a resistência máxima do compósito antes da curva perder a linearidade. Compósitos com polpa refinada apresentaram os maiores valores de LOP aos 28 dias, devido à melhor aderência das fibras com a matriz, não apresentando diferenças significativas entre as intensidades de refino após os 100 ciclos de envelhecimento. O envelhecimento mostrou causar aumento do LOP tanto dos compósitos com polpa refinada quanto não refinada, que pode estar relacionado com a densificação do compósito e com a melhora na aderência da fibra. O comportamento mecânico dos compósitos curados aos 28 dias foi similar ao encontrado por Mohr, Nanko e Kurtis (2005), porém, após os ciclos de envelhecimento, os autores encontraram queda de aproximadamente 50% no LOP e atribuíram esse comportamento à fragilização das fibras devido à sua mineralização.

Os compósitos com o maior e o menor nível de refino não apresentaram

diferença significativa no MOR (Tabela 11) aos 28 dias (sem envelhecimento). Para os compósitos com a polpa mais refinada aos 28 dias, o encurtamento das fibras e a geração de maior conteúdo de finos (42,0% para CSF 20 mL, Tabela 9), que é aproximadamente 2 vezes maior do que o da polpa não refinada (CSF 680 mL), causaram a baixa capacidade de reforço da polpa celulósica nas idades iniciais. Embora a polpa com intensidade de refino intermediária (CSF 220 mL) tenha também apresentado um elevado conteúdo de finos (40,6%) próximo ao da polpa mais refinada, houve um significativo aumento no valor de MOR do compósito aos 28 dias. Este comportamento pode ser atribuído ao ótimo nível de adesão e empacotamento das fibras com a matriz cimentícia para a intensidade intermediária e devido à preservação da razão de aspecto das fibras em torno de 60. Este resultado para compósitos aos 28 dias confirma a necessidade de evitar o corte excessivo e encurtamento (COUTTS, 2005) das fibras durante o processo de refino.

Porém, após envelhecimento, os resultados demonstram um comportamento diferente. Em geral, o MOR aumentou significativamente com o envelhecimento para todas as intensidades de refino, pela melhor aderência com a densificação da interface com a matriz (BENTUR, 1989) e conseqüentemente pelo aumento da força necessária para rompimento das fibras (Figura 43b, Figura 43e, Figura 43f; Figura 44c e Figura 45a). Os resultados concordam com aqueles obtidos por Soroushian, Marikunte e Won (1994) usando ambos polpa *Kraft* virgem refinada como polpa de pinus reciclada. Nesta investigação, um estudo microestrutural confirmou que a precipitação dos produtos de hidratação nas zonas de interface é um dos principais mecanismos de fragilização dos compósitos e responsáveis pelo aumento da resistência à flexão com repetidos ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 11 – Valores médios e os respectivos desvios-padrões das propriedades mecânicas: limite de proporcionalidade (LOP), módulo de ruptura (MOR), módulo elástico (MOE) e energia específica (EE) dos compósitos com polpa nas três intensidades de refino ($\underline{q}$) com e sem fibras de polipropileno ($\underline{p}$), e ainda, com os envelhecimentos acelerados e o natural ($\underline{r}$).^{*}

$\underline{p}$ (fibra)	$\underline{q}$ (CSF mL)	$\underline{r}$ (envelhecimentos)	LOP (MPa)	MOR (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/mm ²)
SISAL	680	28 dias	3,4 ± 1,3 ^{C b}	6,2 ± 1,9 ^{B b *}	14,2 ± 2,0 ^{B a *}	1,43 ± 0,68 ^{A a}
		50 ciclos	4,2 ± 0,4 ^{BC b}	7,2 ± 1,2 ^{AB b}	25,2 ± 8,4 ^{A a *}	0,22 ± 0,14 ^{B a}
		100 ciclos	6,6 ± 2,5 ^{A a}	7,9 ± 0,9 ^{A b}	16,7 ± 2,2 ^{B b}	0,41 ± 0,38 ^{B ab}
		1ano	5,0 ± 2,0 ^{AB c}	6,2 ± 1,9 ^{B c}	18,3 ± 4,4 ^{B ab}	0,05 ± 0,03 ^{B b}
	220	28 dias	6,0 ± 1,2 ^{B a}	8,0 ± 1,3 ^{B a}	16,3 ± 2,2 ^{B a}	0,89 ± 0,39 ^{A b}
		50 ciclos	7,0 ± 2,6 ^{AB a}	9,4 ± 1,6 ^{AB a}	24,3 ± 8,0 ^{A a}	0,14 ± 0,05 ^{B a}
		100 ciclos	6,8 ± 2,9 ^{AB a}	8,1 ± 2,7 ^{B b}	22,3 ± 7,8 ^{A a *}	0,11 ± 0,09 ^{B b}
		1ano	8,3 ± 2,8 ^{A b}	9,7 ± 2,5 ^{A b}	21,9 ± 2,8 ^{A a *}	0,46 ± 0,36 ^{AB b}
	20	28 dias	5,3 ± 0,7 ^{C a}	6,3 ± 1,1 ^{C b}	15,8 ± 1,8 ^{B a}	0,12 ± 0,04 ^{B c}
		50 ciclos	5,8 ± 1,0 ^{BC ab *}	10,7 ± 1,0 ^{B a *}	22,3 ± 4,1 ^{A a *}	0,15 ± 0,02 ^{B a}
		100 ciclos	7,3 ± 2,2 ^{B a}	10,4 ± 1,1 ^{B a}	21,6 ± 7,7 ^{A ab *}	0,76 ± 0,26 ^{A a}
		1ano	12,2 ± 1,3 ^{A a *}	12,6 ± 1,2 ^{A a *}	16,4 ± 1,3 ^{B b}	0,96 ± 0,48 ^{A a}
SISAL+PP	680	28 dias	1,9 ± 1,2 ^{B b}	4,5 ± 2,0 ^{C b}	10,1 ± 4,0 ^{B b}	1,72 ± 0,90 ^{C b}
		50 ciclos	4,5 ± 1,8 ^{A b}	6,2 ± 1,5 ^{B b}	13,3 ± 2,1 ^{AB b}	2,51 ± 0,28 ^{AB a *}
		100 ciclos	7,6 ± 0,3 ^{A b}	7,6 ± 0,3 ^{A b}	16,0 ± 3,6 ^{A a}	2,87 ± 0,36 ^{A a *}
		1ano	6,8 ± 0,2 ^{A a *}	7,7 ± 0,7 ^{A b *}	14,7 ± 2,1 ^{A a}	2,13 ± 0,62 ^{B b *}
	220	28 dias	5,9 ± 0,9 ^{A a}	8,5 ± 0,6 ^{A a}	13,1 ± 1,7 ^{B b}	3,32 ± 0,28 ^{A a *}
		50 ciclos	6,2 ± 2,0 ^{A a}	8,7 ± 1,7 ^{A a}	19,8 ± 6,4 ^{A a}	2,78 ± 0,88 ^{B a *}
		100 ciclos	7,6 ± 1,1 ^{A ab}	8,3 ± 1,6 ^{A b}	15,8 ± 2,0 ^{B a}	2,85 ± 0,31 ^{B a *}
		1ano	7,0 ± 1,7 ^{A a}	8,7 ± 1,5 ^{A ab}	15,9 ± 2,7 ^{AB a}	2,73 ± 0,34 ^{B a *}
	20	28 dias	6,7 ± 1,8 ^{A a *}	8,2 ± 1,5 ^{B a *}	17,8 ± 4,8 ^{A a}	2,81 ± 0,74 ^{A a *}
		50 ciclos	4,9 ± 2,1 ^{B ab}	6,9 ± 2,1 ^{C b}	15,7 ± 3,7 ^{A b}	1,85 ± 0,89 ^{B b *}
		100 ciclos	7,8 ± 2,5 ^{A a}	10,1 ± 1,1 ^{A a}	16,4 ± 2,2 ^{A a}	3,03 ± 0,34 ^{A a *}
		1ano	6,6 ± 2,0 ^{A a}	9,6 ± 1,1 ^{AB a}	15,4 ± 2,7 ^{A a}	2,90 ± 0,77 ^{A a *}

^{*} Letras diferentes indicam diferenças significativas, sendo que letras maiúsculas (A, B, e C) na mesma coluna representam comparações entre os envelhecimentos dentro da mesma série (fixando o tipo de fibra e a intensidade de refino); letras minúsculas (a, b e c) na mesma coluna representam comparações entre a mesma intensidade de refino (fixando o tipo de fibra e o envelhecimento); * indicam diferenças significativas entre os tipos de fibra (fixando a intensidade de refino e o envelhecimento).

Para o MOR, o compósito contendo polpa com maior refino apresentou o melhor resultado, com um aumento de 65% e 100%, quando comparados após 100 ciclos e 1 ano de envelhecimento natural, respectivamente, em relação com o correspondente antes do envelhecimento.

Os resultados para MOE demonstraram serem semelhantes estatisticamente entre as intensidades de refino, independentes do envelhecimento. O envelhecimento causou aumento desta propriedade e está associado com o aumento da resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Resultados semelhantes foram encontrados na literatura (SAVASTANO JÚNIOR; WARDEN; COUTTS, 2000; SOROUSHIAN; MARIKUNTE; WON, 1994).

Compósitos contendo polpa com alto grau de refino (CSF 20 mL) apresentaram um significativo decréscimo de pelo menos 85% na energia específica quando comparados com compósitos contendo polpa não refinada (CSF 680 mL), como poder ser observado na Tabela 11 para 28 dias de cura. De acordo com Soroushian e Marikunte (1992), fibras com excesso de ligações tendem a romper ao invés de serem arrancadas com atrito da matriz.

A energia específica está correlacionada com o comprimento do material de reforço. O descolamento da fibra na matriz durante a aplicação da força gera um grande atrito na interface dessas duas fases, ou seja, quanto maior o comprimento da fibra maior será o trabalho para fraturar completamente o compósito (SAVASTANO JÚNIOR; WARDEN; COUTTS, 2003). É importante ressaltar que este fenômeno foi observado em compósitos sem envelhecimento acelerado ou natural.

No presente trabalho, observou-se que com as fibras celulósicas fibriladas a ancoragem na matriz cimentícia é melhorada, a fratura dessas fibras prevalece sobre o arrancamento com atrito e, conseqüentemente, a energia específica diminui para os compósitos com 28 dias de cura, sem envelhecimento. Como previamente discutido, o excesso de encurtamento das fibras na polpa refinada também pode contribuir para o decréscimo da capacidade de reforço. Isto pode ser observado nos valores de módulo de ruptura (MOR) apresentados na Tabela 11. O comportamento mecânico frágil e a redução na capacidade de deformação do compósito antes da fratura, como pode ser notado na Figura 42a.

Nos compósitos com polpa não refinada (SS-680) aos 28 dias, é predominante a incidência de arrancamentos em torno de 200 μm . Apesar de não refinadas, pode-se observar na Figura 43a que as fibras apresentam partículas de

até 20 μm aderidas à superfície após o arrancamento, o que mostra a importância da fibrilação na ancoragem da fibra na matriz. Resultados de literatura similares mostraram a mesma performance, onde compósitos com fibras de madeira não refinada exibiram, aos 28 dias, maior energia específica quando comparadas com compósitos com fibras refinadas (COUTTS, 1984).

