



CAMILA LAÍS FARRAPO

**DURABILIDADE DE FIBROCIMENTO
REFORÇADO COM POLPA DE SISAL APÓS 10
ANOS DE ENVELHECIMENTO NATURAL**

LAVRAS – MG

2015

CAMILA LAÍS FARRAPO

**DURABILIDADE DE FIBROCIMENTO REFORÇADO COM POLPA
DE SISAL APÓS 10 ANOS DE ENVELHECIMENTO NATURAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. José Roberto Soares Scolforo

Coorientadores

Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli

Dr. Rafael Farinassi Mendes

LAVRAS – MG

2015

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Farrapo, Camila Laís.

Durabilidade de fibrocimento reforçado com polpa de sisal após 10 anos de envelhecimento natural / Camila Laís Farrapo. – Lavras : UFLA, 2015.

86 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)—Universidade Federal de Lavras, 2015.

Orientador: José Roberto Soares Scolforo.

Bibliografia.

1. Fibrocimento. 2. Carbonatação. 3. Autoclavagem. 4. Fibras sintéticas. 5. Envelhecimento natural. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CAMILA LAÍS FARRAPO

**DURABILIDADE DE FIBROCIMENTO REFORÇADO COM POLPA
DE SISAL APÓS 10 ANOS DE ENVELHECIMENTO NATURAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 05 de outubro de 2015.

Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli UFLA

Dr. José Benedito Guimarães Júnior UFG

Dr. José Roberto Soares Scolforo
Orientador

LAVRAS – MG

2015

AGRADECIMENTOS

À minha querida mãe, exemplo de força e dedicação, pela educação, incentivo, carinho e, aos meus demais familiares, pelo apoio.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBIOMAT) pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

Aos professores Dr. José Roberto Soares Scolforo, Dr. Rafael Farinassi Mendes, Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli pela orientação, paciência, ensinamentos e amizade.

Ao professor Dr. Lourival Marin Mendes pela contribuição e carinho.

Ao Laboratório de Construções e Ambiente da FZEA-USP, em especial ao professor Dr. Holmer Savastano Jr e ao Zaqueu Dias Freitas pela disposição dos materiais e equipamentos necessários para realização de alguns ensaios.

Ao Laboratório da Embrapa Instrumentação de São Carlos, em especial à Dr. Maria Alice Martins, pelo auxílio na condução dos experimentos.

Às grandes companheiras Livia, Tamires e Camila que me acompanharam nessa jornada e contribuíram muito durante a condução do mestrado.

À querida República Menina Veneno e todas as grandes amigas que passaram por ela.

Aos meus colegas do PPGBIOMAT pela colaboração e amizade.

Enfim, a todos aqueles que participaram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

RESUMO

Materiais de origem cimentícia são tipicamente caracterizados por seu comportamento frágil. Dessa forma, a inserção de fibras como reforço ajuda na absorção de energia do compósito. O material convencional usado como reforço em fibrocimento é o amianto, porém a tendência mundial é rever o uso dessa fibra mineral buscando novas fibras alternativas. O uso de fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios gera grande expectativa, mas a durabilidade desse tipo de compósito ainda é um desafio. Portanto, objetivou-se neste trabalho avaliar o efeito de técnicas (adição de fibras sintéticas, carbonatação e autoclavagem) para o aumento da durabilidade de telhas reforçadas com polpa de sisal. As telhas foram produzidas com processo de drenagem e pressão da suspensão, sendo avaliada a porcentagem de polpa de sisal em associação ou não com fibras de polipropileno e o efeito da carbonatação e da autoclavagem sobre a durabilidade dos compósitos cimentícios. O envelhecimento natural das telhas foi feito pelo período de 10 anos na cidade de Pirassununga/SP. Foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais após 10 anos e comparado aos resultados obtidos aos 28 dias. Após o envelhecimento, quanto maior o teor de polipropileno melhor o desempenho das telhas, pois, diferente das fibras vegetais, as fibras sintéticas não degradam no cimento ao longo do tempo. Em relação à carbonatação, mesmo após o envelhecimento, a técnica permitiu a preservação parcial da fibra vegetal em um ambiente alcalino, fato que foi confirmado nos resultados mecânicos, nas imagens de microscopia eletrônica de varredura e na difração de raios X. Aos 28 dias, as telhas autoclavadas obtiveram piores resultados mecânicos comparados às não autoclavadas, mas após 10 anos a autoclavagem se mostrou eficiente e ajudou na preservação do material vegetal na matriz cimentícia.

Palavras-chave: Fibrocimento. Carbonatação. Autoclavagem. Fibras sintéticas. Envelhecimento natural.

ABSTRACT

Cementitious materials are typically characterized by their brittle trait. Thus, the insertion of fibers as reinforcement improves the composite's energy absorption. The conventional material used as reinforcement for fiber cement is asbestos. However, global tendency is to review the use of this mineral fiber. The use of natural fibers as reinforcement in fiber cement generates high expectations, but the durability of this type of composite is still a challenge. Thus, this work aimed at assessing the effect of several techniques (addition of synthetic fibers, carbonation and autoclaving) to increase the durability of reinforced roofing tiles with sisal pulp. The roofing tiles were produced by means of vacuum-pressure process, used to evaluate the percentage of sisal pulp in association or not with polypropylene fibers, as well as the effect of carbonation and autoclaving over the durability of cement composites. The natural aging of the roofing tiles was done over a 10-year period, in the municipality of Pirassununga, São Paulo, Brazil. We evaluated physical, mechanical and microstructural properties after such period, and compared the results to those obtained after 28 days. After aging, the higher polypropylene contents was, the best was the performance of the tiles, given that, unlike natural fibers, synthetic fibers do not degrade the cement over time. Regarding the carbonation, even after aging, the technique allowed the partial preservation of plant fiber in an alkaline environment, fact confirmed in the mechanical results with images obtained by means of scanning electron microscopy and X-ray diffraction. After 28 days, the autoclaved tiles presented the worse outcomes when compared to non-autoclaved. However, after 10 years, autoclaving was efficient and aided in preserving the plant material in the cement matrix.

Keywords: Fiber Cement. Carbonation. Autoclaved. Synthetic fibers. Natural aging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema do Processo Hatschek	16
Figura 2	Esquema do comportamento de um compósito quando submetido à flexão: a) sem reforço de fibras e b) com reforço de fibras; c) caminhamento da trinca: 1- deslocamento; 2 - interceptação; 3 - arrancamento; 4 - fratura da fibra	18
Figura 3	Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	21
Figura 4	(a) Esquema do equipamento para produção de telhas onduladas e (b) equipamento.....	29
Figura 5	Telhas expostas na bancada em 2005 (a) e em 2015 (b)	32
Figura 6	Ensaio mecânico das telhas onduladas.....	33
Figura 7	Valores médios e desvio padrão da carga máxima suportada pelas telhas aos 28 dias e após 10 anos	36
Figura 8	Valores médios e desvio padrão da deformação na carga máxima aos 28 dias e após 10 anos.....	37
Figura 9	Valores médios e desvio padrão da deformação total aos 28 dias e após 10 anos.....	38
Figura 10	Valores médios e desvio padrão da energia específica aos 28 dias e após 10 anos.....	39
Figura 11	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 4,7% Cel	40
Figura 12	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 3% Cel + 1,7% PP	40
Figura 13	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 3% Cel + 1,7% PP	42
Figura 14	Valores médios e desvio padrão da absorção de água aos 28 dias e após 10 anos.....	43

Figura 15	Valores médios e desvio padrão da porosidade aparente aos 28 dias e após 10 anos.....	44
Figura 16	Valores médios e desvio padrão da densidade aparente aos 28 dias e após 10 anos.....	45
Figura 17	Valores médios e desvio padrão da carga máxima suportada pelas telhas carbonatadas e não carbonatadas.....	47
Figura 18	Valores médios e desvio padrão da deformação na carga máxima das telhas carbonatadas e não carbonatadas.....	48
Figura 19	Valores médios e desvio padrão da deformação total das telhas carbonatadas e não carbonatadas.....	49
Figura 20	Valores médios e desvio padrão da energia específica das telhas carbonatadas e não carbonatadas.....	49
Figura 21	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 4,7% Cel e sem carbonatação.....	51
Figura 22	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 4,7% Cel e carbonatada.....	51
Figura 23	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 3% Cel + 0,5% PP não carbonatada.....	52
Figura 24	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 3% Cel + 0,5% PP e carbonatada.....	53
Figura 25	Espectros de Difração de Raios X (DRX) das amostras reforçadas com 4,7% cel carbonatada e não carbonatada.....	54
Figura 26	Espectros de Difração de Raios X (DRX) das amostras reforçadas com 3% Cel + 0,5% PP carbonatada e não carbonatada.....	54

Figura 27	Espectros de Difração de Raios X (DRX) das amostras reforçadas com 3% Cel + 1,7% PP carbonatada e não carbonatada.....	55
Figura 28	Valores médios e desvio padrão da absorção de águas telhas carbonatadas e não carbonatadas.....	56
Figura 29	Valores médios e desvio padrão da porosidade aparente das telhas carbonatadas e não carbonatadas	56
Figura 30	Valores médios e desvio padrão da densidade aparente das telhas carbonatadas e não carbonatadas	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Formulações para produção das telhas onduladas.....	30
Tabela 2	Formulações e tratamentos das telhas do envelhecimento natural ...	32
Tabela 3	Resultados mecânicos das telhas autoclavadas e não autoclavadas .	59
Tabela 4	Resultados físicos das telhas autoclavadas e não autoclavadas.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Produção do fibrocimento.....	15
2.2	Desenvolvimento do fibrocimento sem amianto.....	16
2.3	Reforço da matriz cimentícia com fibras vegetais.....	17
2.3.1	Fibras vegetais.....	19
2.3.2	Sisal.....	21
2.4	Durabilidade.....	23
2.5	Fibras sintéticas.....	24
2.6	Processo de Autoclavagem.....	25
2.7	Processo de Carbonatação.....	26
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1	Produção das telhas onduladas.....	29
3.2	Carbonatação acelerada.....	31
3.3	Envelhecimento natural.....	31
3.4	Caracterização mecânica.....	32
3.5	Caracterização física.....	33
3.6	Difração de Raios X (DRX).....	34
3.7	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	35
3.8	Análise estatística.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	Efeito das fibras sintéticas na durabilidade das telhas.....	36
4.2	Efeito da carbonatação na durabilidade das telhas.....	47
4.3	Efeito da autoclavagem na durabilidade das telhas.....	58
5	CONCLUSÕES.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICES.....	73

1 INTRODUÇÃO

De forma geral, os materiais de origem cimentícia apresentam baixa tenacidade, o que resulta em fratura e/ou fissuras quando expostos à carga elevada ou vibrações excessivas (WEI; MEYER, 2015). Nesse sentido, algumas alternativas foram avaliadas para contornar esse problema, sendo a inserção de fibras como reforço aquela que apresentou melhores resultados para minimizar esses danos, fornecendo melhoria na resistência à flexão, tenacidade e resistência ao impacto, além de reduzir a retração plástica, diminuir a condutividade térmica e melhorar o desempenho acústico, aumentando a absorção do som (SOROUSHIAH; WON; HASSAN, 2012).