Na Figura 43, observa-se que as fibras não refinadas mesmo após os envelhecimentos parecem pouco danificadas e que o arrancamento com atrito é menos incidente, em detrimento da fratura das fibras. As fibras apresentam-se descoladas da matriz (espaços vazios de até 3 μm na interface), o que nos remete a concluir que estão mais suscetíveis às movimentações higroscópicas e retrações dentro da matriz pela ausência de fibrilação. John, Agopyan e Prado (1998) também apontaram que os danos generalizados na interface podem ser progressivamente gerados pela variação higroscópica do volume das fibras vegetais dentro da matriz cimentícia, daí a queda nas propriedades mecânicas dos compósitos a longo prazo.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 43 – Micrografias das superfícies de fratura dos compósitos reforçados somente com sisal (CSF 680 mL): (a) predominância de arrancamento das fibras (200 μm) aos 28 dias; (b) menor comprimento de arrancamento aos 100 ciclos (50 μm); (c) 100 ciclos, descolamento das fibras não refinadas; (d) 100 ciclos, fibras pouco aderidas permitem grande variação higroscópica (interface de 3 μm); (e) 100 ciclos, fratura da fibra e descolamento na interface; (f) envelhecimento natural, fratura da fibra, baixa aderência e ausência de fibrilação.

Com relação aos compósitos com refino intermediário (CSF 220 mL), após envelhecimento de 100 ciclos, observa-se na Figura 44a e na Figura 44b predominância de rompimento das fibras. Na Figura 44c observa-se o suposto preenchimento da interface com produtos de hidratação.

Figura 44 – Micrografias das superfícies de fratura dos compósitos com polpa CSF 220 mL aos 100 ciclos de envelhecimento: (a) predominância de fratura das fibras; (b) detalhe da fratura das fibras; (c) preenchimento da interface fibra-matriz com produtos de hidratação.

Na Figura 45a e na Figura 45b, as fibras podem ser vistas mais intimamente ligadas à matriz cimentícia nos compósitos com o maior refino (CSF 20 mL). A Figura 45b e a Figura 45c mostram claramente que a camada externa da fibra foi parcialmente removida, confirmando a forte ligação entre os componentes do compósito. Na Figura 45d e na Figura 45e, as camadas primárias permaneceram aderidas na matriz, enquanto que o restante da fibra foi arrancado.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 45 – Micrografias das superfícies de fratura dos compósitos reforçados com polpa refinada à CSF 20 mL: (a) 100 ciclos, fibra bem aderida à matriz; (b) camadas primária soltando-se da fibra; (c) fibra se soltando da camada primária bem aderida à matriz; (d) envelhecimento natural, camada primária ficou aderida à matriz; (e) 100 ciclos, fibra é arrancada e deixa camada primária aderida à matriz; (f) 100 ciclos.

A energia específica diminuiu em torno de 75% após 100 ciclos e envelhecimento natural, para os compósitos com polpas não refinadas e refinadas (drenabilidade CSF 220mL). O aumento das ligações fibra-matriz explica a diminuição da energia específica devido à menor dissipação de energia na fratura dos compósitos. Nos estudos desenvolvidos por Bentur e Akers (1989), Gram (1983) e Soroushian e Marikunte (1992) envelhecimentos acelerados de molhagem e secagem também causaram quedas na energia específica de compósitos reforçados com fibras.

Diferente comportamento mecânico foi observado para compósitos com polpas celulósicas (SS-20) submetidas ao maior nível de refino. A energia específica aumentou em torno de 500%, após 100 ciclos de envelhecimento, e 700%, após envelhecimento natural de 1 ano. Este comportamento também foi reportado por Mohr, Nanko e Kurtis (2005) em compósitos com polpa refinada; a energia específica aumentou entre 2 a 32%, após o envelhecimento acelerado de molhagem e secagem de 25 ciclos, em relação àqueles submetidos ao envelhecimento de 15 ciclos.

Algumas hipóteses podem explicar o aumento da energia específica após o envelhecimento. Considera-se que as camadas externas das fibras muito refinadas estão firmemente aderidas à matriz (Figura 45c, Figura 45d e Figura 45e), com energias de ligação mais fortes do que entre as camadas interiores da fibra (Figura 36b e Figura 36d). A alta aderência entre as fases pode promover neste caso o arrancamento entre microfibrilas das camadas. Esse processo também pode gerar atrito na transferência da tensão entre as microfibrilas, devido à degradação química causada pelo cimento preferencialmente à lignina e hemicelulose que unem as microfibrilas e as camadas. Apesar de o comprimento de arrancamento ser menor (em torno de 30 μm), a energia gasta durante o atrito para o arrancamento de partes das fibras é significativa em relação às idades anteriores, onde as ligações ainda eram muito eficientes entre os componentes da fibra. Na Figura 45d e na Figura 45e observa-se claramente que a camada primária ficou fortemente aderida na matriz, com ligações até mesmo mais fortes que entre as camadas da fibra, talvez pela disposição reticuladas das microfibrilas.

Outro mecanismo é o fato de as microfibrilas estarem muito bem aderidas na idade intermediária (50c) e após os 100 ciclos essas ligações entre microfibrilas e matriz estarem fragilizadas pelo ataque alcalino entre as cadeias celulósicas nas

microfibrilas (Figura 45f). O arrancamento parcial da fibra torna-se novamente possível pela ruptura das microfibrilas fragilizadas. Assim, a energia específica aumenta em relação à idade anterior, pelo aumento da energia com o atrito durante o arrancamento.

4.3.2 Efeito do uso de fibras de polipropileno

A comparação dos resultados obtidos para as séries com somente fibras celulósicas mostraram que a adição de fibras sintéticas em geral causara poucas mudanças significativas no módulo de ruptura (Tabela 11). Entretanto a grande melhora no comportamento mecânico foi observada na energia específica dos compósitos, como um resultado da interação sinérgica entre ambas as fases de reforço. Estudos anteriores conduzidos por Bezerra e Savastano Júnior (2004) também indicaram esse comportamento em fibrocimentos reforçados com fibras de PVA em combinação com fibras de pinus refinadas.

Compósitos, com polpas refinadas, quando associados com as fibras sintéticas apresentaram um maior valor de módulo de ruptura, MOR, do que aqueles associadas com polpa não refinada (Tabela 11). O fato das polpas refinadas apresentarem uma ótima dispersão dentro da matriz contribui com a eficiência do reforço fibroso, tornando possível que as fibras celulósicas e as sintéticas atuem em diferentes estágios da aplicação da força, como também destacado por Savastano Júnior, Warden e Coutts (2004). A polpa celulósica, que apresenta fibras mais curtas e com grande contato superficial com a matriz devido a fibrilação, atua nos primeiros estágios de carregamento favorecendo melhores resultados de MOR. Já as fibras sintéticas, que são mais longas, com menor ancoragem na matriz e com módulo elástico mais baixo, favorecem a absorção de energia com o atrito pelo arrancamento.

O limite de proporcionalidade (LOP) foi pouco influenciado pela adição de polipropileno, em relação aos compósitos com somente polpa de sisal. O relativo aumento da inclinação na maioria das curvas na região pós-fissuração (Figura 46) é um resultado do baixo módulo de elasticidade das fibras de PP, tornando possíveis grandes deformações no compósito (BENTUR; MINDESS, 1990).

Compósitos com fibras de PP apresentaram módulo de elasticidade (MOE) inferiores aos com somente sisal, mesmo após os envelhecimentos acelerado e natural. Esse comportamento mecânico indicou que MOE do compósito pode ser diminuído pela substituição da fração de fibras de sisal por fibras de PP que apresentam módulo elástico menor.

Similar ao ocorrido com os compósitos reforçados somente com sisal, o envelhecimento também mostrou causar aumento do LOP, MOR e MOE dos compósitos com fibras de PP, também explicado pela densificação dos compósitos (DA) e diminuição da absorção de água (AA) e da porosidade (PA) (seção 4.2). O aumento de LOP com o envelhecimento também foi reportado por Hannant e Hughes (1986). A melhora da aderência tanto das fibras celulósicas como das de PP tem grande influência nos resultados para estas propriedades. Na Figura 48c observa-se o rompimento da fibra de PP após envelhecimento de 100 ciclos.

Figura 46 – Curvas tensão-deformação para compósitos com polpa de sisal em três intensidades de refino (CSF 20, 220 e 680 mL): (a) sem envelhecimento; (b) 50 ciclos; (c) 100 ciclos; (d) 1 ano de envelhecimento natural.

A Figura 46 mostra as comparações entre as formulações com a concentração constante de fibras sintéticas em diferentes intensidades de refino da polpa de sisal. O efeito da adição das fibras de polipropileno na energia específica do compósito, pode ser observado na Tabela 11. Aos 28 dias de cura, os compósitos com polpa de sisal não refinada não diferiram significativamente dos compósitos com adição de fibras de PP, fato este atribuído à considerável incidência de arrancamento com atrito das fibras de sisal não refinadas, semelhante ao que acontece com as fibras de polipropileno (Figura 47b).

Aos 28 dias, compósitos com fibras de PP e fibras refinadas (CSF 220 e 20 mL) causaram aumentos em torno de 70% na energia específica em relação aos com fibras não refinadas. A polpa refinada melhorou a retenção das partículas de cimento e contribuiu para a distribuição homogênea das fibras de PP dentro da matriz, sem a estratificação dos longos e hidrofóbicos filamentos, ao longo da espessura das placas produzidas. Essas características tornaram a matriz mais compacta com a conseqüente melhora do contato das fibras com a matriz, que proporcionou um reforço sintético mais eficiente. Neste caso com o uso combinado de fibras de PP, a análise estatística revelou que o maior intensidade de refino não gerou significativo aumento na energia específica do compósito (o mesmo pode ser considerado para MOR), o que significa uma economia no preparo da polpa, já que a intensidade intermediária foi suficiente para obtenção de resultados satisfatórios.

Como discutido na seção anterior (4.3.1), comparando-se com os compósitos sem fibras de PP e com fibras refinadas, as fibrilas melhoraram a ancoragem, enquanto que a fratura das fibras prevaleceu sobre o arrancamento, com diminuição da energia específica. Apesar de a Figura 48a mostrar partículas da matriz cimentícia (com mais de 10 μm) aderidas à superfície das fibras de PP aos 28 dias, a forma cilíndrica e as propriedades intrínsecas das fibras de polipropileno as tornam susceptíveis ao escorregamento e, por serem mais longas (6 mm), são responsáveis pelas altas energias específicas.

Figura 47 – Micrografias das superfícies de fratura de compósitos híbridos com fibras de PP e polpa de sisal: (a) CSF 680 mL envelhecidos naturalmente (fratura das fibras de sisal); (b) CSF 220 mL aos 50 ciclos, arrancamento simultâneo de fibras de sisal e PP.

A manutenção da energia específica após os envelhecimentos foi garantida com a adição das fibras de PP, concordando com os resultados apresentados por Hannant e Hughes (1986). Após o envelhecimento de 1 ano, a adição das fibras de polipropileno proporcionou uma diferença de até 430% na energia específica em relação aos compósitos sem fibras de PP.

A Figura 47a mostra a superfície de fratura de compósito com fibras de PP e polpa de sisal não refinada, após envelhecimento natural. Como as fibras de PP são mais longas (6 mm), a energia gasta é maior, pois no início da aplicação da força com o aumento da deformação plástica, as fibras de sisal vão se rompendo durante o arrancamento das fibras de PP, caracterizando a sinergia entre os dois tipos de fibras.

Figura 48 – Micrografias das superfícies de fratura de compósitos híbridos com fibras de PP e polpa CSF 20mL: (a) 28 dias, partículas de matriz aderidas à superfície da fibras de PP; (b) envelhecimento natural, camada primária aderida à matriz; (c) 100 ciclos, rompimento da fibra de PP; (d) envelhecimento natural, camada primária aderida à matriz.

4.3.2.1 Fator *R* para placas planas

A equação para cálculo do Fator *R* está descrita na seção 3.6.3 e foi obtido a partir dos valores de MOR das placas planas. Esse valor, segundo a norma EN 494 (1994), deve ser superior a 0,7.

A Tabela 12 indica que as únicas séries que não apresentaram valores de fator *R* superiores a 0,7 foram a com polpa não refinada envelhecida naturalmente e

a reforçada com sisal (CSF 20 mL) juntamente com fibras de PP, envelhecida com 50 ciclos. Para o caso desta última, após 100 ciclos de imersão-secagem e 1 ano de envelhecimento natural, os valores de fator R aumentaram, tornando-se superiores a 0,7.

Tabela 12 – Resultados de Fator R (norma EN 494,1994) para placas planas nos diversos envelhecimentos.

Fibra	Intensidade de refino (CSF mL)	Envelhecimentos	Fator R
SISAL	680	50c	0,89
		100c	1,01
		1ano	0,70
	220	50c	0,98
		100c	0,75
		1ano	0,95
	20	50c	1,46
		100c	1,41
		1ano	1,72
SISAL+PP	680	50c	0,94
		100c	1,32
		1ano	1,30
	220	50c	0,87
		100c	0,83
		1ano	0,88
	20	50c	0,63
		100c	1,04
		1ano	0,99

Silva (2002) verificou, em compósitos curados ao ar, que o envelhecimento acelerado favoreceu a continuidade da hidratação da matriz do compósito. Hannant e Hughes (1986) sugerem que as microfissuras, formadas durante a cura, são fechadas pela hidratação do cimento quando os compósitos são submetidos ao envelhecimento. Como também enfatizado por Swamy (1990), a hidratação continuada da matriz cimentícia pode promover melhora nas propriedades mecânicas após os ensaios de envelhecimento. Os resultados, apresentados por esses pesquisadores, mostram a importância da hidratação completa do cimento antes de submeter os compósitos aos ensaios de envelhecimento.

4.4. Resultados relativos às telhas onduladas

4.4.1 Resultados das propriedades físicas para telhas onduladas

Os resultados da análise estatística para as propriedades físicas das telhas onduladas estão apresentados na Tabela 13. Foram encontrados efeitos significativos ($\alpha = 0,01$) para o tipo de fibra (p) e envelhecimento (t) para todas as propriedades físicas (absorção de água – AA, porosidade aparente – PA e densidade aparente – DA). A co-variável espessura (s) das telhas não mostrou influenciar significativamente os resultados das propriedades físicas.

Diferentemente do observado nas placas planas aos 28 dias, a inclusão das fibras de PP não representou aumento da absorção de água (AA) e diminuição da densidade aparente (DA) (Tabela 13). Nas telhas reforçadas com 3% de sisal 0,5% de PP aos 28 dias (S3PP0_5), a absorção de água (30%) foi significativamente menor e a densidade aparente maior (1,41 g/cm³) do que as reforçadas com 4,7% de sisal (S4_7 - 32,8% e 1,35 g/cm³).

Os resultados de absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente das telhas reforçadas com somente sisal (S4_7) aos 28 dias (32,8%, 44,2% e 1,35 g/cm³) foram muito semelhantes aos encontrados por Roma Júnior (2004) (31%, 42,3% e 1,35 g/cm³) utilizando 3% de polpa de sisal. Apesar de o processo utilizado pelo pesquisador não utilizar a sucção da água, a utilização de 3% de superplastificante contribuiu para as características físicas semelhantes. Os valores encontrados por Devito (2003), utilizando 5% de polpa, foram superiores para AA (~40%) e PA (~50%) e inferiores para DA (1,23 g/cm³). Esses valores estão muito acima dos encontrados por Agopyan et al (2005), onde a absorção de água não ultrapassou 16%, mas ainda assim estão de acordo com o limite de 37% recomendado pela ABNT (NBR 7581, 1993).

A porosidade aparente de telhas autoclavadas e envelhecidas com 100 ciclos (S4_7 A-100c) foi maior do que as curadas por imersão em água e envelhecidas (S4_7 100c). Para o restante das propriedades físicas não foram encontradas diferenças significativas com a cura acelerada.

Tabela 13 – Valores médios e desvio-padrão para absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA) das formulações com diversos teores de fibras (ρ) de telhas avaliadas nos diversos envelhecimentos (t).^{*}

ρ (fibra)	t (envelhecimento)	AA (%)	PA (%)	DA (g/cm ³)
S4_7	28d	32,8 ± 1,1 ^{A ab}	44,2 ± 0,7 ^{Bc a}	1,35 ± 0,03 ^{C b}
	100c ¹	33,3 ± 0,9 ^{A b}	44,0 ± 0,9 ^{C ab}	1,32 ± 0,01 ^{C b}
	C-C ²	29,9 ± 0,6 ^{B a}	42,0 ± 0,5 ^{D a}	1,40 ± 0,01 ^{B b}
	C-100c ³	23,3 ± 0,7 ^{C a}	35,8 ± 1,8 ^{E a}	1,56 ± 0,01 ^{A b}
	A-28d ⁴	34,5 ± 0,8 ^A	45,4 ± 0,6 ^{AB}	1,32 ± 0,01 ^C
	A-100c ⁵	33,6 ± 1,1 ^A	45,6 ± 1,0 ^A	1,36 ± 0,01 ^C
S3PP0_5	28d	30,1 ± 0,8 ^{A c}	42,5 ± 1,3 ^{A b}	1,41 ± 0,05 ^{C a}
	100c	28,8 ± 1,1 ^{AB c}	41,3 ± 0,9 ^{A c}	1,44 ± 0,02 ^{BC a}
	C-C	27,1 ± 0,3 ^{B b}	39,6 ± 0,3 ^{B b}	1,47 ± 0,01 ^{B a}
	C-100c	19,7 ± 0,9 ^{C b}	32,2 ± 1,1 ^{C b}	1,64 ± 0,02 ^{A a}
S3PP1_0	28d	34,4 ± 1,2 ^{A a}	44,8 ± 0,9 ^{A a}	1,30 ± 0,04 ^{A c}
	100c	32,2 ± 1,2 ^{B b}	42,8 ± 0,6 ^{B b}	1,33 ± 0,03 ^{A b}
S3PP1_7	28d	32,1 ± 2,6 ^{B bc}	42,7 ± 1,8 ^{B b}	1,31 ± 0,07 ^{B bc}
	100c	36,9 ± 6,9 ^{A a}	44,8 ± 3,7 ^{A a}	1,23 ± 0,12 ^{C c}
	C-C	31,5 ± 2,7 ^{B a}	41,2 ± 1,3 ^{B a}	1,31 ± 0,07 ^{B c}
	C-100c	21,5 ± 2,0 ^{C ab}	32,6 ± 1,7 ^{C b}	1,52 ± 0,06 ^{A b}

^{*} Letras diferentes indicam diferenças significativas, sendo que letras maiúsculas (A, B, C, D e E) na mesma coluna representam comparações entre os envelhecimentos dentro da mesma série (fixando o conteúdo de fibras); letras minúsculas (a, b e c) na mesma coluna representam comparações entre as séries com diferentes conteúdos de fibras (fixando o envelhecimento).

¹ 100c: 100 ciclos de imersão-secagem; ² C-C: calor-chuva; ³ C-100c: carbonatação seguida de 100 ciclos de imersão-secagem; ⁴ A-28d: cura acelerada em autoclave e ensaiados aos 28 dias; ⁵ A-100c: cura acelerada em autoclave seguida de 100 ciclos de imersão-secagem.

Os envelhecimentos em geral diminuíram a porosidade das telhas, porém a carbonatação acelerada seguida de ciclos (C-100c) foi a que mais afetou as propriedades físicas das telhas. No caso das reforçadas somente com sisal (S4_7) essa diminuição da porosidade através da carbonatação pode ter sido a responsável pela melhora das propriedades mecânicas. A carbonatação acelerada reduziu em torno de 20% a porosidade aparente (PA) das séries S4_7 e S3PP0_5, e aproximadamente 30% para a série com maior concentração de fibras de PP (S3PP1_7). A diminuição significativa da absorção de água e a densificação para todas as séries de telhas carbonatadas indicam a efetiva adsorção do dióxido de carbono e formação dos novos compostos na matriz cimentícia. Redução da porosidade em torno de 15% com a carbonatação acelerada foi encontrada por Silva (2002).

4.4.1.1 Permeabilidade à água

Nenhuma das séries avaliadas apresentou formação de gotas na superfície inferior. Foram observadas manchas maiores (em torno de 70 mm) nas superfícies inferiores de telhas que utilizaram reforço com fibras de PP (S3PP0_5, S3PP1_0 e S3PP1_7) nas séries aos 28 dias, após 100c e após calor-chuva (Figura 49a). Nas reforçadas somente com sisal (S4_7) aos 28 dias e após calor-chuva as manchas foram menores (em torno de 30 mm - Figura 49b). Nas telhas carbonatadas para todas as formulações e nas reforçadas somente com sisal envelhecidas com 100 ciclos (100c) as manchas foram mais tênues (Figura 49c).

Figura 49 – Ensaio de permeabilidade de telhas, após 24 h com a coluna d'água de 250 mm: (a) manchas para a série S3PP1_7 aos 28 dias (seta – manchas de até 70 mm); (b) manchas para série S4_7 aos 28 dias (seta – manchas de até 30 mm de diâmetro); (c) manchas para série S3PP1_7 carbonatada e envelhecida 100c (C-100c).

Telhas submetidas ao envelhecimento calor-chuva (C-C) apresentaram manchas na superfície inferior durante a aspersão de água na fase chuva, porém não foi observado a formação de gotas. Foram observados, no entanto, para este envelhecimento, aparecimento de pequenas fissuras, em torno de 5 mm, na superfície superior, e conseqüente lixiviação causada pela ação da água durante a aspersão (Figura 50), similar ao obtido por Agopyan et al.(2005) em exposição natural de 5 anos.

Figura 50 – Superfície lixiviada pela ação da água durante o estágio de aspersão (fase chuva).

4.4.2 Resultados mecânicos das telhas onduladas

Os resultados da análise estatística para as propriedades mecânicas das telhas onduladas estão apresentados na Tabela 14. Foram encontrados efeitos significativos ($\alpha = 0,05$) para o tipo de fibra ($\underline{p}$) e envelhecimento ($\underline{r}$) em todas as propriedades mecânicas (força máxima – FM, flexa na força máxima – FFM, flexa na energia total – FET e energia total – ET). Foi encontrada influência significativa da espessura das telhas ($\underline{s}$) nos resultados mecânicos e por isso utilizou-se desta como uma co-variável para o tipo de fibra ($\underline{p}$) e para o envelhecimento ($\underline{r}$).