O elemento de reforço tradicionalmente utilizado para esse fim é o amianto, muito em função da boa resistência física e mecânica, bom comportamento térmico e acústico, além de baixo custo e alta durabilidade (WINKLER, 2015). Contudo, essas fibras estão associadas às doenças pulmonares irreversíveis, o que fez com que em vários países e alguns estados brasileiros fosse proibida a produção de materiais utilizando o amianto (INSTITUTO BRASILEIRO DO CRISOTILA, 2012).

Esse fato resultou na necessidade de novas pesquisas com diferentes tipos de reforços, dentre os quais as fibras sintéticas e as fibras vegetais como possíveis substitutos do amianto. Porém, em função do aumento considerável do custo final do produto com a utilização das fibras sintéticas (DIAS; SAVASTANO JUNIOR; JOHN, 2010) as pesquisas atualmente estão direcionadas para a avaliação das fibras vegetais.

As vantagens de utilização dessas fibras vegetais estão associadas, além do menor custo, ao fato de ser oriundas de fontes renováveis, atóxicas, isolantes, apresentarem boa relação massa/resistência, e proporcionarem ampla disponibilidade, principalmente, quando se refere ao Brasil, país que se destaca

por ser um dos maiores produtores mundiais de fibras vegetais, o que gera expectativa quanto ao uso desse material como reforço do fibrocimento. Além disso, o uso de fibras vegetais como reforço em cimento é importante, pois elas são consideradas fibras de processo, ou seja, auxiliam na dispersão dos materiais durante a produção do fibrocimento (BENTCHIKOU et al., 2012; MORTON; COOKE; AKERS, 2010; NEITHALATH; WEISS; OLEK, 2004; SATYANARAYANA; ARIZAGA; WYPYCH, 2009; TOLÊDO FILHO et al., 2003; TOLÊDO FILHO et al., 2005; TONOLI, 2006).

Alguns estudos, utilizando fibras vegetais e/ou polpas celulósicas de diferentes origens já foram avaliados, dentre elas pode-se destacar os feitos com partículas e polpas de madeira (COUTTS, 2005; TONOLI et al., 2010b), fibras e polpas de sisal (LI; MAI; YE, 2000; TOLEDO FILHO et al., 2003; TONOLI, 2010a), fibras de coco (GHAVAMI; TOLEDO FILHO; BARBOSA, 1999), fibras e polpa de bambu (SUDIN; SWAMY, 2006) e fibras de bagaço de cana (AGGARWAL, 1995; BILBA; ARSENE, 2008).

Contudo, uma preocupação com a utilização de fibras vegetais em fibrocimento se deve à sua instabilidade dimensional, em virtude de seu caráter hidrofílico e, também, da degradação alcalina da fibra proporcionada pela matriz cimentícia. Como consequências desses fatores, ocorre uma perda da aderência na interface fibra-cimento e um aumento de micro e microfissuras, o que contribui para a diminuição da resistência e da durabilidade do compósito de fibrocimento com fibras celulósicas (MENDES, 2014; TONOLI et al., 2013).

Nesse sentido, algumas alternativas estão sendo avaliadas para obtenção de um fibrocimento reforçado com fibras vegetais e que seja durável, dentre os quais se destacam a associação com fibras sintéticas (PIZZOL et al., 2014), a modificação química superficial das fibras (MENDES et al., 2015), o refino das fibras (TONOLI, 2006), a mudança das fases químicas do cimento com tratamento em autoclave (COOKE et al., 2000; FERNÁNDEZ-CARRASCO;

CLARAMUNT; ARDANUY, 2014) e a utilização da técnica de carbonatação (ALMEIDA et al., 2010; SANTOS et al., 2015; TONOLI, 2010a).

A autoclavagem já é utilizada em escala industrial, no entanto sua principal função é a redução do tempo de cura do produto, tendo baixo efeito na durabilidade do compósito da forma como está sendo executada (TONOLI, 2006). A carbonatação acelerada é um processo que permite a reação do hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ da matriz cimentícia com dióxido de carbono (CO_2), resultando em carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Em compósitos reforçados com fibras vegetais, a carbonatação da matriz é potencializada em decorrência de sua alta porosidade, que facilita a penetração do CO_2 permitindo, dependendo do cimento, formação de carbonato de cálcio no interior do material. Essa formação de carbonato acarreta na diminuição da alcalinidade do meio (diminuição do pH), fornecendo, por consequência, um ambiente menos agressivo à fibra (PIZZOL, 2013) e aumentando, assim, a durabilidade do compósito. Além disso, a carbonatação permite a retirada do CO_2 da atmosfera, o que ambientalmente é algo bastante interessante.

Outro ponto importante que merece ser discutido para o fibrocimento é a forma de análise da durabilidade, haja vista que quase todos os trabalhos fazem a determinação da durabilidade por processos acelerados, uma vez que o fator limitante seria o tempo de avaliação. Até o momento, poucos foram os trabalhos que abordaram a perda de resistência por envelhecimento natural do produto em períodos maiores de tempo (TONOLI et al., 2011), fato de suma importância para o entendimento do efeito das variáveis de produção sobre a qualidade do produto em uso, uma vez que não se encontram trabalhos que relacionam o envelhecimento acelerado com o envelhecimento natural.

Nesse contexto, objetivou-se neste trabalho avaliar o efeito de técnicas (adição de fibras sintéticas, autoclavagem e carbonatação) para o aumento da durabilidade de telhas reforçadas com polpas de sisal.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Produção do fibrocimento

No Brasil, o setor de fibrocimento possui 17 fábricas distribuídas por 10 estados brasileiros que empregam mais de cinco mil pessoas diretamente para a produção de 1,3 milhões de toneladas de produtos por ano (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS EXPOSTOS AO AMIANTO, 2012). Dentre os produtos obtidos, destacam-se as placas onduladas para telhados, placas planas para divisórias, revestimento de interiores ou exteriores, caixas d'água e tubos para água em baixa e alta pressão (MENDES, 2014).

O processo mais utilizado, para a produção de fibrocimento, é o Hatschek, o qual foi desenvolvido por Ludwing Hatschek, no final do século XIX, baseado na produção de papel. Desde então, o processo esteve sujeito a melhorias constantes, para alcançar alta produção e melhor desempenho sem afetar o seu princípio básico: filtragem de uma suspensão diluída de cimento na tela de um cilindro rotativo (IKAI et al., 2010).

Nesse processo (Figura 1), uma suspensão composta por água, cimento, minerais e fibras são misturados (estágio 1) e introduzidos em uma cuba que contém cilindros envolvidos por uma tela. Esses cilindros recolhem uma camada primária dos materiais sólidos, enquanto a água fica retida no interior do cilindro. As camadas que são formadas, nesses cilindros, ficam agrupadas em um feltro (estágio 2) que passam, ao longo das caixas de vácuo (estágio 3), para retirar o excesso de água. As camadas acumuladas seguem para outro cilindro (estágio 4) que prensa e uniformiza o produto (estágio 5) (NEGRO et al., 2005).

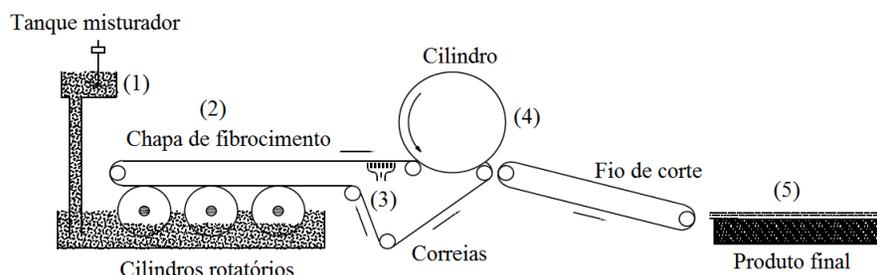


Figura 1 Esquema do Processo Hatschek

Fonte: Adaptado de Oliveira (2010).

Ainda hoje, o processo Hatschek é amplamente utilizado. Quase 85% dos produtos de fibrocimento vendidos no mundo são produzidos com base nesse processo (PIZZOL, 2013). Por outro lado, também, têm sido testados e desenvolvidos novas composições aos compósitos de matriz cimentícia, incorporando minerais, fibras sintéticas e naturais, aditivos químicos e cimento com características distintas do tradicional (IKAI et al., 2010).

2.2 Desenvolvimento do fibrocimento sem amianto

Os compósitos de matriz cimentícia são considerados como quebradiços, por apresentarem baixa resistência à tração, o que, em alguns casos, pode causar rachaduras e inviabilizar sua utilização (COUTTS, 2005). Sendo assim, a saída para o produto foi a inserção de fibras, como fase dispersa na matriz de cimento, para melhorar a capacidade de absorção da energia de fratura.

O primeiro material usado como reforço foi o amianto, em razão do baixo custo e às excelentes propriedades físicas e mecânicas, sendo utilizado em materiais para construção, como telhas, placas e tubos (COUTTS, 2005).

No entanto, durante a manipulação do amianto, para produção do fibrocimento e no seu processamento, durante a instalação, são liberadas fibras de amianto na área circundante e essas fibras podem estar associadas a sérios

problemas pulmonares, tais como mesotelioma, fibrose pulmonar, asbestoses, dentre outras (GIANNINI et al., 2012; PASTUSZKA, 2009; RADVANEC et al., 2013).

Atualmente a utilização do amianto está proibida em 58 países e em sete estados brasileiros (Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Pernambuco, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo e Pará); já foram criadas leis quanto à limitação da produção de itens que usam amianto (INSTITUTO BRASILEIRO DO CRISOTILA, 2012).

No entanto, uma das desvantagens na substituição do amianto, na produção de fibrocimento, é o maior custo de produção do material substituto. No Brasil são utilizadas fibras do tipo polivinil (PVA) ou de polipropileno (PP), que são responsáveis pelo aumento de, aproximadamente, 40% do custo total (DIAS; SAVASTANO JÚNIOR; JOHN, 2010), fazendo com que as pesquisas sobre o uso das fibras vegetais em fibrocimento ganhem destaque. Além disso, as fibras vegetais são importantes, para a produção do fibrocimento pelo processo Hatschek, uma vez que são consideradas fibras de processo.

2.3 Reforço da matriz cimentícia com fibras vegetais

Como dito anteriormente, os materiais com base cimentícia apresentam comportamento frágil, apresentando fraturas e fissuras que podem comprometer a sua utilização. Sendo assim, os compósitos são reforçados com fibras para agregar melhores características de tenacidade, resistência, ductilidade e durabilidade (COUTTS, 2005; KUDER; SHAH, 2010).

As fibras oferecem ao compósito o surgimento de mecanismos de tenacificação, possibilitando um comportamento mecânico pseudoplástico ao fibrocimento. Conseqüentemente, a inserção de fibras na matriz cimentícia promove o aumento da resistência mecânica e melhora a capacidade de absorção

de energia com a distribuição de microfissuras ao longo do compósito (Figura 2). Sem o reforço das fibras, o material falharia de maneira brusca após iniciada a fissuração (COUTTS, 2005).