Curvas força-deformação são apresentadas a seguir (Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54), para todas as formulações empregadas nas telhas. Percebe-se que, principalmente nas reforçadas com maiores níveis de fibra sintética

(S3PP1_0 e S3PP1_7), as curvas apresentaram um pequeno patamar, próximo ao pico (similar às curvas dos compósitos planos), o que caracteriza a ruptura dúctil do material, com as fibras suportando a força aplicada durante um breve período de tempo após o aparecimento da primeira fissura na matriz. Por outro lado, com os envelhecimentos nota-se uma tendência de diminuição desses patamares, apresentando uma queda mais acentuada da curva, o que evidencia a característica de ruptura frágil do material.

Como discutido na seção 4.2, a dispersão das fibras de PP é um aspecto importante, pois influencia o processamento e, conseqüentemente, as características microestruturais das telhas. Durante a moldagem das telhas com 1,7% de PP (S3PP1_7), a formação dos nódulos ou feixes pela dispersão deficiente prejudicou a conformação das telhas e refletiu na heterogeneidade das amostras (altos coeficientes de variação das propriedades mecânicas e características microestruturais). Bentur e Mindess (1990) enfatizam também os problemas com a dispersão das fibras de PP na mistura. Savastano Júnior, Warden e Coutts (2004) também indicaram a dificuldade associada com a dispersão de fibras longas no processo de sucção, o que tende a floculação e daí a distribuição heterogênea. Por isso resolveu-se adotar concentrações menores de fibras (0,5% e 1,0%) como descrito na metodologia (Tabela 6 da seção 3.4.2).

Como pode ser observado na Tabela 14, para todas as séries a força máxima (CM) suportada pelas telhas manteve-se mesmo após os envelhecimentos, superiores ao valor proposto por Gram e Gut (1994) para telhas com espessura em torno de 8 mm (425 N) (SKAT - Swiss Center for Appropriate Technology e ILO - International Labour Office). Comparando-se a energia total (ET) obtida entre as formulações aos 28 dias, as telhas reforçadas com os maiores níveis de fibras de PP (S3PP1_0 e S3PP1_7) apresentaram os melhores resultados. Esses resultados refletiram nos maiores valores de flecha na força máxima (FFM) e flecha na energia total (FET).

Tabela 14 – Valores médios e desvios-padrões para força máxima aplicada (FM), flecha na força máxima (FFM), flecha na energia total (FET) e energia total (ET) das formulações de telhas com diferentes teores de fibras (p) avaliadas nos diversos envelhecimentos (t).^{*}

p (fibras)	t (envelhecimentos)	FM (N)	FFM (mm)	FET (mm)	ET (kN.mm)
S4_7	28d	1073,9 ± 244,3 ^{B a}	4,8 ± 0,5 ^{A a}	6,9 ± 1,3 ^{BC b}	3,4 ± 1,3 ^{B b}
	100c ¹	1030,3 ± 345,1 ^{BC a}	4,5 ± 0,7 ^{A a}	6,9 ± 1,7 ^{BC b}	3,5 ± 1,7 ^{B ab}
	C-C ²	526,4 ± 156,9 ^{E a}	3,7 ± 0,6 ^{B b}	7,5 ± 2,0 ^{B b}	2,0 ± 0,9 ^{C b}
	C-100c ³	1283,6 ± 221,4 ^{A a}	5,0 ± 0,5 ^{A a}	9,1 ± 2,5 ^{A a}	5,9 ± 2,0 ^{A a}
	A-28d ⁴	776,3 ± 126,9 ^D	4,7 ± 0,5 ^A	6,5 ± 0,9 ^{BC}	2,6 ± 0,7 ^{BC}
	A-100c ⁵	909,6 ± 236,2 ^{CD}	4,3 ± 0,7 ^{AB}	5,7 ± 2,6 ^C	2,4 ± 1,7 ^C
S3PP0_5	28d	1044,8 ± 194,5 ^{A a}	4,8 ± 0,6 ^{A a}	6,0 ± 0,5 ^{A b}	3,12 ± 0,6 ^{A b}
	100c	977,3 ± 220,8 ^{AB a}	3,7 ± 0,6 ^{BC b}	5,0 ± 0,7 ^{A c}	2,19 ± 0,6 ^{AB b}
	C-C	551,4 ± 114,4 ^{C a}	3,3 ± 0,4 ^{C b}	6,3 ± 0,6 ^{A b}	2,08 ± 0,4 ^{B b}
	C-100c	904,3 ± 125,1 ^{B b}	4,3 ± 0,6 ^{AB b}	5,5 ± 0,6 ^{A b}	2,55 ± 0,5 ^{AB c}
S3PP1_0	28d	1001,1 ± 239,0 ^{A a}	5,0 ± 0,7 ^{A a}	9,0 ± 0,6 ^{A a}	5,1 ± 1,2 ^{A a}
	100c	974,5 ± 202,0 ^{A a}	4,4 ± 0,5 ^{A ab}	6,9 ± 0,5 ^{B b}	3,6 ± 0,7 ^{B ab}
S3PP1_7	28d	962,5 ± 386,4 ^{A a}	5,3 ± 1,9 ^{A a}	9,5 ± 0,9 ^{A a}	5,5 ± 2,2 ^{A a}
	100c	788,0 ± 147,9 ^{BC b}	4,8 ± 2,3 ^{AB a}	9,1 ± 0,9 ^{A a}	4,5 ± 1,2 ^{AB a}
	C-C	663,7 ± 204,2 ^{C a}	4,7 ± 0,7 ^{AB a}	9,1 ± 0,6 ^{A a}	4,0 ± 1,5 ^{B a}
	C-100c	885,1 ± 233,9 ^{AB a}	4,4 ± 0,8 ^{B ab}	8,3 ± 0,8 ^{A a}	4,1 ± 0,7 ^{B b}

^{*} Letras diferentes indicam diferenças significativas, sendo que letras maiúsculas (A, B, C, D e E) na mesma coluna representam comparações entre os envelhecimentos (t) dentro da mesma série (fixando o conteúdo de fibras - p); letras minúsculas (a, b e c) na mesma coluna representam comparações entre as séries com diferentes conteúdos de fibras (fixando o envelhecimento).

¹ 100c: 100 ciclos de imersão-secagem; ² C-C: calor-chuva; ³ C-100c: carbonatação seguida de 100 ciclos de imersão-secagem; ⁴ A-28d: cura acelerada em autoclave e ensaiados aos 28 dias; ⁵ A-100c: cura acelerada em autoclave seguida de 100 ciclos de imersão-secagem.

Nas formulações reforçadas com somente sisal (S4_7) e com os menores teores de PP (S3PP1_0 e S3PP0_5), o envelhecimento de 100 ciclos de imersão-secagem (100c) não causou decréscimo significativo na força máxima suportada (FM), em relação às séries ensaiadas aos 28 dias de cura. Na formulação com 1,7% de PP (S3PP1_7), os ciclos de imersão-secagem causaram um decréscimo de 18% na força máxima suportada (FM). Para os resultados de energia total (ET), na série reforçada somente com sisal e nas reforçadas com 1,7% e 0,5% de fibras de PP, os resultados de energia total para os 28 dias de cura não foram afetados significativamente após os 100 ciclos de imersão-secagem. Somente a série com 1% de fibras de PP (S3PP1_0) apresentou redução significativa da energia total, evidenciada pela diminuição nas flechas obtidas para essas séries envelhecidas.

Figura 51 – Curvas força-deformação para telhas reforçadas com 4,7% de sisal, nos diversos envelhecimentos.

Figura 52 – Curvas força-deformação para telhas reforçadas com 3% de Sisal e 0,5% de PP, nos diversos envelhecimentos.

Figura 53 – Curvas força-deformação para telhas reforçadas com 3% sisal e 1% de PP, aos 28 dias e 100 ciclos de envelhecimento imersão-secagem.

Figura 54 – Curvas força-deformação para telhas reforçadas com 3% Sisal e 1,7% de PP, nos diversos envelhecimentos.

O envelhecimento calor-chuva (C-C) mostrou-se como muito agressivo, ou seja, promoveu uma forte degradação em todas as séries de telhas onduladas avaliadas. A formulação com maior nível de reforço com PP (S3PP1_7) foi a que apresentou a menor redução na força máxima suportada (em torno de 30%) em relação as formulações S4_7 e S3PP0_5, onde o envelhecimento com 50 ciclos de calor-chuva (C-C) causou uma redução em torno de 50%, quando comparadas com as telhas ensaiadas aos 28 dias de cura. A energia total (ET) para todas as séries

também foi severamente afetada pelo envelhecimento calor-chuva. A série que utilizou o maior reforço com fibras sintéticas (S3PP1_7) apresentou energia total duas vezes maior que as demais séries após esse envelhecimento.

Os resultados das telhas curadas aos 28 dias apresentados pela presente pesquisa (Tabela 14) foram superiores aos encontrados em trabalhos precedentes com telhas produzidas por adensamento com vibração. Savastano Júnior et al. (1999), utilizando telhas reforçadas com 2% em volume de fibras e polpas (côco, eucalipto e sisal), aos 28 dias, obtiveram valores em torno de 550 N e 1,6 kN.mm para força máxima suportada e energia absorvida. Em estudo similar Pimentel (2000) utilizou partículas vegetais e obteve força máxima em torno de 540 N e energia absorvida em torno de 1,3 kN.mm aos 28 dias. Esses resultados evidenciam a importância da individualização das fibras (através de processos de polpação) para a distribuição homogênea do material de reforço na matriz cimentícia.

Devito (2003) avaliou telhas reforçadas com 5% (em massa) de polpa *Kraft* residual de *Eucalyptus grandis* e obteve resultados para força máxima e energia total na ordem de 1010 N e 3,9 kN.mm aos 28 dias, 600 N e 1,3 kN.mm para 84 dias e 540 N e 1,4 kN.mm aos 365 dias. Já neste estudo, diferentemente do realizado por Pimentel (2000), o fato de se ter utilizado fibras provenientes de um processo de polpação (*Kraft*) favoreceu a melhor distribuição das fibras na mistura e a otimização do reforço na matriz cimentícia.

Roma Júnior (2004) produziu telhas reforçadas com 3% de polpa de sisal, obtendo 1111 N e 2,7 kN.mm aos 28 dias e 640 N e 1,4 kN.mm aos 155 dias para força máxima de ruptura e energia total. Esses resultados encontrados pelo autor após envelhecimento natural ficaram abaixo dos valores propostos por Gram e Gut (1994) para telhas de 10 mm de espessura. Agopyan et al. (2005) produziram telhas com fibras de côco, polpa de eucalipto e híbrido de polpa de eucalipto + fibra de sisal. Os autores concluíram que o desempenho mecânico foi diminuído em 65% e 80% para força máxima e energia específica, respectivamente, após 60 meses.

Apesar de o processo utilizado para produção das telhas nos estudos discutidos acima ser diferente do utilizado nesta pesquisa, pois não utilizaram sucção do excesso de água e adensamento por pressão, acredita-se que o refino da polpa celulósica possa trazer tanto melhorias na distribuição homogênea das fibras durante a moldagem das telhas, quanto acréscimos na resistência final do produto pela melhor ancoragem das fibras na matriz, como observado no presente estudo.

Na Figura 9a e Figura 9b da seção 2.6, observa-se nas telhas produzidas por Roma Júnior (2003) a presença de feixes de fibras na secção transversal da telha (seta 1). Essa distribuição deficiente da polpa de sisal encontrada pelo pesquisador trouxe prejuízos na resistência final das telhas. Nota-se que esses nódulos da polpa de sisal são completamente arrancados da matriz durante a aplicação da força, devido à sua baixa aderência, dando origem a grandes poros bem definidos (seta 2). Já na Figura 55, na superfície de fratura das telhas produzidas com polpa de sisal refinada, não é possível observar as fibras a olho nu, pois estão bem distribuídas. A eficiência do reforço pode ser comprovada pelo arrancamento de porções maiores da matriz, mostrando assim que as fibras estavam bem aderidas (indicado pela seta).

Figura 55 – Seção transversal de telha reforçada com polpa de sisal refinada demonstrando a superfície de ruptura.

Como consequência do refino, os compósitos apresentam melhor retenção das partículas de cimento pela rede de fibras durante a drenagem à vácuo, também um empacotamento adequado durante a prensagem e ligações mais efetivas entre fibra-matriz e fibra-fibra. Os baixos valores de “coarseness” (Tabela 9) para a polpa refinada (CSF 220 mL) em comparação com a polpa não refinada (CSF 680 mL), indicam um grande número de fibras para uma dada percentual de massa na matriz e com isso a maior eficiência no reforço. Como as fibras atuam como barreiras para as microfissuras desenvolvidas durante a aplicação da força, a resistência e a energia específica do material estarão diretamente relacionadas com o conteúdo de fibras e a energia de ligação entre essas duas fases (matriz e fibra) como também discutido por Coutts (1988) e Savastano Júnior, Warden e Coutts (2004).

Diferentemente das placas planas, não foi observado para as telhas onduladas o aumento da força suportada após o envelhecimento. Esse desempenho pode ter ocorrido pelo fato do cimento utilizado (CP V-ARI) ser de alta resistência inicial, além de no caso das telhas a cura ter sido realizada com imersão em água, tornando possível a hidratação eficiente da matriz cimentícia. Esse comentário sobre a cura deficiente fica evidente também quando observamos o comportamento das telhas autoclavadas, que melhoraram seu desempenho mecânico após os 100 ciclos de envelhecimento.

4.4.2.1 Efeito da cura acelerada em autoclave

Nas telhas reforçadas somente com sisal e submetidas à cura acelerada em autoclave, a força máxima suportada foi inferior à das telhas submetidas à cura imersa em água por 28 dias. No entanto, os valores de energia total (ET) se mostraram semelhantes.

Apesar da cura em autoclave ocorrer em alta temperatura (140°C) e pressão em torno de 1,5 MPa, o comportamento mecânico das telhas demonstrou que a cura acelerada foi deficiente, já que após submetidas aos 100 ciclos de envelhecimento apresentaram aumento da força máxima e manutenção da energia total, ocasionada pela contínua hidratação do cimento durante os ciclos de imersão-secagem.

Coutts (1988) utilizando em torno de 4% em massa de polpa *Kraft*, encontrou resistência e energia específica menores em compósitos autoclavados quando comparados com curados ao ar. Melhores resultados para a autoclavagem foram encontrados pelo autor quando utilizou maiores conteúdos de polpa (em torno de 10%).

O mesmo comportamento foi encontrado por Eusebio et al. (1992), utilizando polpas tratadas quimica e termomecanicamente. Os autores concluíram que extrativos residuais da polpa tiveram um efeito inibitório na hidratação do cimento com as altas temperaturas da autoclavagem, principalmente na interface fibra-matriz.

4.4.2.2 Efeito da carbonatação acelerada

A avaliação química por titulação potenciométrica, descrita na Tabela 15, mostra a eficiência de 95% no consumo dos hidróxidos nas telhas carbonatadas reforçadas somente com polpa de sisal (S4_7 C-100c). Essa transformação é resultante do consumo das hidroxilas (OH) presentes na matriz cimentícia com a adsorção das moléculas de CO_2 após sua difusão pelos poros do compósito. Alta porosidade aparente nas telhas, em torno de 40% nas idades iniciais (28 dias), contribuíram com essa difusão (TAYLOR, 1997).

Tabela 15 – Resultados dos teores de hidróxidos e de carbonatos obtidos por meio da titulação potenciométrica.

Séries	% hidróxidos	% carbonatos
S4_7 28d (não carbonatada)	42,7 ± 0,4	57,3 ± 0,4
S4_7 100c (não carbonatada)	45,4 ± 0,7	54,6 ± 0,7
S4_7 C-100c (carbonatada)	2,49 ± 0,02	97,51 ± 0,02

Os difratogramas referentes às séries S4_7, apresentados na Figura 56, mostram que o cálcio (Ca) foi predominante das amostras e que as transformações entre produtos de hidratação estão relacionadas com esse elemento. Na Figura 56c, referente às séries S4_7 C-100c, comprova-se que o hidróxido de cálcio ou portlandita (CaOH_2) foi transformado em produtos menos alcalinos, como o carbonato de cálcio ou calcita, $\text{Ca}(\text{CO})_3$, após a carbonatação acelerada. Entretanto, comparando-se os resultados obtidos da titulação potenciométrica (Tabela 15) e os difratogramas das séries S4_7 28d e S4_7 100c (Figura 56a e Figura 56b), fica evidenciado que não houve consumo do CaOH_2 nem formação significativa de carbonatos pelo processo de envelhecimento com imersão-secagem.

Figura 56 – Difrátogramas para série S4_7: (a) aos 28 dias não carbonatada; (b) envelhecida com 100 ciclos de imersão-secagem, não carbonatada; (c) carbonatada e envelhecida com 100 ciclos de imersão-secagem.

Na Figura 51, a série de telhas carbonatadas reforçadas somente com sisal (S4_7) após 100 ciclos de envelhecimento (C-100c) se destacou significativamente das outras séries com o melhor resultado para a força máxima suportada ($1283,6 \pm 221,4$ N). Esse comportamento não foi observado para as outras formulações carbonatadas utilizando fibras de PP, onde nas telhas reforçadas com 1,7% (S3PP1_7) o resultado foi equivalente ao de 28 dias e na série S3PP0_5 o resultado foi significativamente inferior. Em ambas as formulações com PP carbonatadas (C-100c), os resultados mecânicos não diferiram das telhas envelhecidas com 100 ciclos (100c).

Embora para todas as séries avaliadas a carbonatação tenha densificado as

telhas, diminuindo a porosidade (PA) e absorção de água (AA) das telhas, as propriedades mecânicas das séries com fibras de PP não foram significativamente afetadas (Tabela 13). As menores porosidades (PA) para essas séries aos 28 dias, em relação à série com somente sisal, podem ter sido a causa desse comportamento. Outra hipótese seria a concorrência entre o efeito da carbonatação e os defeitos adicionados pelos longos e hidrofóbicos filamentos de PP. A eficiência da carbonatação nos compósitos com fibras de PP não foi avaliada quimicamente, mas será objeto de estudos posteriores.

Telhas carbonatadas reforçadas somente com sisal se mostraram também superiores significativamente em relação à energia total ($5,9 \pm 1,9$ kN.mm) quando comparadas com as telhas carbonatadas reforçadas com fibras de PP. Adicionalmente, notou-se que entre essas séries com fibras de PP, a formulação com maior teor de fibras sintéticas apresentou a maior energia total ($4,1 \pm 0,7$ kN.mm).

Avaliando placas planas reforçadas com 12% em massa de polpa de eucalipto, Silva (2002) encontrou melhora na resistência, com a carbonatação acelerada e conservação da mesma após ciclos de envelhecimento. Entretanto, contrariando a presente pesquisa, a energia específica foi reduzida significativamente. O pesquisador concluiu que não houve ação significativa da lixiviação dos produtos carbonatados.

Como descrito por Gram (1988), a carbonatação provoca a diminuição da alcalinidade da matriz, que é indicada como o grande fator de degradação dos constituintes das fibras celulósicas. A formação de fases mais resistentes como o carbonato de cálcio em detrimento do hidróxido de cálcio também sugere a melhora do desempenho mecânico dos compósitos.

O efeito da carbonatação nas telhas foi extremamente positivo na manutenção da resistência após o envelhecimento acelerado, porém os mecanismos do processo de carbonatação ainda são desconhecidos (GRAM, 1988).

A utilização da carbonatação deve ser avaliada também para períodos mais longos de exposição natural. Mehta e Monteiro (1994) descrevem a continuação da carbonatação em ambiente com excesso de CO_2 , pela formação do bicarbonato de cálcio, que é solúvel em água (reação descrita na eq.2 na seção 2.7.3). Esta possibilidade deve ser analisada, visto que a antecipação da carbonatação pela formação do $\text{Ca}(\text{CO})_3$ pode antecipar também a formação do bicarbonato com a

exposição natural na presença do CO₂ atmosférico. Conseqüentemente, como o bicarbonato é solúvel em água, o desempenho das telhas pode ser prejudicado pela lixiviação desse componente na incidência da água da chuva.

4.4.2.3 Fator R para telhas onduladas

Na Tabela 16 estão apresentados os valores de Fator R para as séries de telhas avaliadas após os diversos envelhecimentos.

Os valores de fator R para todas as séries envelhecidas com o método de calor-chuva (C-C) ficaram abaixo do valor de 0,7 recomentado pela norma EN 494 (1994). No envelhecimento com 100 ciclos de imersão-secagem, somente as telhas sem o reforço híbrido (S4_7) e as com menor conteúdo de fibras de PP (S3PP0_5) se apresentaram inferiores ao recomendado, destacando a eficiência dos maiores conteúdos de PP (S3PP1_0 e S3PP1_7) na manutenção das resistências dos compósitos em ambientes mais agressivos.

Tabela 16 – Resultados de fator R conforme norma EN 494 (1994) para telhas onduladas nos diversos envelhecimentos.

Formulações	Envelhecimentos	Fator R
S4_7	100c: 100 ciclos imersão-secagem	0,68
	C-C: Calor-Chuva (50 ciclos)	0,36
	C-100c: Carbonatação+100 ciclos	0,95
	A-100c: Autoclavagem+100 ciclos	0,91
S3PP0_5	100c: 100 ciclos imersão-secagem	0,59
	C-C: Calor-Chuva (50 ciclos)	0,46
	C-100c: Carbonatação+100 ciclos	0,63
S3PP1_0	100c: 100 ciclos	0,75
S3PP1_7	100c: 100 ciclos	0,73
	C-C: Calor-Chuva (50 ciclos)	0,42
	C-100c: Carbonatação+100 ciclos	0,72

A autoclavagem e a carbonatação das telhas sem fibras de PP foram eficientes na conservação da força máxima (FM), apresentando valores de fator R

bem superiores ao recomendado, visto que nestas duas séries as propriedades mecânicas melhoraram após o envelhecimento.

Como discutido na seção 4.4.2.2, a carbonatação pareceu não ser tão eficiente quando utilizadas em compósitos com fibras de PP. Telhas carbonatadas reforçadas com 0,5% de PP (S3PP1_0) apresentaram valores de fator R inferiores ao recomendado (0,7).

Os valores para o fator R das telhas foram inferiores aos das placas planas. Isso pode ser associado ao processo de fabricação, que ainda está em fase de ajustes para o caso das telhas, bem como aos aspectos da hidratação do cimento no envelhecimento das placas planas.

4.5. Comportamento térmico

4.5.1 Condutividade térmica pelo método do fio-quente paralelo

A Tabela 17 apresenta propriedades térmicas referentes às formulações em temperatura ambiente e em temperaturas de 60°C.

Tabela 17 – Valores de condutividade térmica (k), do calor específico (c) e da difusividade térmica (α_t) dos materiais avaliados.