As fraturas dos compósitos reforçados com fibras podem ocorrer baseadas em defeitos do material como: fibras rompidas, falhas na matriz e deslocamentos na interface da fibra-matriz (PIZZOL, 2013; TONOLI et al., 2009a).

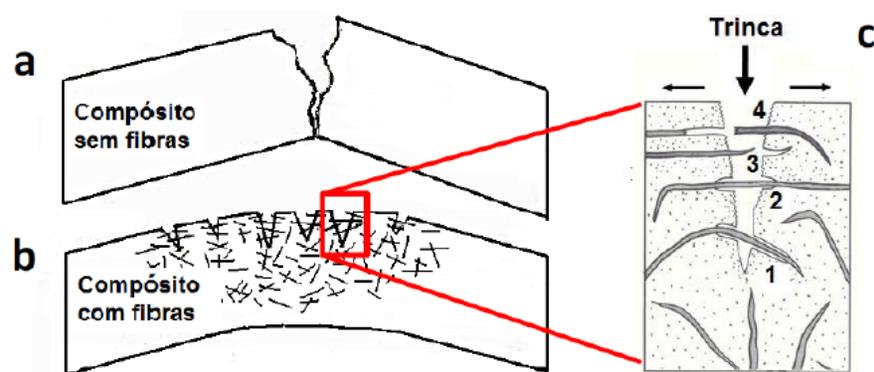


Figura 2 Esquema do comportamento de um compósito quando submetido à flexão: a) sem reforço de fibras e b) com reforço de fibras; c) caminhamento da trinca: 1- deslocamento; 2 - interceptação; 3 - arrancamento; 4 - fratura da fibra

Fonte: Adaptado de Coutts (2005).

Seguindo a tendência mundial para a substituição do amianto, as indústrias começaram a procurar novas alternativas de reforço, com fibras que cumpram com o processo Hatschek e que ofereçam um bom desempenho ao produto final (IKAI et al., 2010).

Esses novos materiais, atualmente, centram-se principalmente em fibras de celulose (ALMEIDA, 2013; BILBA; ARSENE; OUENSANGA, 2003; COUTTS; MICHELL, 1983; ROMA; MARTELLO; SAVASTANO JÚNIOR,

2008; SAVASTANO JUNIOR; WARDEN; COUTTS, 2003; SOROUSHIAN; SHAH; WON, 1995; TONOLI et al., 2009a; TONOLI et al., 2010b) e fibras sintéticas (ALAMSHAHI et al., 2012; BENTUR; MINDESS, 1990; BOHNEMANN; DIETZ, 1998; HANNANT, 1995; LIU et al., 2008) ou com ambas (NEGRO et al., 2005).

As propriedades finais do fibrocimento reforçado com fibras de celulose dependem do processo de fabricação, da composição química e anatômica do material de reforço, da resistência mecânica das fibras, de uma dispersão homogênea dessas fibras na matriz, da boa interação entre a fibra e a matriz, da baixa porosidade da matriz e da porcentagem otimizada de fibra, essa porcentagem deve ser suficiente para reforçar o material, permitindo uma boa continuidade da transferência de carga no compósito (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

2.3.1 Fibras vegetais

As fibras vegetais são compostas, principalmente, de celulose, hemicelulose e lignina, além de outros componentes como água, proteínas, peptídeos e compostos inorgânicos.

A utilização de uma planta como matéria-prima para fibrocimento depende, além de suas características físico-mecânicas, da sua disponibilidade e custo de aplicação (GARCIA-HORTAL, 2007). As fibras vegetais inseridas como reforço de matrizes cimentícias apresentam grande interesse nos países em desenvolvimento em função do baixo custo, origem renovável, apresentar alta variedade e disponibilidade, além de ser um potencial substituto às fibras de amianto (MACVICAR; MATUANA; BALATINECZ, 1999).

As fibras vegetais podem ser encontradas em uma ampla variedade morfológica (diâmetro, comprimento, relação de esbeltez e rugosidade da

superfície) e de forma (feixes de fibra ou polpa). Além disso, a superfície pode ser facilmente modificada unindo grupos funcionais ao grupo hidroxílico, de modo obter um caráter menos hidrofílico (FARAUK et al., 2012).

Entretanto, os principais desafios quanto à utilização de fibras vegetais são a mineralização na matriz cimentícia e a instabilidade dimensional do material. A mineralização ocorre porque o cimento Portland apresenta um pH alcalino próximo de 13 e os produtos de sua hidratação se depositam no lúmen das fibras, fazendo com que as mesmas fiquem endurecidas e percam a capacidade de reforço. A instabilidade dimensional é causada pela higroscopicidade do material, em que o ganho e a perda de umidade da fibra promovem modificações dimensionais, afetando a interface fibra-matriz, promovendo, assim, a diminuição das características de reforço do material (SAVASTANO JUNIOR; DANTAS; AGOPYAN, 1994).

Portanto, a produção atual de fibrocimento se baseia em uma junção de fibras sintéticas e fibras vegetais, proporcionando um menor preço e qualidade adequada ao fibrocimento (MATTOSO; FERREIRA; CUEVELO, 1997). Sendo assim, os estudos estão direcionados para a busca de fibrocimentos produzidos apenas com fibras vegetais e/ou suas polpas celulósicas de diferentes origens e com diferentes tratamentos no material de reforço ou no produto por completo, visando reduzir o custo de produção mantendo a qualidade desse tipo de compósito.

Dentre as fibras vegetais, o sisal é que vem ganhando mais destaque nos estudos, principalmente, a utilização de sua polpa, o que se justifica em função da sua elevada resistência à tração (TONOLI, 2010a). O motivo, para a utilização da polpa de celulose em vez das fibras vegetais (macrofibras), está relacionado ao fato de que as fibras vegetais apresentam maior interferência na hidratação e na cura da matriz cimentícia, podendo retardá-las por apresentar vários componentes orgânicos, em particular os açúcares e a lignina (AZWA et

al., 2013; TORGAL; JALALI, 2011). Neste ponto de vista, fibras produzidas pela polpação alcalina (processo Kraft) podem apresentar vantagens, já que grande parte da lignina e hemiceluloses, menos resistentes à alcalinidade da matriz cimentícia do que a celulose, são retiradas durante o processo de polpação (JOAQUIM et al., 2009; MOHR; NANKO; KURTIS, 2005).

2.3.2 Sisal

Agave sisalana, conhecida popularmente como sisal (Figura 3), é uma planta originária da região de Yucatan no México (MEDINA, 1959). No Brasil, o sisal chegou em 1903 primeiramente no estado da Bahia, estendendo-se posteriormente para outros estados nordestinos (PAIVA; FROLLINI, 2006). A planta é caracterizada por um bulbo central, rodeado de folhas rígidas, lisas, de cor verde e com ápice pontiagudo, que medem de 10 cm a 1,5 m de comprimento (TONOLI, 2006).



Figura 3 Sisal (*Agave sisalana*)

Fonte: Embrapa Algodão (2006).

Nas folhas do sisal que se concentram as fibras. A planta produz cerca de 200 a 250 folhas e cada uma delas contém de 1000 a 1200 feixes de fibras. Em média, a folha de sisal contém 4% de fibras, 0,75% de cutícula, 8% de matéria seca e 87,25 de água (MURHERJEE; SATYANARAYANA, 1984).

A retirada das fibras da folha é feita com base na descarnação, esmagamento e raspagem do cerne das folhas, em conjunto com um jato de água, seguida da secagem ao ar. Essas técnicas podem ser executadas por meio de equipamentos mecânicos ou de forma manual (PICANÇO, 2005).

As fibras extraídas do sisal se inserem no grupo anatômico das fibras estruturais, tendo como função a sustentação e rigidez das folhas. Durante a extração, as fibras surgem em forma de feixes com comprimento que varia de 40 cm até 2 m, diâmetro de aproximadamente 100 a 300 μm , mais espessa na base e coloração creme (LI; MAY; YE, 2000; MATTOSO; FERREIRA; CURVELO, 1997).

A fibra industrializada é convertida em fios, barbantes, cordas, tapetes, sacos, bolsas, chapéus, artesanato e, também, é empregada na fabricação de papel Kraft. Além disso, o sisal, também, é utilizado na indústria automotiva, de móveis, eletrodomésticos, geotêxteis e como reforço em compósitos de polipropileno (EMBRAPA ALGODÃO, 2006).

Como o sisal é uma planta muito abundante, de baixo custo, alta resistência mecânica e já tem o processo industrial de polpação, diversos estudos já foram desenvolvidos utilizando essa polpa como reforço em compósitos (SAVASTANO JUNIOR et al., 2009; SAVASTANO JUNIOR; WARDEN; COUTTS, 2003; SAVASTANO JUNIOR; WARDEN; COUTTS, 2005; TOLÊDO FILHO, et al., 2000; TOLÊDO FILHO, et al., 2003; TONOLI et al., 2007).

2.4 Durabilidade

Um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento de um produto para a construção civil é a durabilidade. Essa característica pode ser definida como a capacidade do material em continuar a desempenhar sua função por tempo prolongado, mesmo depois de repetidas condições adversas (COOKE et al., 2000).

Avaliando a durabilidade de fibrocimento reforçado com polpa Kraft, Mohr, Nanko e Kurtis (2005) estabeleceram a seguinte sequência de danos que ocorrem no material submetido a ciclos de secagem e imersão em água: (a) perda de adesão entre fibra e matriz; (b) precipitação dos compostos de hidratação do cimento nos espaços vazios entre a interface fibra-matriz; e (c) mineralização completa e fragilização das fibras.

A migração dos compostos de hidratação do cimento para as fibras de celulose, em processo de envelhecimento acelerado de imersão/secagem, adota alguns passos. No primeiro ciclo de secagem, a seção transversal das fibras é reduzida em razão da perda de água e essa redução gera perda de aderência entre a fibra e a matriz. No ciclo seguinte (imersão), a água dissolve os compostos de hidratação do cimento, principalmente, o hidróxido de cálcio. As fibras, então, absorvem essa solução e incham. Quando o segundo ciclo se inicia, novamente a água é eliminada e o hidróxido de cálcio precipita na parede celular e no lúmen das fibras. Durante os ciclos de imersão/secagem seguintes, esse efeito vai se agravando (ARDANUY et al., 2011; CLARAMUNT et al., 2011)

Estudos com telhas reforçadas com fibras vegetais demonstraram que, em média, há 50% de perda no desempenho mecânico do material após um ano de exposição ao envelhecimento natural. Esse efeito está associado à degradação do material lignocelulósico pela alcalinidade da matriz cimentícia combinado às

intempéries e à modificação dimensional das fibras (AGOPYAN et al., 2005; DEVITO, 2003).