Formulações	Temperatura de ensaio (°C)	K (W/m.K)	c (J/kg.K)	α_t (m ² /s)
Fibrocimento-sisal (S4_7)	25	0,716	1278,7	$3,060 \cdot 10^{-07}$
	60	1,214	1071,5	$6,191 \cdot 10^{-07}$
Fibrocimento-Sisal+PP (S3PP1_7)	25	0,816	1201,1	$3,951 \cdot 10^{-07}$
	60	0,823	1294,4	$3,694 \cdot 10^{-07}$
Fibrocimento-Amianto	25	0,837	1167,6	$4,048 \cdot 10^{-07}$
	60	0,967	1315,8	$4,150 \cdot 10^{-07}$

Os cálculos da condutividade térmica (k), calor específico (c) e da difusividade térmica (α_t) foram baseados na eq.(18) a eq(20) da seção 3.7.1. Foram utilizadas para os cálculos as regiões mais lineares das curvas temperatura x tempo indicadas na Figura 57 e na Figura 58. Os valores de condutividade térmica encontrados foram

semelhantes aos indicados por Kreith e Kreider * (1978 apud Tinoco, 2001, p.13) para fibrocimentos.

Figura 57 – Curvas de temperatura em função do tempo para os corpos-de-prova prismáticos de fibrocimento à temperatura ambiente (em torno de 25°C).

Figura 58 – Curvas de temperatura em função do tempo para os corpos-de-prova prismáticos de fibrocimento à temperatura de 60°C.

* KREITH, F.; KREIDER, J.F. Principles of solar engineering. USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1978. 778p.

Nota-se um comportamento térmico diferenciado entre as formulações em temperatura ambiente (25°C) e a 60°C.

Em temperatura ambiente (25°C) a formulação S4_7 apresentou-se com as propriedades térmicas mais favoráveis ao conforto térmico, com menor condutividade térmica (k) e maior calor específico (c), o que favorece a menor difusividade térmica (α_t). Com a elevação da temperatura de ensaio (60°C), a formulação com fibras de PP (S3PP1_7) foi a que apresentou valores mais adequados ao conforto térmico.

Nas duas temperaturas de ensaio, a formulação com amianto apresentou valores menos apropriados comparando-se com outras formulações sem amianto.

A condutividade térmica e difusividade térmica para os compósitos com sisal (S4_7), após o aquecimento a 60°C, tornaram-se até 45 e 100% maiores, respectivamente, com relação às outras formulações.

Vale ressaltar que a presença da umidade (em torno de 15%) nos corpos-de-prova prismáticos pode ter interferido nas medidas, causado o aumento da condutividade térmica com o aumento da temperatura. O fato de a formulação fibrocimento-sisal (S4_7) apresentar maior conteúdo de fibras celulósicas, que por sua vez apresentam grande absorção de água, pode explicar esta presença de umidade.

4.5.2 Comparação das temperaturas da superfície inferior de diferentes telhas

O objetivo desta avaliação foi comparar o comportamento das telhas de fibrocimento sem amianto (fibrocimento-sisal) em relação às temperaturas de superfície inferior de telhas cerâmicas e de fibrocimento-amianto. O comportamento térmico da telha de cobertura também é influenciado pelas dimensões, pela forma e pela cor do produto, porém esses aspectos não serão amplamente discutidos neste trabalho. Na Tabela 18 observa-se as principais características climáticas dos dois dias mais quentes do período avaliado, ou seja, os dias 20/12/05 e 22/12/05.

Tabela 18 - Principais características climáticas dos dias 20/12/2005 e 22/12/2005.

		Hora	Temperatura do ar °C	Umidade relativo do ar (%)	Velocidade média do vento(m/s)	P _{atm} (mm de Hg)
20/12/2005	Médias diárias		24,0 ± 4,2	71,7 ± 15,9	2,6 ± 1,7	708,3 ± 0,8
	Picos de radiação	10:30 h	27,6	59,8	3,9	708,8
		14:00 h	29,5	51,8	4,7	708,1
22/12/2005	Médias diárias		23,7 ± 3,9	75,5 ± 15,4	1,9 ± 1,4	708,8 ± 0,9
	Picos de radiação	11:00 h	28,6	57,1	2,6	710,3
		12:30 h	29,6	50,5	2,4	709,6

As curvas de temperatura de superfície inferior em função da hora do dia e da radiação solar podem ser visualizadas na Figura 59 e Figura 60 (dos dois dias mais quentes do período avaliado).

Figura 59 – Curvas de temperatura de superfície inferior em função da hora do dia e da radiação solar para os três tipos de telhas avaliados. Dados coletados no dia 20/12/05.

Figura 60 – Curvas de temperatura de superfície inferior em função hora do dia e da radiação solar para os três tipos de telhas avaliados. Dados coletados no dia 22/12/05.

Apesar da coloração mais escura das telhas de cerâmica, o que indica absorbâncias maiores, para o visível, em relação às de fibrocimento (TINOCO, 2001), nota-se na Figura 60 que nas horas mais quentes do dia, as telhas de cerâmica apresentaram temperaturas até 10°C inferiores às de fibrocimento-amianto e 6°C em relação às de fibrocimento-sisal. Entre as telhas de fibrocimento, as telhas sem amianto apresentaram temperaturas de superfície menores em até 3°C.

A resistência à passagem do calor está diretamente relacionada com a espessura do material, o que pode explicar as diferenças encontradas. Telhas cerâmicas, fibrocimento-sisal e fibrocimento-amianto apresentaram espessuras em torno de 12 mm, 8 mm e 6 mm respectivamente.

O comportamento de amortecimento do calor é uma característica muito importante para as telhas, pois diminui a amplitude de variação térmica nas instalações em que estão sendo utilizadas. Na Figura 59 observa-se que em torno das 10:30 h ocorreu o maior pico de radiação pela manhã (próximo de 1100 W/m²). O aumento da temperatura da superfície inferior das telhas ocorreu 1,5 h depois. No período da tarde, a maior radiação incidiu às 14:00 h, e somente às 15:00 h foram obtidas as máximas temperaturas de superfície inferior para as telhas de fibrocimento-amianto. Para as telhas de fibrocimento-sisal as máximas foram obtidas

às 15:15 h e para as telhas cerâmicas às 15:30 h. Esse fato demonstrou uma diferença na capacidade de amortecimento (que está relacionada com a difusividade térmica) de 15 min entre os tipos de telhas. Esse resultado mostra o melhor desempenho da telha de fibrocimento sem amianto como barreira à radiação térmica proveniente do sol.

Na Figura 60, observa-se o mesmo comportamento, qual seja, o maior pico de radiação pela manhã ocorreu às 11:00 h e no período da tarde às 12:30 h, com radiação solar em torno de 1100 W/m^2 . Esses picos de radiação provocaram o aumento da temperatura inferior das telhas uma hora depois. Neste caso, as diferenças na capacidade de amortecimento entre as telhas foi de 1h e 30 min entre cerâmica e fibrocimento-sisal e de 1h e 45 min entre cerâmica e fibrocimento-amianto. Novamente uma diferença de 15 min foi observada entre fibrocimento-sisal e cimento amianto.

5. CONCLUSÃO

Os estudos mostraram que altas intensidades de refino da polpa celulósica melhoram o desempenho mecânico dos compósitos, principalmente após o envelhecimento. Isso se deve ao fato do refino ser responsável pela fibrilação das fibras individualizadas, que por sua vez favorece a ancoragem mecânica na matriz de base cimentícia.

A adição das fibras de PP melhorou principalmente a absorção de energia dos compósitos (tenacidade), pelo efeito sinérgico entre os dois tipos de fibras. Demonstrou-se que altas intensidades de refino da polpa celulósica quando associada com fibras de PP (CSF 20 mL) não são necessárias. Neste caso, a intensidade intermediária (CSF 220 mL) foi suficiente para obtenção de um bom desempenho mecânico do compósito (SP-220). Com isso, uma economia de energia pode ser alcançada na preparação da polpa, com conseqüente redução do custo final de produção.

A adição das fibras de PP, o aperfeiçoamento do processo de produção e o tratamento mecânico das fibras vegetais favoreceram o bom desempenho mecânico das telhas em relação a trabalhos precedentes.

Telhas produzidas neste trabalho e submetidas aos envelhecimentos acelerados, apresentaram propriedades mecânicas superiores aos propostos pela SKAT (Swiss Center for Appropriate Technology) e ILO (International Labour Office). O envelhecimento calor-chuva foi o mais degradante, com decréscimo de até 50% na força máxima e até 40% na energia específica. No entanto, elas devem ser também avaliadas após o envelhecimento natural.

Maiores teores de fibras de PP (em torno de 1,7%) nas telhas causaram problemas na conformação e na homogeneidade das telhas, porém favoreceram um reforço eficiente na manutenção da resistência após os envelhecimentos acelerados (valores de fator R superiores ao proposto pela norma européia EN 494).

A carbonatação acelerada melhorou as propriedades mecânicas das telhas reforçadas unicamente com polpa de sisal e foi eficiente na preservação dessas propriedades após envelhecimentos de imersão-secagem. Esses resultados também foram superiores àqueles estabelecidos pelas normas européias. Porém, a

carbonatação acelerada não influenciou o desempenho mecânico dos compósitos com fibras de PP.

A formulação S4_7 em temperatura ambiente apresentou-se com as propriedades térmicas mais favoráveis ao conforto térmico. A formulação com fibras de PP (S3PP1_7) a 60°C apresentou valor de condutividade térmica mais adequado ao conforto térmico. Nas comparações entre temperaturas de superfície interna das telhas, as de fibrocimento sem amianto se mostraram mais eficientes no amortecimento térmico do que telhas comerciais de cimento amianto.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Em relação ao equipamento de produção de telhas, deve ser considerada a possibilidade da instalação de um misturador no recipiente de armazenamento da massa. Foi observada perda de água neste recipiente durante as moldagens, o que pode provocar a heterogeneidade da mistura durante o processo de fabricação da telha. Dependendo dos constituintes da massa, pode ocorrer a precipitação dos particulados mais finos. Uma solução pertinente seria o uso de massas mais consistentes e/ou de superplastificantes (surfactantes).

Considerações também devem ser feitas em relação ao preenchimento da câmara de moldagem e posterior presagem pelos pistões. Perda considerável de massa da mistura ocorre nesta etapa da produção. Dispositivos devem ser desenvolvidos com a finalidade de recuperar a massa deslocada pela prensagem e retorná-la ao misturador para seu reaproveitamento.

Implantação de pressões negativas maiores na sucção do excesso de água (da ordem de 150 kPa) pode ser determinante na conformação das telhas durante a prensagem e no rendimento final da produção.

Detalhes quanto às bordas das telhas, arestas para o encaixe e superfície de acabamento do produto final também devem ser avaliados, considerando as sugestões acima descritas.

Melhorias na dispersão das fibras de PP também devem ser avaliadas com o objetivo de incrementar ainda mais as propriedades mecânicas e o reforço efetivo promovido por essas fibras.

A aceleração da carbonatação deve ser estudada em períodos mais longos de exposição à ambientes agressivos, a fim de elucidar os mecanismos envolvidos durante a adsorção do dióxido de carbono e formação de componentes solúveis, como o bicarbonato de cálcio no envelhecimento natural. A avaliação da permeabilidade das telhas ao ar pode trazer informações importantes sobre as condições ideais para difusão do CO₂ nos poros do material. Avaliações também devem ser feitas com relação à eficiência da carbonatação acelerada em telhas utilizando outros tipos de cimento (com menor resistência inicial por exemplo).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELMOULEH, M.; BOUFI, S.; BELGACEM, M.N.; DUARTE, A.P.; BEN, SALAH, A.; GANDINI, A. Modification of cellulosic fibres with functionalised silanes: development of surface properties. **International Journal of Adhesion & Adhesives** 24, 43–54. 2004.

ACI544.1R. **State-of-the-art report on fiber reinforced concrete**. American Concrete Institute, Detroit, MI, USA, 1996.

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 Technology and Design, 5)

AGOPYAN V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: uso de fibras vegetais**. 1991. 204p. Tese (Livro-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JÚNIOR, 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. **Proceedings...** Cali: Universidad del Valle, 1997. p.23-40.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JÚNIOR, H.; JOHN, V.M.; CINCOTTO, M.A. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement & Concrete Composites**; 27:527-536. 2005.

AKERS, S.A.S., STUDINKA, J.B. Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests. **The International journal of cement composites and lightweight concrete**. v.11, n.2, p.93-7, 1989.

AKIYOSHI, M.M. **Avaliação das propriedades térmicas e mecânicas visando à simulação computacional de cerâmicas refratárias**. 2001. 157p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 948-81**, Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete. West Conshohocken, PA, USA. 1981.

ANON. New a wood-fibre cement building board. CSIRO **Industrial Research News** 1981; No. 146: 1-2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**, Cimento

Portland de Alta Resistência Inicial, especificação. 5p. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**, Cimento Portland Composto, especificação, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7581**. Telha ondulada de fibrocimento. 5p. Rio de Janeiro. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13858-2**. Telhas de concreto: parte 2 : requisitos e métodos de ensaio. 10p. Rio de Janeiro. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14344**, Pasta celulósica - determinação da drenabilidade – Método *Canadian Standard freeness*, Rio de Janeiro, 2003.

BAÊTA, F.C.; SOUZA, C.F. Ambiência em edificações rurais. **Conforto térmico animal**. Viçosa: UFV, 1997. 246p.

BALAGURU, P.N.; SHAH, S.P. **Fiber reinforced cement composites** New York, McGraw-Hill, 1992.

BARTOS, P. Review paper: bond in fibre reinforced cements and concretes. **International Journal of cement composites**, v.3, n.3, p.159-77, Aug. 1981.

BEAUDOIN, J.J. **Handbook of fiber-reinforced concrete: principles properties, developments and applications**. Park Ridge, NJ: Noyes Publications; 1990.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. Elsevier Applied Science, London, UK, 1990.

BENTUR A. Fiber-reinforced cementitious materials. In: SKALNY, J.P., ed. **Material Science of concrete I**. Westerville, American Ceramic Society, 1989. p.223-84.

BENTUR, A.; AKERS, S.S.S. The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced autoclaved cement composites, **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete** v.11, n.2, p.111-5, 1989.

BEZERRA, E.M.; JOAQUIM, A.P.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Some properties of fiber-cement composites with selected fibers. In: Brazilian Conference on Non-Conventional Materials and Technologies: Affordable Housing and Infrastructure. **Proceedings...** Brazil: UFP. Brasil Nocmat 2004 , Brazil, 2004, 9p.

BEZERRA, E.M.; SAVASTANO JÚNIOR, H.; JOHN, V.M., AGOPYAN, V. Mineral additions and their influence on fiber cement behavior. Ninth International Conference Inorganic-Bonded Composite Materials. Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: British Columbia, Canada, 2004, 12p.

BEZERRA, E.M., SAVASTANO JÚNIOR, H. The influence of type and refinement of the cellulose pulp in the behavior of fiber cement with hybrid reinforcement – a regression analysis application. 17th ASCE Engineering Mechanics Conference. Newark. **Proceedings...** Newark: University of Delaware, Newark, DE, 2004, 8p.

BISANDA, E.T.N.; ANSELL, M.P. Properties of sisal - CNSL composites. **Journal of Materials Science**. 27:1690-700. 1992.

BRITT, K.W. **Handbook of pulp and paper technology**. 2nd ed.. New York: Van Nostrand Reinhold;. Chapters 1–3, 5. 1970.

CAMPBELL, M.D.; COUTTS, R.S.P. Wood Fibre-reinforced cement composites. **Journal of Materials Science**.;15:1962–70. 1980.

CHAND, N., TIWARY, R.K., ROHATGI, P.K. Bibliography resource structure properties of natural cellulosic fibres an annotated bibliography. **Journal of Materials Science**; 23:381-7. 1988.

CHATVEERA, B., NIMITYONGSKUL, P. Mechanical properties of sisal fibermortar composites containing rice husk ash. In: International symposium on fibre reinforced cement and concrete, 4., Sheffield,. **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1992. p.1056-72. (RILEM Proceedings, 17).

CLARK, J.D.A. **Pulp technology and treatment for paper**. San Francisco: Miller Freeman;. Chapters 6–8, 12–14. 1987.

COUTTS, R.S.P.; KIGHTLY, P. Microstructure of autoclaved refined wood-fibre cement mortars. **Journal of Materials Science**;17:1801-1806,1982.

COUTTS, R.S.P.; RIDIKAS, V. Refined wood fibre-cement products. **Appita**; 35(5): p.395-400. 1982.

COUTTS, R.S.P. Autoclaved beaten wood fibre-reinforced cement composites. **Composites**;15 (2):139–43. 1984.

COUTTS, R.S.P.; KIGHTLY, P. Bonding in wood fibre cement composites.**Journal of Materials Science**.;19:3355–3359. 1984.

COUTTS, R.S.P. High yield wood-pulps as reinforcement for cement products. **Appita**; 39(1):31-35. 1986.

COUTTS, R.S.P. Wood fibre reinforced cement composites. In: SWAMY, R.N., ed. **Natural fibre reinforced cement and concrete**. Glasgow, Blackie, 1988. p.208-42. (Concrete Technology and Design, 5)

COUTTS, R.S.P. From forest to factory to fabrication. In: Swamy R.N. editor. 4th

International Symposium Fibre Reinforced Cement and Concrete. **Proceedings...** London: E&FN Spon; 1992. p. 31-47 (RILEM Proceedings, 17)

COUTTS, R.S.P.; WARDEN, P.G. Sisal pulp reinforced cement mortar. **Cement & Concrete Composites**; 14:17-21. 1992.

COUTTS, R.S.P.; NI, Y. Autoclaved Bamboo Pulp Fibre Reinforced Cement. **Cement & Concrete Composites** 17, 99-106. 1995.

COUTTS, R.S.P. A review of Australian research into natural fibre cement composites. **Cement & Concrete Composites**, 27, p.518-526. 2005.

DE LHONEUX, B.; AKERS, S.; ALDERWEIRELDT, L.; AMIYA, S.; CARMELIET, J.; HIKASA, J.; SAENEN, W.; STUDINKA, J.; BOSCH, M.V. Durability study of PVA fibres in fibre-cement products. In: IVth International Symposium on Concrete for a Sustainable Agriculture: Agro-, Aqua- and Community Applications. **Proceedings...** Guent: Ghent University, Agricultural Research Centre, 2002.

DELVASTO, S.; BOTACHE, C.A.; ALBÁN, F.; GUTIÉRREZ, R.M.; PERDOMO, F.; SEGOVIA, F.; AMIGÓ, V. Effect of fique fiber surface chemical treatments on the physical and mechanical properties of the fiber subjected to aggressive mediums. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologia Não-convercinais: Habitações e Infra-estrutura de Interesse Social – Brasil NOCMAT 2004. Pirassununga. **Anais...** Pirassununga: FZEA-USP, 2004 (CD-ROM. Pirassununga - SP, Brasil, 2004).

DEVITO, R.A. **Estudos físicos e mecânicos de telhas de cimento de escória de alto-forno reforçadas com fibras celulósicas residuais**. 2003, 63p. Dissertação (Mestrado: Escola de Engenharia de São Carlos). Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **EN 494**. Fibre-cement profiled sheets and fittings for roofing – Products specification and test methods. 1994. BSI – British Standards Institution, London, UK. 1994.

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: 4th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, Bogor. **Proceedings...** Bogor: Agricultural University, Philippines, 1998. p.428-436.

FAOSTAT data: Food and Agricultural Organization of the United Nations. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>> Atualizado em Fev 2005. Acesso em: 10 janeiro 2006.

FU, S.; HU, X.; YUE, C.Y. The flexural modulus of misaligned short-fiber-reinforced polymers. **Composites Science and Technology**, v.59, p. 1533-42. 1999.

GARRET, W.N.; BOND, T.E.; PEREIRA, N. Influence of shade height on physiological response of cattle during hot weather. **Transactions of the ASAE** 1967; 10(4): 433-434.

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. Swedish Cement and Concrete Research Institute, **CBI Research fo. 1:83**, Stockholm,. p. 255. 1983

GRAM, H.E. Durability of natural fibres in concrete. In: SWAMY, R.N., editor. **Natural fibre reinforced Cement and Concrete**. Glasgow, Blackie, 1988. p.256-85. (Concrete Technology and Design, 5)

GRAM, H.E.; GUT, P. **Directives pour le controle de qualite**. "Quality control guidelines for fibre or micro concrete tiles". St. Gallen, Skat/BIT, 1994. 69p. (Serie Pedagogique TFM/TVM: Outil 23).

GRAY, R.J. Analysis of the effect of embedded fibre length on fibre debonding and pull-out from an elastic matrix - part 2: application to a steel fibre-cementitious matrix composite system. **Journal of materials Science**, v.19, n.5, p.1680-91, 1984.

GRAY, R.J.; JOHNSTON, C.D. The influence of fibre-matrix interfacial bond strength on the mechanical properties of steel fibre reinforced mortars. **The International journal of cement composites and Lightweight concrete**, v.9, n.1, p.43-55, 1987.

GREENWOOD, R. **James Hardie and asbestos a tough bond to break**. Business Review Weekly, 12 November 10, 1983.

GUIMARÃES, S.S. Vegetable fiber-cement composites. In: Sobral, H.S., editor. Second International RILEM Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials. **Proceedings...** London: Chapman and Hall; 1990. p.98 –107.

HAGEMANN, L.; PETERS, E. Thermal conductivity – comparison of methods: ASTM-method – hot wire and its variations. **Interceram**, v. 2, p. 131-5, 1982.

HANNANT, D.J. **Fibre Cements and Fibre Concretes**. Chichester: John Wiley;. 209p. 1978

HANNANT, D.J.; HUGHES, D.C. Durability of cement sheets reinforced with layers of continuous networks of fibrillated polypropylene fil. In. developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, ed. R.N.Swamy, R.L. Wagstaffe & D.R.Oakley. **Proceedings...** RILEM Symposium, Sheffield, 1986, Paper 7.8.

HARRIS, D.C. **Análise Química Quantitativa**. 5ª edição. Editora LTC, 2001.

HARRISON, P.T.C.; LEVY, L.S.; PRATRICK, G.; PIGOTT, G.H.; SMITH, L.L. Comparative hazards of chrysotile asbestos and its substitutes: a European perspective. **Environ Health Perspect.** 107(8): 607–11. 1999.

HEINRICKS, H.; BERKENKAMP, R.; LEMPFER, K.; FERCHLAND, H.J. Global review of technologies and markets for building materials. In: Moslemi AA, editor. 7th International Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference. Moscow. **Proceedings...** Moscow: University of Idaho; 2000. 12p. [Siempelkamp Handling Systems report].