Existem, basicamente, duas estratégias para melhorar a durabilidade dos compósitos à base de cimento reforçado com fibras vegetais. A primeira é a modificação das fibras vegetais, com tratamentos químicos e físicos da fibra, bem como a adição de uma fração de fibras mais resistentes no compósito, como é o caso das fibras sintéticas. A segunda é a possibilidade de modificar as características alcalinas da matriz, como o processo de carbonatação e autoclavagem.

2.5 Fibras sintéticas

Dentre as fibras sintéticas mais utilizadas, para a produção de fibrocimento sem amianto, estão as fibras de poli álcool vinílico (PVA), fibras de vidro resistentes a álcalis (AR-glass) e fibras de polipropileno (PP), sendo esta última amplamente utilizada em larga escala na indústria brasileira de fibrocimento curado ao ar (PIZZOL, 2013).

As fibras poliméricas podem ser divididas em dois grupos quanto ao seu módulo de elasticidade (MOE): fibras de baixo MOE e de alto MOE. O primeiro grupo está relacionado ao aumento da capacidade de resistência à flexão antes e/ou depois da fissuração da matriz, mesmo com baixa concentração de fibra, porém essas fibras têm valor muito superior àquelas do segundo grupo, o qual o PP, o náilon, polietileno e poliéster fazem parte (BENTUR; MINDESS, 1990).

Dentre as fibras de baixo MOE, o PP apresenta maior facilidade de dispersão, durante a mistura com a matriz cimentícia, não degrada em meio alcalino e possui maior aderência com a fase do cimento (BENTUR; MINDESS, 1990). As principais vantagens da utilização da fibra de PP em fibrocimento é a alta ductilidade, elevada energia específica, alto ponto de fusão, resistência ao

médio alcalino do cimento e baixo custo comparado às outras fibras poliméricas (FU; HU; YUE, 1999).

Recentemente a preocupação das empresas está relacionada à disponibilidade do PP no mercado em decorrência da alta demanda e ao alto custo (comparado ao amianto). A inserção de fibras sintéticas no fibrocimento aumenta em, aproximadamente, 40% do custo total das matérias-primas. Uma alternativa, para reduzir o custo, é diminuir a concentração de fibras sintéticas, com a associação de fibras vegetais em matrizes cimentícias, visando reduzir os custos de produção do fibrocimento sem amianto (DIAS; SAVASTANO JUNIOR; JOHN, 2010).

2.6 Processo de Autoclavagem

Para Coutts e Ni (1995), o processo Hatschek seguido de cura em autoclave foi adotado de forma comercial para compósitos de cimento reforçados com fibras de madeira. Segundo os mesmos autores, a cura em altas temperaturas (180 °C) permite que sejam substituídos de 40 a 60% do cimento Portland por alguma sílica de baixo custo.

O processo de cura em autoclave pode ser uma alternativa economicamente viável, pois pode diminuir o uso de fibras de maior custo (como é o caso das fibras sintéticas) e substitui parte do cimento por material silicoso mais barato. Apesar da desvantagem de maior investimento inicial e aumento do consumo de energia elétrica, esse método se mostra vantajoso às indústrias quanto à economia de tempo, liberando os produtos de forma mais rápida para a comercialização e diminuindo o espaço físico para a estocagem (TONOLI, 2006).

Os procedimentos de cura, geralmente, são utilizados para acelerar a hidratação do cimento. No caso da autoclavagem, a cura, que duraria 28 dias de

forma tradicional, passa a durar de 18 a 24 horas. No entanto, as propriedades do material, submetido à autoclavagem, podem ser substancialmente afetadas por essa condição de cura (FERNÁNDEZ-CARRASCO; CLARAMUNT; ARDANUY, 2014).

Em estudo, Bentur e Mindess (1990) afirmaram que a autoclavagem em compósitos de matriz cimentícia, reforçados com celulose, tanto em amostras submetidas ao envelhecimento natural quanto em amostras submetidas ao envelhecimento acelerado, apresentaram pequena deterioração, já que as fibras não foram mineralizadas, o que pode estar associado à diminuição da alcalinidade da matriz.

Coutts e Warden (1985) relataram uma diminuição na resistência à flexão de compósitos que foram curados de forma natural quando comparado àqueles que passaram pelo processo de autoclavagem. Entretanto, Akers e Studinka (1989), em estudo semelhante, encontraram significativa redução de tenacidade nos compósitos autoclavados.

Sendo assim, de forma geral, observa-se que o uso da autoclave é uma vantagem, em função do tempo de cura, no entanto, em questão da modificação da resistência mecânica e da durabilidade dos compósitos, o processo, ainda, precisa melhor entendido.

2.7 Processo de Carbonatação

A carbonatação é um fenômeno natural que afeta os materiais cimentícios. Esse processo consiste na reação dos produtos da hidratação do cimento com o dióxido de carbono (CO_2). Ao longo dos anos, o cimento absorve o CO_2 atmosférico e esse processo ocorre, durante a vida útil da estrutura e, também, após a demolição (PIZZOL, 2013).

Em síntese, o mecanismo de carbonatação pode ser descrito como a difusão do CO_2 atmosférico por meio dos poros insaturados do cimento. O CO_2 é dissolvido na fase aquosa dos poros e transformado em ácido carbônico (H_2CO_3), que é dissociado em íons HCO_3^- e CO_3^{2-} . Além disso, o hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] é dissociado em Ca^{2+} e OH^- , resultando na precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3). Portanto, o mínimo teor de água é essencial para a ionização dos compostos, porém, se os poros estiverem saturados, haverá limitação da reação em virtude da obstrução dos mesmos (ALMEIDA et al., 2013; FERNÁNDEZ-BERTOS et al., 2004).

A carbonatação é uma alternativa para aumentar a durabilidade das fibras vegetais associadas à matriz cimentícia. A principal consequência é a diminuição no pH da matriz de 12,5 e 13,5 para um valor próximo de 8,3 nas zonas totalmente carbonatadas (SAETTA; SCHREFLER; VITALINI, 1993). Essa redução na alcalinidade torna o cimento menos agressivo às fibras (TOLEDO FILHO et al., 2003).

Almeida et al. (2010) verificaram por intermédio da técnica de difração de raios X que as amostras que não passaram pelo processo de carbonatação apresentaram maiores intensidades nos picos relacionados à existência de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) e que as amostras carbonatadas tiveram maiores picos associados ao CaCO_3 (carbonatado de cálcio) e outros silicatos. Dessa forma, os autores explicaram a maior densificação das matrizes carbonatadas, já que o carbonato de cálcio é mais denso que o hidróxido de cálcio e, também, comprovaram a que a melhoria das propriedades mecânicas do material carbonatado está atrelada à melhor interface entre fibra e matriz.

Em estudo, Soroushian, Won e Hassan (2012) analisaram a durabilidade de fibrocimento reforçado com polpa Kraft de celulose. Após ciclos de envelhecimento acelerado de imersão/secagem, ciclos de congelamento/descongelamento e ciclos de imersão em água morna mostraram

que as amostras carbonatadas apresentaram porosidade capilar reduzida, maior concentração de CaCO_3 e melhor adesão fibra-matriz.

Toledo Filho et al. (2003) relataram um aumento significativo em termos de durabilidade em materiais compósitos de cimento com fibras de origem vegetal após 109 dias de exposição à atmosfera de dióxido de carbono. Tonoli et al. (2010a), estudando o efeito da carbonatação e do envelhecimento em telhas de fibrocimento reforçadas com sisal, constataram que a carbonatação acelerada foi importante para melhorar a resistência das telhas e manter o módulo de ruptura (MOR) das amostras que ficaram 480 dias em ambiente de laboratório. No entanto, ainda faltam informações sobre o efeito da carbonatação acelerada em fibrocimento envelhecido naturalmente por muitos anos.

A disseminação do uso da carbonatação acelerada, durante a cura inicial, condiz com a necessidade de novas tecnologias sustentáveis. Segundo Silva et al. (2006), uma grande vantagem desse processo está relacionada à captação do poluente atmosférico CO_2 . Além disso, a carbonatação acelerada pode permitir a substituição parcial das fibras sintéticas que são utilizadas para aumentar a durabilidade do fibrocimento (PIZZOL, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Produção das telhas onduladas

A caracterização da matéria prima e a produção das telhas estão descritas por Tonoli (2006). Para a moldagem das telhas, foi utilizado um equipamento resultado da patente de Savastano Junior (2002), representado na Figura 4. O equipamento foi ajustado com a implantação de vácuo em torno de 50 kPa e dois pistões pneumáticos atuando com pressão próximo de 15 kPa na câmara de moldagem.

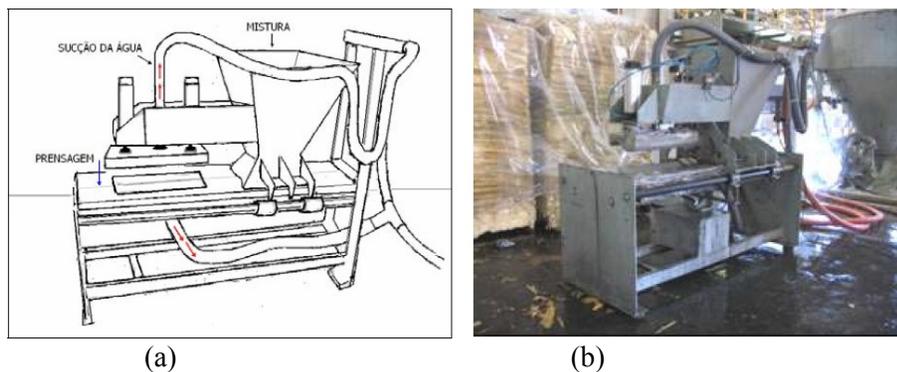


Figura 4 (a) Esquema do equipamento para produção de telhas onduladas e (b) equipamento

Fonte: Tonoli (2006).

As formulações utilizadas, para a fabricação das telhas, estão descritas na Tabela 1. Como reforço, as fibras de polipropileno (PP) nacionais (Fitesa® 50T) tinham, em média, o comprimento de 6mm e diâmetro aproximado de 30 μm . Já a polpa celulósica de sisal (*Agave sisalana*) não branqueada foi fornecida pela Lwarcel Celulose AS.

As polpas celulósicas foram dispersas em água durante 1h com auxílio de um agitador mecânico com capacidade de 25 litros, alta rotação (1700 rpm) e de eixo vertical. Os outros materiais foram adicionados e homogeneizados por mais 30 minutos e a suspensão, formada por 40% de sólidos, foi colocada no recipiente de armazenamento da mistura no equipamento.

Tabela 1 Formulações para produção das telhas onduladas

Matérias-primas	4,7 % Cel	3% Cel + 1,7% PP	3% Cel + 1,0% PP	3% Cel + 0,5% PP
	Massa (%)			
Polpa celulósica de Sisal (Cel)	4,7	3	3	3
Fibras de Polipropileno (PP)	0	1,7	1	0,5
Cimento Portland ^a	78,8	78,8	79,4	79,8
Material carbonático ^b	16,5	16,5	16,6	16,7

Fonte: Tonoli (2006).