HODGSON, A.A. **Alternatives to asbestos and asbestos products**. Anjalena Publications Ltda, 1985.

ILLSTON, J.M.; DINWOODIE, J.M.; SMITH, A.A. **Concrete, Timber and Metals**, Van Nostrand Reinhold, New York, 663 p. 1979.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CRISOTILA. Disponível em: <<http://www.crisotilabrasil.org.br>> . Acesso em: 15 nov 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. **8894-2**. Refractory materials: determination of thermal conductivity – part 2: hot-wire method: (Paralell). p. 1-6. Switzerland, 1990.

JAMES HARDIE AND CO. PTY LTD. **Report on paper pulp sheets**. Internal Report, November 1947.

JOHN, V.M. **Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e edificações**. 1987. Dissertação (mestrado). UFRS, Porto Alegre, 1987.

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. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 112p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JOHN, V.M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T.A. Durabilidade de compósitos de cimento e fibras vegetais para telhados. In: Simpósio Ibero-Americano de Telhados para Habitação, 3. **Anais...** São Paulo: Cyted/USP, 1998. p.51-9.

JONES, F.E. Weathering tests on asbestos cement roofing materials. **DSIR Building Research Technologies**. Paper 29, London, 38p. 1946.

KALBSKOPF, R.; DE LHONEUX, B.; VAN DER HEYDEN, L.; ALDERWEIRELDT, L. Durability of Fiber-Cement Roofing Products. In: Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference. **Proceedings...** Moscow ID: University of Idaho,

2002. p.347-353.

KAWABATA, C.Y. **Desempenho térmico de diferentes tipos de telhados em bezerreiros individuais**. 2003. 94p. Dissertação (Mestrado, FZEA- USP). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga. 2003.

KRENCHER, H.; SHAH, S.P. Applications of polypropylene fibres in Scandinavia. **Concrete International Design & Construction**, 7. 32-4. 1985.

LEAL, A.F.; NASCIMENTO, J.W.B.; BARBOSA, N.P. Telhas longas à base de argamassa de cimento Portland reforçadas com fibras de sisal. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologia Não-convercinais: Habitações e Infra-estrutura de Interesse Social – Brasil NOCMAT 2004. Pirassununga. **Anais...** Pirassununga: FZEA-USP, 2004 (CD-ROM. Pirassununga - SP, Brasil, 2004).

LEE, A. **O impacto da substituição do telhado de fibrocimento.**, 2000. 11p. Monografia (Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica): Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

LU, J.Z.; WU, Q.; McNABB JUNIOR, H.S. Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: a review of coupling agents and treatments. **Wood and Fiber Science**, v.32, n.01, p.88-104, 2000.

LI, Z.; WANG, X.; WANG, L. Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. **Composites: Part A applied science and manufacture**, 9p., 2005.

LI, Y.; MAI, Y.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, V.60, p.2037-2055. 2000.

MACVICAR, R.; MATUANA, L.M.; BALATINECZ, J.J. Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**; 21:189–96. 1999.

MANGAT, P.S.; AZARI, M.M. Shrinkage of steel fibre reinforced cement composites. **Materiaux at construsions**, v.21, p.163-71, 1988.

MARTELLO, L.S. **Diferentes recursos de climatização e sua influencia na produção de leite, na termorregulação dos animais e no investimento das instalações**. 2002. 67p. (Dissertação de Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga. 2002.

MASSAZZA, F.; COSTA, U. Bond: paste-aggregate, paste-reinforcement and paste-fibres. In: International congress on the chemistry of cement, 8. Rio de Janeiro, 1986. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Abla, 1986.v.1, p.158-80.

MCKENZIE, A.W. **A Guide to Pulp Evaluation**; CSIRO Division of Forestry and

Forest Products: Melbourne, Australia, 1994; 85p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto estrutura, propriedades e materiais**. Editora PINI. São Paulo, 1994.

MENDHAM, J.; DENNEY, R. C.; BARNES, J. D.; THOMAS, K.J.M.; VOGEL, J. **Análise Química Quantitativa**. 6ª ed. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2002.

MINDESS, S.; ODLER, I.; SKALNY, J. Significance to concrete performance of interfaces and bond: challenges of the future. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 8., Rio de Janeiro, 1986. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Abla, 1986. v.1, p.151-7.

MOHR, B.J.; NANK, O. H.; KURTIS K.E. Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. **Cement & Concrete Composites** 27 (2005) p.435-448.

MORRISSEY, F.E.; COUTTS, R.S.P.; GROSSMAN, P.U.A. Bond between cellulose fibres and cement. **The International journal of cement composites and Lightweight concrete**, v.7, n.2, p.73-80, 1985.

MOTTA, L.A.C. **Tratamentos para melhorar o desempenho e durabilidade das fibras de coco e sisal na matriz de cimento Portland**. 2006, 110p. Tese (Doutorado, Departamento de Engenharia de Construção Civil) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MURHERJEE, P.S.; SATYANARAYANA, K.G. Structure and properties of some vegetable fibres, part 1. Sisal fibre. **Journal of Materials Science**; 19:3925-3934. 1984.

NITA, C.; JOHN, V.M.; DIAS, C.M.R.; SAVASTANO JÚNIOR, H.; TAKEASHI, M.S. Effect of metakaolin on the performance of PVA and cellulose fibers reinforced cement. In: 17th ASCE Engineering Mechanics Conference. Newark. **Proceedings...** Newark: University of Delaware, DE, 2004, 11p.

NUTMAN, K.F.J. Agave fibres part I. morphology, histology, length and fineness; grading problems. **Empire Journal of Expedition**. Agriculture, 5 (1937) 75-92.

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, M.J.E. **A influência dos tratamentos simples para as fibras de malva empregadas em reforço de argamassas de cimento portland**. 1989. 170p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

1989.

PIMENTEL, L.L. **Telhas onduladas à base de cimento Portland e resíduos de *Pinus caribaea***. 2000, 66p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

PURNELL, P.; SHORT, N.R.; PAGE, C.L.; MAJUMBAR, A.J. Microstructural observations in new matrix glass reinforced cement. **Cement and Concrete Research**. 30. 1747-1753. 2000.

RAS Technical Bulletin. **Fibre concrete roofing (FCR) and micro concrete roofing (MCR)**. St. Gallen: Basin; 1994. Issue n.3.

RILEM 49TFR. **Reunion Internationale Des Laboratoires D'Essais Et Des Recheches Sr lex Materiaux Et Les Constructions (RILEM)** – Testing Methods for Fibre Reinforced Cement-Based Composites. *Materiaux et Constructions*, v.17, n.102, 1984, p.441-456.

RODRIGUES, J. F. **Curso Reciclagem de Papel – Reciclando conhecimentos**. Instituto de Engenharia (IE)/Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP), São Paulo, SP, 2001 (n.º M-01:07).

ROMA JÚNIOR, L.C. **Cobertura de fibrocimento e sistemas de climatização: influência no desempenho de vitelos mestiços e da raça holandesa**. 2004. 83p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2004.

SANTOS, W. N. **Contribuição ao estudo da condutividade térmica do material cerâmico concreto refratário utilizando a técnica de fio quente com ajuste por regressão não-linear**. 1988. 149p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade São Paulo, São Carlos. 1988.

SAS. USER'S GUIDE: Basic and Statistic. Cary,NC: SAS, 1995. 1.686 p.

SAVASTANO JÚNIOR, H. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito**. 1992. 249p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; DANTAS, F.A.Z.; 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 JÚNIOR, H.; AGOPYAN, V.; NOLASCO, A.M.; PIMENTEL, L. Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construction and Building Materials**, Kidlington, v. 13, n. 8, p. 433-438, 1999.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement & Concrete Composites**; 22: 379–384, 2000.

SAVASTANO JÚNIOR, H. **Sistema de cobertura para construção de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais**. 2000. 144p. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SAVASTANO JÚNIOR, H. Processo de obtenção de telha de fibrocimento com reforço à base de polpa celulósica, por meio de sucção de água e prensagem, e produtos assim obtidos. 2002. Patente: Privilégio e Inovação. n. 0201204-9, "Invenção de processo e produto obtido". 02 de abr. de 2002 (Depósito).

SAVASTANO JÚNIOR, H.; JOHN, V.M.; AGOPYAN, V.; CINCOTTO, M.A. Recycling agricultural and industrial residues as cement-based building materials. In: International Symposium on Concrete for a sustainable agriculture: agriculture, aquaculture and communities applications, 4., Ghent, 2002. **Proceedings...** Ghent: Ghent University & Agricultural Research Center. Ghent, 2002. p.251-258.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. **Cement & Concrete Composites**, v.25, p. 585-592, 2003.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Evaluation of pulps from natural fibrous material for use as reinforcement in cement product. **Materials and manufacturing process**, v.19, n.º 5, p.963-978, 2004.

SEACH, B.G. **Private communication**. James Hardie Industries, 1987.

SEVEGNANI, K.B.; GUELFILHO, H.; DA SILVA, I.J.O. Comparação de vários materiais de cobertura através de índices de conforto térmico. **Scientia Agrícola**, 01-07, 1994.

SHAH, S.P. Fiber Reinforced Concrete. In: F.K.Kong, E.Cohen, e F.Roll editores., **Handbook of Structural Concrete**. McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.

SILVA, A.C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. 2002. 128p. Dissertação (Mestrado).- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SOROUSHAN, P.; MARIKUNTE, S. Long-Term durability and moisture sensitivity of cellulose fiber reinforced cement composites. In: Swamy RN, editor. **Fibre Reinforced Cement and Concrete**. RILEM, p.1166-1184. 1992.

SOROUSHAN, P.; MARIKUNTE, S.; WON, J. Wood fiber reinforced cement composites under wetting–drying and freezing–thawing cycles. **Journal Material of Civil Engineering**. 6(4):595–611. 1994.

SWAMY, R.N. Influence of slow crack growth on the fracture resistance of fibre cement composites. **The International Journal of Cement Composites**, v.2, n.1, p.43-53, Feb. 1980.

SWAMY, R.N. **Natural fibre reinforced cement and concrete**. Glasgow, Blackie. 288p. 1988.

SWAMY, R.N. Vegetable fibre reinforced cement composites – a false dream or a potencial reality? In: Sobra H.S., editor. 2nd International Symposium on Vegetable Plants and their fibres as Building Materials. London. **Proceedings...** London: Chapman and Hall; 1990. p. 3-8 (RILEM Proceedings, 7).

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**, 2 ed. London, Thomas Telford, 1997.

TINÔCO, I.F.F. Industrial Aviculture: New Concepts of Materials, Conceptions and Constructive Techniques Available for Brazilian Poultry Houses. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, vol.3, no.1, p.01-26. 2001.

TOLÊDO FILHO, R.D. Materiais compósitos reforçados com fibras naturais vegetais. In: Toledo filho, R.D.; Nascimento, J.W.B.; Ghavami, K. (coord.). Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. cap.2, p.49-82.

TOLÊDO FILHO, R.D.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G.L.; GHAVAMI, K. Durability of alkali sensitive sisal and coconut fibres in cement based composites. **Cement & Concrete Composites**, 6(22):127–43. 2000.

WEI, S.; MANDEL, J.A.; SAID, S. Study of the interface strength in steel fiber-reinforced cement-based composites. **ACI JOURNAL**, v.83, n.4, p.597-605, July/Aug. 1986.