^a Cimento Portland CP V – ARI: NBR 5733 (clínquer + gesso = 100 – 95%; ^b Calcário Itau®: material carbonático = 0- 5 %).

Após a produção, as telhas seguiram para a cura inicial por dois dias ainda no molde e totalmente cobertas com saco plástico. Essa etapa ocorreu em ambiente controlado com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar (UR) de $60 \pm 5\%$. Algumas telhas foram retiradas dos moldes e deixadas por 26 dias totalmente submersas em água.

Outra parte das telhas passou pelo processo de cura acelerada em autoclave após a cura inicial de dois dias. Esse procedimento seguiu o método de Coutts e Kightly (1982), ficando em uma autoclave por 8h sob a temperatura de 140°C com pressão aproximada de 1,5 MPa. Para completar os 28 dias de cura, as telhas foram deixadas em condições climatizadas de temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60 \pm 5\%$ UR, por período de 26 dias.

3.2 Carbonatação acelerada

A carbonatação acelerada, descrita por Tonoli (2006), foi feita baseada na disposição das telhas, em uma câmara da marca Thermotron® com temperatura de 25 °C, umidade relativa de 75% e ambiente saturado de dióxido de carbono (CO₂). Essas telhas ficaram sob o processo, durante uma semana, até a carbonatação completa.

3.3 Envelhecimento natural

O envelhecimento natural foi feito com a exposição, desde maio de 2005, das telhas em ambiente no campus da USP em Pirassununga, SP (latitude 21°59'S). O clima da região é do tipo Cwa na classificação Köppen e a temperatura média anual é de 20,8 °C, com precipitação pluviométrica média anual de 1298 mm.

As telhas ficaram expostas em uma bancada, com inclinação de 45° em relação ao plano horizontal, voltada para o norte sob a incidência de luz solar e do intemperismo natural. As formulações e os tratamentos (sem tratamento, cura em autoclave e carbonatação acelerada) das telhas deixadas sob o envelhecimento natural estão descritas na Tabela 2.

As Figuras 5a e 5b mostram a bancada de envelhecimento natural em Pirassununga, em maio de 2005 e em janeiro de 2015, evidenciando as telhas do presente estudo.

Tabela 2 Formulações e tratamentos das telhas do envelhecimento natural

Tratamento	Reforço (%)		Carbonatação	Autoclavagem
	Cel	PP		
4,7% Cel	4,7	0	Não	Não
4,7% Cel (autoc.)	4,7	0	Não	Sim
4,7% Cel (carb.)	4,7	0	Sim	Não
3% Cel + 1,7% PP	3,0	1,7	Não	Não
3% Cel + 1,7% PP (carb.)	3,0	1,7	Sim	Não
3% Cel + 1,0% PP	3,0	1,0	Não	Não
3% Cel + 0,5% PP	3,0	0,5	Não	Não
3% Cel + 0,5% PP (carb.)	3,0	0,5	Sim	Não



Figura 5 Telhas expostas na bancada em 2005 (a) e em 2015 (b)

3.4 Caracterização mecânica

Para o ensaio de flexão das telhas onduladas (Figura 6), foi utilizada a máquina universal de ensaios mecânicos da marca Emic, modelo DL-30000, equipada com célula de carga de 5k N. Os parâmetros do ensaio foram uma configuração adaptada dos procedimentos descritos por Gram e Gut (1994), de três cutelos de forma ondulada, para que se ajuste na telha, com vão inferior de

350 mm e velocidade de ensaio de 5 mm/min. Nesse teste, foram determinados os valores de carga máxima, suportada pelas telhas, deformação na carga máxima, deformação total e energia específica.



Figura 6 Ensaio mecânico das telhas onduladas

3.5 Caracterização física

Para a condução dos ensaios físicos, foram extraídas amostras com dimensões de 160 x 30 mm das partes planas das telhas. Os ensaios seguiram os procedimentos descritos na norma ASTM C 948-81 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2001) e os seguintes parâmetros foram determinados: absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente. Para cada tratamento, foram avaliados corpos-de-prova, após 24 horas de imersão em água destilada sob a temperatura ambiente. Assim foi determinada a massa da amostra dentro da água (massa imersa) e a massa após a retirada do excesso de água da superfície do corpo-de-prova (massa úmida). Em seguida, as amostras seguiram para a estufa com circulação fechada, por um período de 24 horas na temperatura de 60 ± 5 °C, para a determinação da massa seca.

As propriedades físicas foram baseadas nas seguintes equações:

$$\text{Absorção de água (\%)} = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100$$

$$\text{Porosidade aparente (\%)} = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} * 100$$

$$\text{Densidade aparente } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{Ms}{Mu - Mi} * \rho_w$$

Em que:

Mu = massa úmida

Mi = massa imersa

Ms = massa seca

Pw = densidade do líquido no qual as amostras foram imersas

3.6 Difração de Raios X (DRX)

Foi realizada a Difração de Raios X para identificar os elementos cristalinos presentes nos corpos-de-prova por análise qualitativa. Nesse estudo, foram identificadas as fases cristalinas por meio dos picos nos difratogramas obtidos para cada amostra. O equipamento utilizado para o ensaio era da marca *Rigaku Rotoflex*, modelo *RU-200B*, com goniômetro horizontal, câmara polivalente e monocromador.

O preparo das amostras, para o ensaio, deu-se por meio da moagem do material em moinho de bola por 2 horas. Os corpos-de-prova utilizados foram os mesmos ensaiados nos demais testes físicos e mecânicos. As condições de operação do ensaio da DRX foram: 30 kV de voltagem, 30 mA de corrente elétrica, velocidade de 1° /min e passo de 0,01°.

3.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para caracterizar a superfície de ruptura dos corpos-de-prova, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura modelo DSM 940A da marca Zeiss. Essa caracterização tem por objetivo correlacionar as imagens aos ensaios físicos e mecânicos das telhas, analisar a interface entre a matriz cimentícia e as fibras naturais e sintéticas na superfície de ruptura, bem como avaliar o efeito do intemperismo e da carbonatação acelerada na degradação das fibras após a exposição ao envelhecimento natural.

3.8 Análise estatística

Na análise estatística dos dados, foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado. Para a diferenciação dos tratamentos, foi utilizada análise de variância e teste de média de Scott-Knott, ambos a 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Efeito das fibras sintéticas na durabilidade das telhas

Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 estão apresentados os valores médios da carga máxima (CM), deformação na carga máxima (DCM), deformação total (DT) e energia específica (EE), respectivamente, das telhas testadas aos 28 dias e após 10 anos de envelhecimento natural. O resultados referentes aos 28 dias foram obtidos por Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

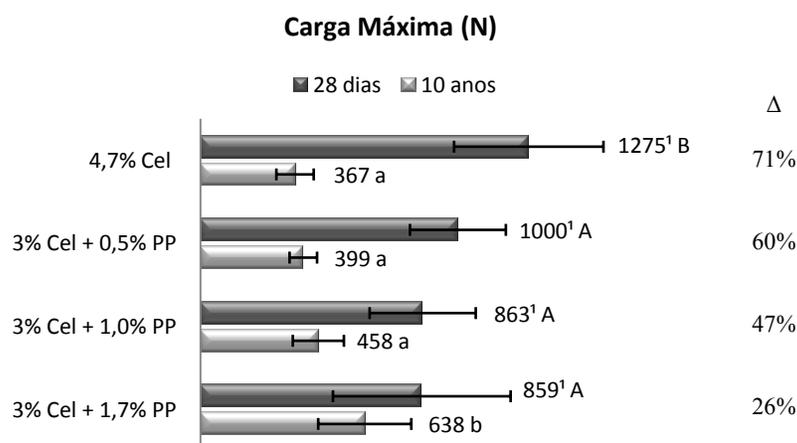


Figura 7 Valores médios e desvio padrão da carga máxima suportada pelas telhas aos 28 dias e após 10 anos

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para 28 dias e minúscula para 10 anos, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

¹Fonte: Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

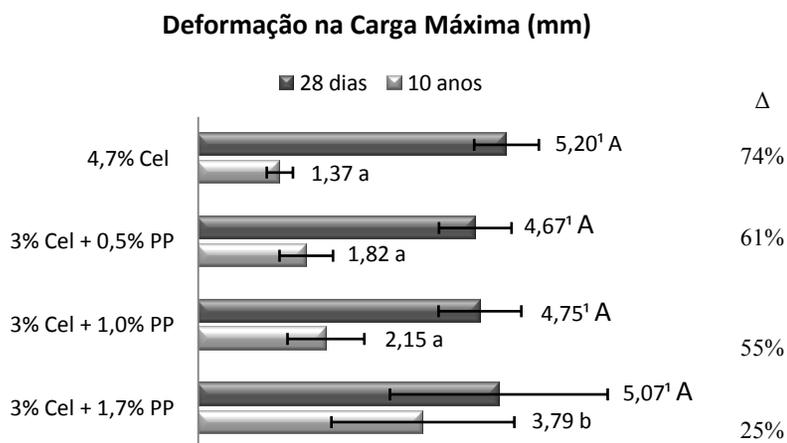


Figura 8 Valores médios e desvio padrão da deformação na carga máxima aos 28 dias e após 10 anos

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para 28 dias e minúscula para 10 anos, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

¹Fonte: Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

Observa-se que, aos 28 dias, as telhas com maior porcentagem de celulose (4,7% Cel) obtiveram valores estatisticamente superiores para a CM e estatisticamente igual aos demais tratamentos quando analisada a DCM. No entanto, quando as telhas foram avaliadas, após 10 anos de envelhecimento, aquelas com 1,7% de polipropileno (PP) apresentaram os melhores resultados, diferenciando-se, estatisticamente, dos demais tratamentos, os quais demonstraram igualdade estatística. De forma geral, o envelhecimento natural, após 10 anos de exposição, promoveu reduções da ordem de 26 a 71% para propriedade CM e de 25 a 74% para a propriedade DCM.

Essa redução no desempenho, ao longo do tempo, também, foi observada por Devito (2003), ao avaliar telhas reforçadas com 5% de polpa celulósica de eucalipto, o qual obteve para a CM os resultados de 1010 N, 600 N e 540 N para as telhas ensaiadas aos 28 dias, 84 dias e aos 365 dias. A mesma

tendência foi relatada por Roma Júnior (2004), ao avaliar telhas reforçadas com 3% de sisal, descrevendo a queda para a CM de 1111 N para 640 N após 155 dias.

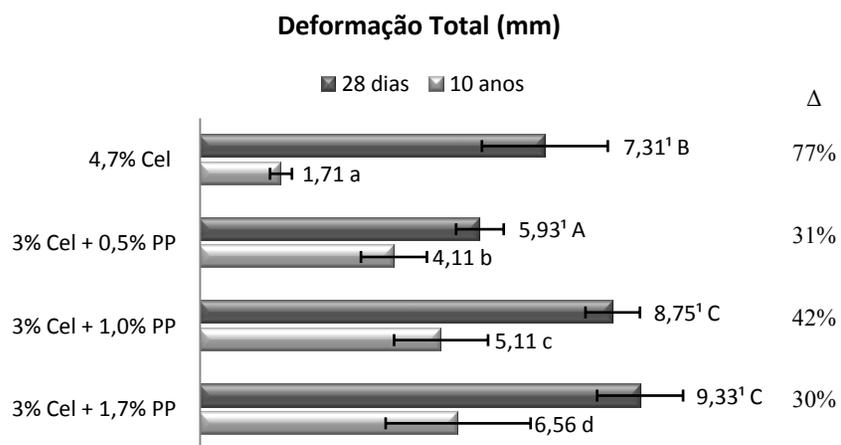


Figura 9 Valores médios e desvio padrão da deformação total aos 28 dias e após 10 anos

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para 28 dias e minúscula para 10 anos, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

¹ Fonte: Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

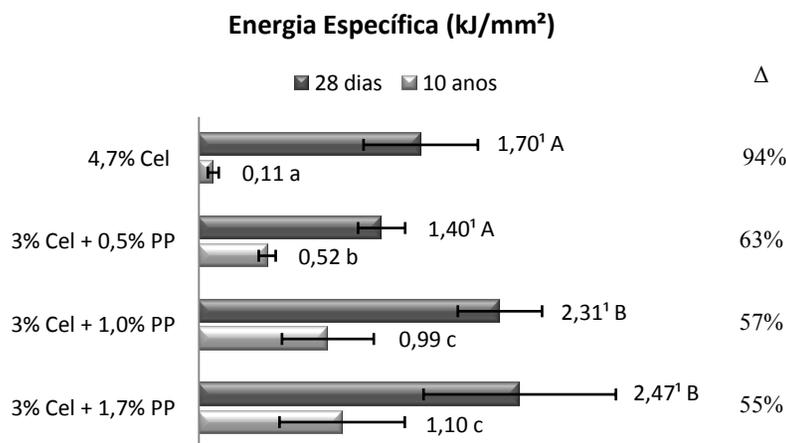


Figura 10 Valores médios e desvio padrão da energia específica aos 28 dias e após 10 anos

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para 28 dias e minúscula para 10 anos, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

¹ Fonte: Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

Quando analisada a DT e a EE das telhas, após 28 dias de cura, observa-se que as telhas com a adição de 1,0 e 1,7% de polipropileno apresentaram igualdade estatística e se diferenciaram dos demais tratamentos, obtendo os maiores valores médios. Após 10 anos, os piores resultados foram obtidos pelas telhas reforçadas apenas com polpa celulósica (4,7% Cel), seguido da formulação composta de 3% Cel + 0,5% PP. Para a DT, o melhor resultado foi relatado para as telhas reforçadas com 1,7% de PP, já para EE os melhores resultados foram observados para as telhas reforçadas com 1,0% e 1,7% de PP, as quais não diferenciaram estatisticamente entre si.

A perda de desempenho para a DT variou de 30 a 77%, já, para a EE, essa perda esteve entre 55 e 94%. A maior queda foi observada para as telhas com 4,7% Cel. Esse fato pode ser explicado pela degradação que o material

vegetal sofre na matriz cimentícia (AZIZ; PARAMASIVAM; LEE, 1981), perdendo sua capacidade de reforço com o decorrer do tempo, como pode ser observado na Figura 11, em que não se encontram fibras de reforço na telha de formulação 4,7 Cel, comportamento diferente observado na telha composta por 3% Cel + 1,7% PP (Figura 12).

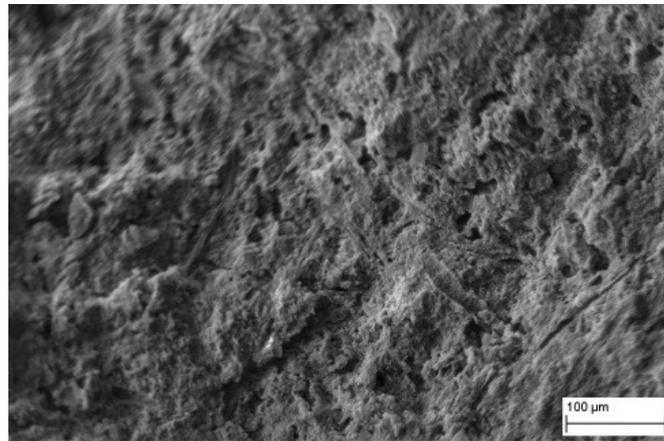


Figura 11 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 4,7% Cel



Figura 12 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 3% Cel + 1,7% PP

Outro ponto a ser observado nesses resultados é que quanto maior o teor de fibra sintética no reforço do compósito menor a perda de desempenho da telha após o envelhecimento natural, pois a variação das propriedades mecânicas com o passar dos anos foi maior para a formulação composta de 0,5% de PP, seguida das formulações com 1,0% de PP e 1,7% de PP.

Resultado semelhante foi encontrado por Bezerra, Joaquim e Savastano Junior (2004) ao avaliarem compósitos cimentícios reforçados com diferentes teores de fibra de PP associado à celulose. Os autores realizaram os ensaios mecânicos no fibrocimento aos 28 dias e após 50 ciclos de envelhecimento acelerado. Nesse estudo, cada ciclo consistiu por 18h de imersão em água seguido por 6h de secagem em estufa a 60 °C. Os autores relataram que as frações com maior quantidade de fibras de PP foram menos afetadas pelo envelhecimento acelerado em decorrência da baixa degradação do PP na matriz cimentícia.

Na Figura 13 é possível observar que as fibras de PP foram arrancadas da matriz (Setas 1 e 2), processo conhecido como *pull-out*. Tonoli (2006) associou o *pull-out* com a absorção de energia em razão do atrito gerado no arrancamento das fibras de PP. Dessa forma, é possível relacionar a melhor EE obtida pela formulação com maior teor de fibra sintética (3% Cel + 1,7% PP).

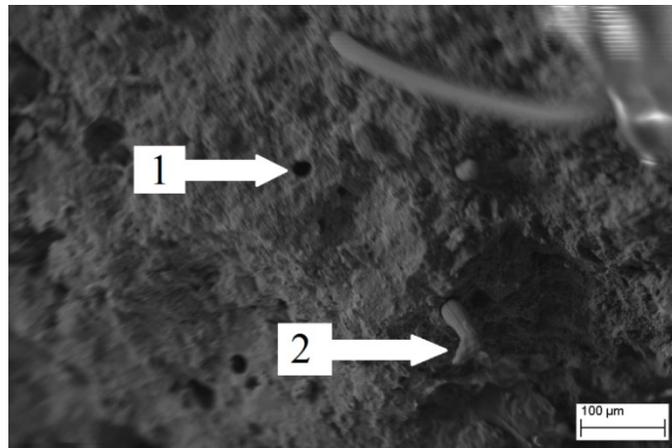


Figura 13 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 3% Cel + 1,7% PP

Nas Figuras 14, 15 e 16 estão apresentados os valores médios para as propriedades físicas de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA), respectivamente, testadas aos 28 dias e após 10 anos de envelhecimento natural. O resultados referentes aos 28 dias foram obtidos por Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

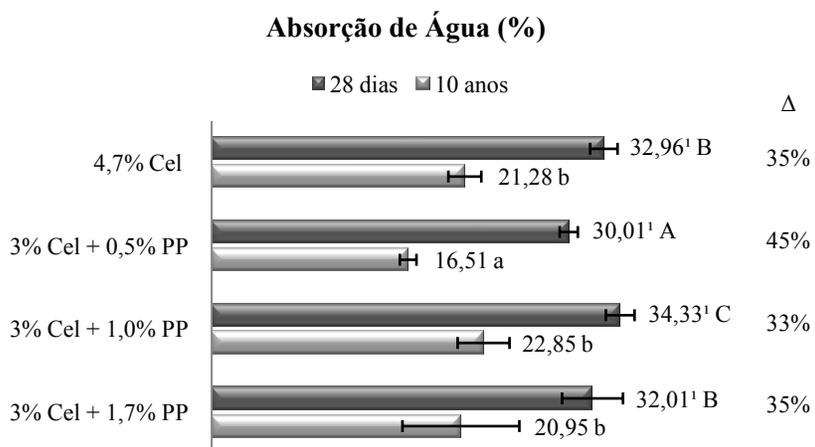


Figura 14 Valores médios e desvio padrão da absorção de água aos 28 dias e após 10 anos

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para 28 dias e minúscula para 10 anos, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

¹ Fonte: Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

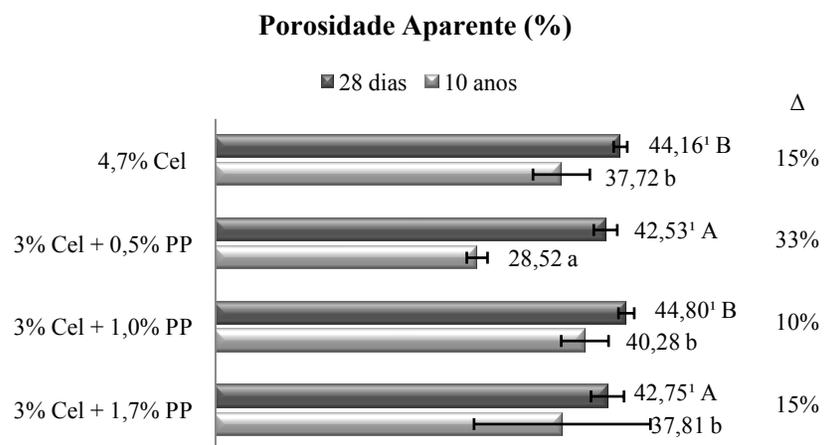


Figura 15 Valores médios e desvio padrão da porosidade aparente aos 28 dias e após 10 anos

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para 28 dias e minúscula para 10 anos, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

¹ Fonte: Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

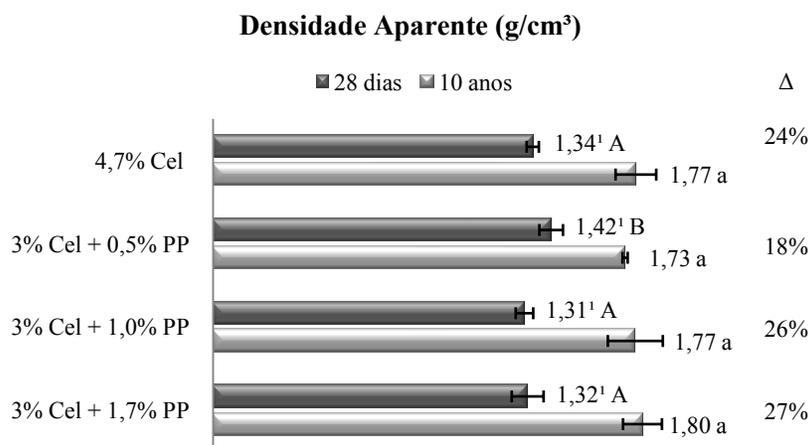


Figura 16 Valores médios e desvio padrão da densidade aparente aos 28 dias e após 10 anos

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para 28 dias e minúscula para 10 anos, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

¹ Fonte: Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

Aos 28 dias, o menor valor de AA foi obtido pela formulação composta de 0,5% PP e o maior valor para as telhas com 1,0% de PP. As formulações com 4,7% Cel e 1,7% PP foram intermediárias e apresentaram igualdade estatística. Para a PA, as formulações com 0,5% PP e 1,7% PP foram menores e iguais estatisticamente. A DA aos 28 dias foi maior para a formulação com menor teor de fibras (3% Cel + 0,5% PP) em razão da menor porcentagem total de material de reforço, o qual possui densidade inferior ao cimento (BEZERRA; JOAQUIM; SAVASTANO JUNIOR, 2004).

Aos 10 anos, a AA e PA foram menores para a formulação com 0,5% PP. As demais formulações obtiveram resultados estatisticamente iguais entre si. Também foi observado que, após o envelhecimento, não houve diferença significativa entre as formulações para a propriedade de DA.

Os resultados físicos obtidos, para as telhas ensaiadas aos 28 dias, foram semelhantes ao encontrado por Roma Júnior (2004) que avaliou telhas produzidas com escória de alto-forno reforçada com 3% de celulose de sisal. Nesse estudo, o autor encontrou, para as propriedades de AA, PA e DA, os valores de 31,0%, 42,3% e 1,35 g/cm³, respectivamente.

Comparando os resultados obtidos aos 28 dias e após 10 anos de envelhecimento natural, foi observada, em todas as formulações, uma diminuição na AA e PA, o que pode estar relacionado com o “efeito cicatrizante” relatado por Hannant e Hughes (1986), em que as fissuras das fases iniciais são preenchidas pelos produtos de hidratação do cimento.

Outro ponto a ser destacado é o aumento da DA do material após o envelhecimento natural. A mesma tendência de aumento dessa propriedade com o decorrer do tempo foi descrita por Almeida et al. (2013), ao estudar compósitos cimentícios reforçados com celulose de eucalipto, em que os autores encontraram os valores para DA do material ensaiado aos 28 dias e após um ano de exposição próximos de 1,55 e 1,70 g/cm³, respectivamente.

Com o passar dos anos, os íons das fases do cimento são reprecipitados nas paredes celulares e dentro do lúmen das fibras vegetais, assim, as estruturas dessas fibras são degradadas em virtude da quebra de ligações intermoleculares. Esse processo, chamado de mineralização da fibra, é relatado por diversos autores (FENGEL; WEGENER, 1984; MOHR, BIERNACKI; KURTIS, 2007; MOHR; NANKO; KURTIS, 2005). A tendência da mineralização da fibra é diminuir os espaços vazios do fibrocimento, conseqüentemente, diminuir a absorção de água e a porosidade aparente. Além disso, o preenchimento desses espaços vazios com produtos de hidratação do cimento reflete no aumento da densidade aparente.

Outro ponto a ser destacado é que a diminuição da AA e PA, bem como o aumento DA, após 10 anos de envelhecimento, para todas as formulações,

também, podem estar relacionados à absorção de CO_2 atmosférico pelo fibrocimento, que acontece durante toda vida útil do material (PIZZOL, 2013). As reações químicas que ocorrem com a penetração do CO_2 no cimento pode preencher os poros da matriz com material carbonatado, diminuindo a AA e PA. Além disso, o produto dessa reação (CaCO_3) é mais denso que o produto original $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, fazendo com que a telha, após o envelhecimento, apresente maior DA (ALMEIDA et al., 2013).

4.2 Efeito da carbonatação na durabilidade das telhas

Nas Figuras 17, 18, 19 e 20 estão apresentados os valores médios de carga máxima (CM), deformação na carga máxima (DCM), deformação total (DT) e energia específica (EE), respectivamente, das telhas carbonatadas e não carbonatadas testadas após 10 anos de envelhecimento natural.

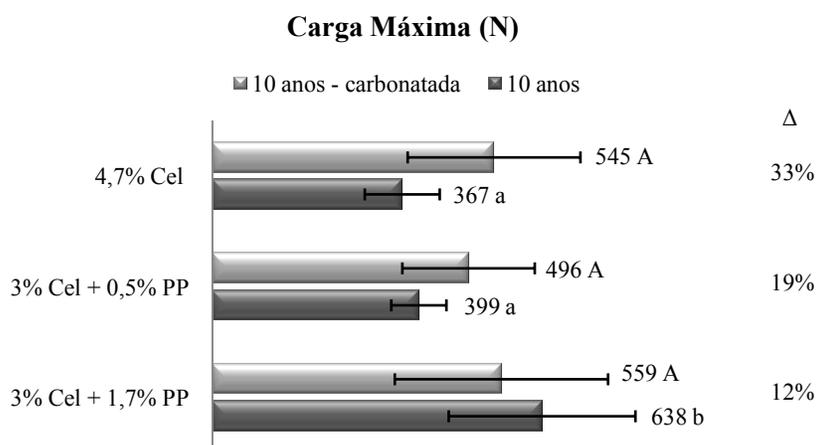


Figura 17 Valores médios e desvio padrão da carga máxima suportada pelas telhas carbonatadas e não carbonatadas

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para carbonatadas e minúscula para não carbonatadas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

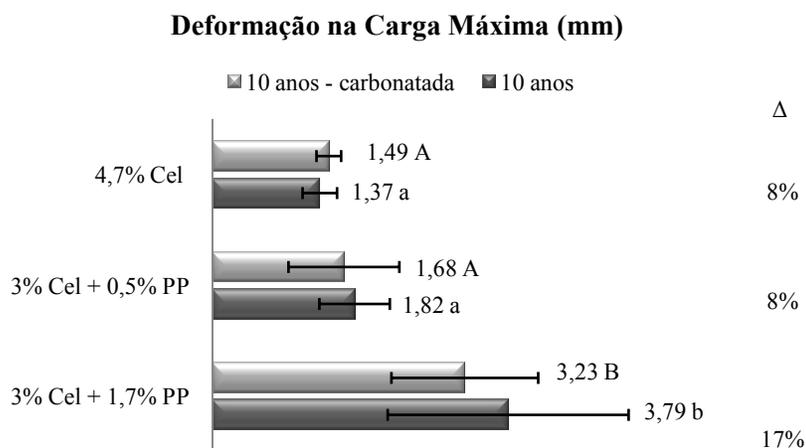


Figura 18 Valores médios e desvio padrão da deformação na carga máxima das telhas carbonatadas e não carbonatadas.

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para carbonatadas e minúscula para não carbonatadas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

Para a CM, as telhas carbonatadas foram estatisticamente iguais entre si. Porém, as telhas reforçadas com 3% Cel + 1,7% PP, que não passaram pela carbonatação, obtiveram resultados superiores e estatisticamente diferentes das outras telhas não carbonatadas. Na propriedade de DCM, tanto as telhas carbonatadas como as não carbonatadas tiveram a mesma tendência. Pelo fato da degradação da fibra vegetal na matriz, as formulações com maior teor de PP (1,7%) apresentaram melhores resultados e foram diferentes estatisticamente das demais.

A carbonatação se mostra como uma boa alternativa para os compósitos reforçados apenas com celulose (4,7% Cel) e, para os compósitos com baixo teor de fibras sintéticas (3,0% Cel + 0,5% PP), pois diferentemente das telhas não carbonatadas, alcança valores para a CM, acima do limite recomendado por Gram e Gut (1994), que é de 425 N para telhas de 8 mm de espessura.

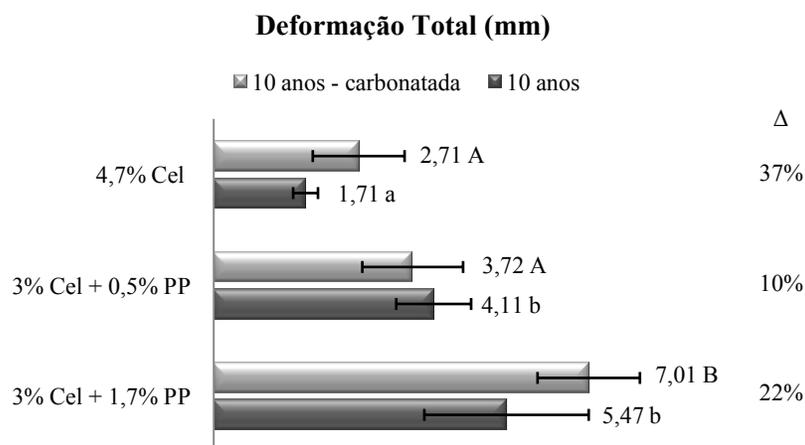


Figura 19 Valores médios e desvio padrão da deformação total das telhas carbonatadas e não carbonatadas

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para carbonatadas e minúscula para não carbonatadas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

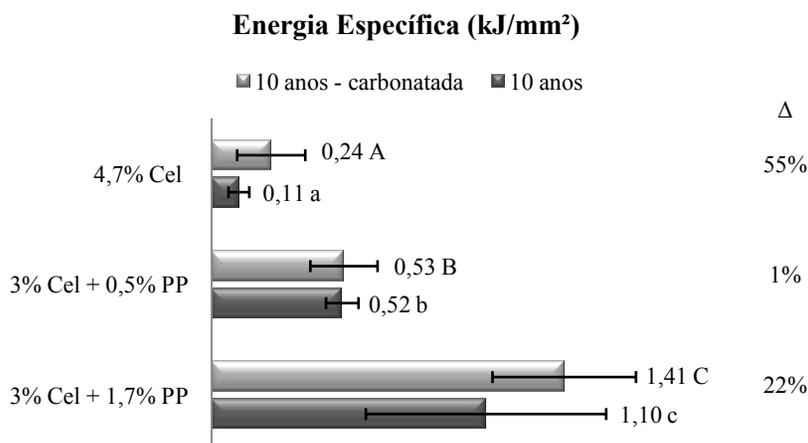


Figura 20 Valores médios e desvio padrão da energia específica das telhas carbonatadas e não carbonatadas

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para carbonatadas e minúscula para não carbonatadas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

As propriedades de DT e EE das telhas não carbonatadas e a EE das telhas carbonatadas apresentaram a mesma tendência, pois os melhores resultados foram obtidos pelas formulações com 3% Cel + 1,7% PP, seguidas das formulações com 3% Cel + 0,5% PP e 4,7% Cel. Porém, a DT para as telhas carbonatadas não mostraram diferenças estatísticas entre as formulações reforçadas apenas com polpa de celulose (4,7% Cel) e com menor teor de PP (3% Cel + 0,5% PP). Também, foi possível observar que a DT e EE de todas as formulações foram melhoradas com a carbonatação.

Almeida et al. (2013), ao estudar fibrocimento reforçado com polpa celulósica de eucalipto, relataram melhora dos resultados mecânicos nas amostras carbonatadas, mesmo após o envelhecimento acelerado (200 e 400 ciclos de imersão-secagem) e um ano de exposição natural, sugerindo que a resistência da fibra foi mantida em uma matriz menos alcalina, permitindo, assim, melhor dissipação de energia.

Esse fato pode ser observado nas Figuras 21 e 22, as quais evidenciam a superfície de ruptura das telhas reforçadas apenas com polpa de sisal não carbonatada e carbonatada, respectivamente. Nota-se que, nas telhas não carbonatadas, houve maior degradação das fibras vegetais, pois há poucas fibras visíveis na matriz. Além disso, é possível perceber uma baixa adesão entre fibra-matriz (Seta 3). Já as telhas carbonatadas apresentam maior quantidade de fibras visíveis na matriz e melhor aderência com o cimento (Setas 4 e 5), reforçando a melhoria na dissipação de energia pelo compósito. Dessa forma, a maior quantidade de fibras na matriz carbonatada influencia, positivamente, nos resultados mecânicos, pois, mesmo após o envelhecimento natural, as fibras continuam atuando como reforço.

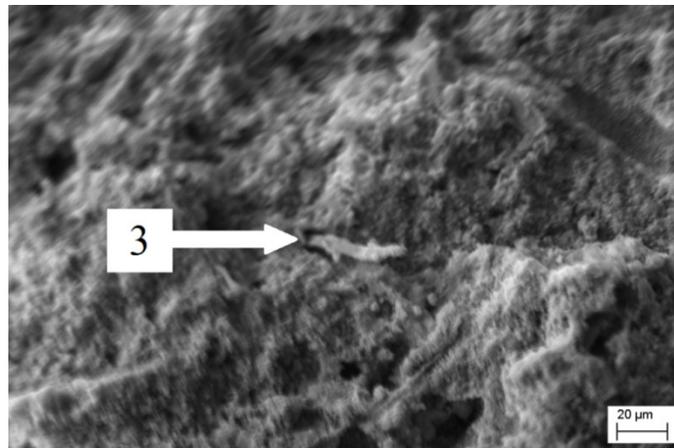


Figura 21 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 4,7% Cel e sem carbonatação

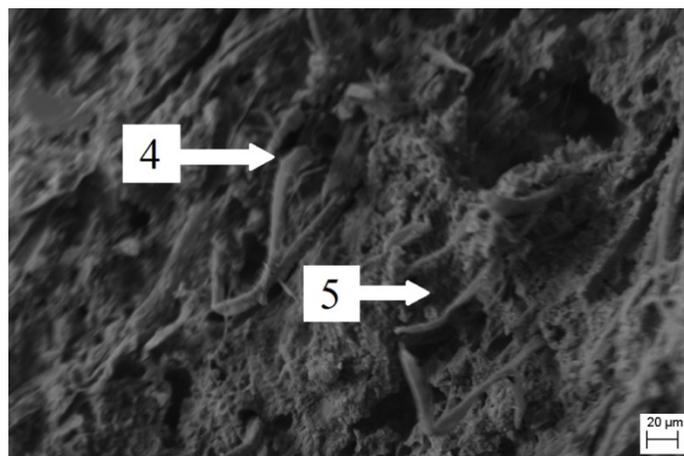


Figura 22 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 4,7% Cel e carbonatada

Resultados semelhantes foram encontrados por Tonoli et al. (2010a) ao avaliarem compósitos cimentícios reforçados com polpa de sisal. Nesse estudo os autores relataram uma melhora significativa das propriedades mecânicas das amostras carbonatadas após ciclos de envelhecimento acelerado e envelhecimento natural de 480 dias. Tôledo Filho et al. (2003), também,

encontraram melhorias em fibrocimento reforçado com fibras de coco e fibras de sisal que passaram pelo processo da carbonatação, atribuindo esse fato à eliminação do Ca(OH)_2 durante o processo.

A carbonatação acelerada, também, mostrou-se eficiente quanto à preservação das fibras vegetais nas formulações compostas por fibras de PP associadas à fibra de celulose. Nas telhas com 3% Cel + 0,5%PP, que não foram carbonatadas, é possível observar apenas fibras de PP na matriz (Figura 23). No entanto, nas telhas de mesma formulação que foram carbonatadas (Figura 24) é possível notar a presença de fibras vegetais na matriz (Setas 6 e 7).



Figura 23 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 3% Cel + 0,5% PP não carbonatada

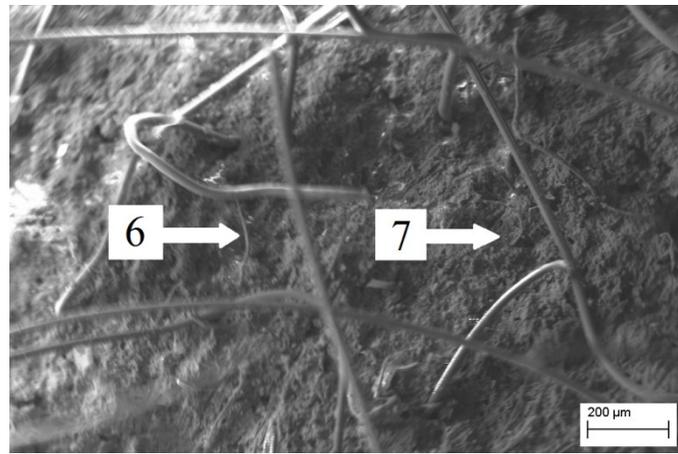


Figura 24 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de ruptura de uma telha reforçada com 3% Cel + 0,5% PP e carbonatada

Por outro lado, alguns autores relatam que a carbonatação acelerada confere poucas alterações nas propriedades mecânicas de compósitos de cimento com celulose após ciclos envelhecimento acelerado de imersão e secagem (EL-AHKAR et al., 2002; MARIKUNTE; SOROUSHIAN, 1994; SOROUSHIAN; SHAH; WON, 1994; SOROUSHIAN; SHAH; WON, 2012).

Como dito anteriormente, o processo de carbonatação ocorre de forma natural, fazendo com que o Ca(OH)_2 do fibrocimento reaja com o CO_2 atmosférico resultando no CaCO_3 . Portanto, tanto as amostras carbonatadas como as amostras não carbonatadas perderam o Ca(OH)_2 espontaneamente da sua composição química ao longo dos anos como pode ser visto nas Figuras 25, 26 e 27.

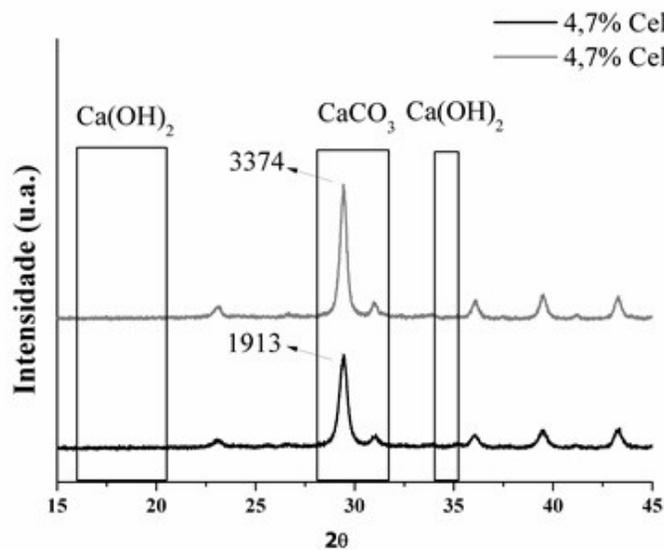


Figura 25 Espectros de Difração de Raios X (DRX) das amostras reforçadas com 4,7% cel carbonatada e não carbonatada

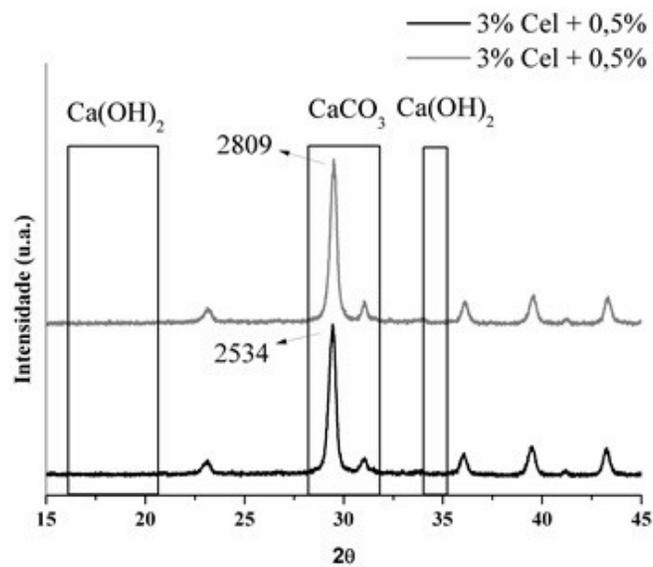


Figura 26 Espectros de Difração de Raios X (DRX) das amostras reforçadas com 3% Cel + 0,5% PP carbonatada e não carbonatada

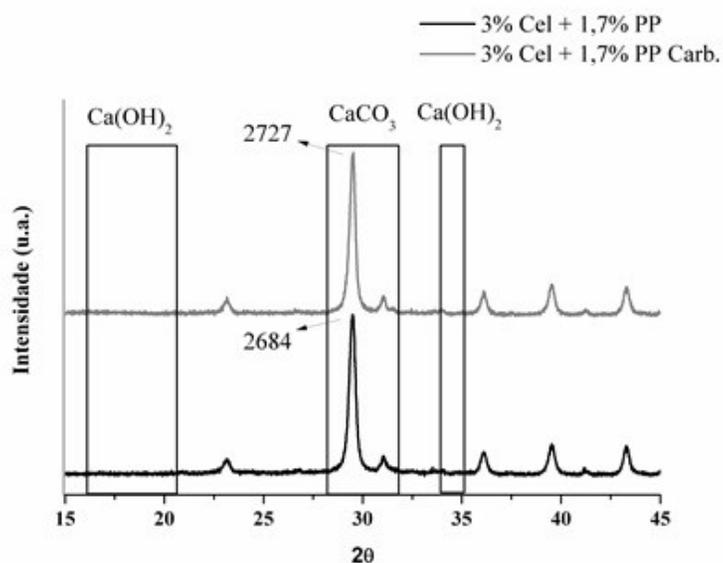


Figura 27 Espectros de Difração de Raios X (DRX) das amostras reforçadas com 3% Cel + 1,7% PP carbonatada e não carbonatada

Nas Figuras 25, 26 e 27 é possível observar que não há picos relacionados ao Ca(OH)_2 , sugerindo que essa substância foi eliminada com o decorrer dos anos. Por outro lado, os picos relacionados à região do CaCO_3 mostram uma pequena diferença de intensidade, conferindo maior quantidade dessa substância nas telhas que passaram pelo processo da carbonatação. A maior variação na intensidade do pico relacionado ao carbonato de cálcio é observada para a formulação 4,7% Cel, o que pode estar relacionado com a melhoria de todas as propriedades mecânicas das telhas reforçadas apenas com polpa celulose de sisal.

Nas Figuras 28, 29 e 30 estão apresentados os valores médios para as propriedades físicas de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA) das telhas carbonatadas e não carbonatadas avaliadas após 10 anos de envelhecimento natural.

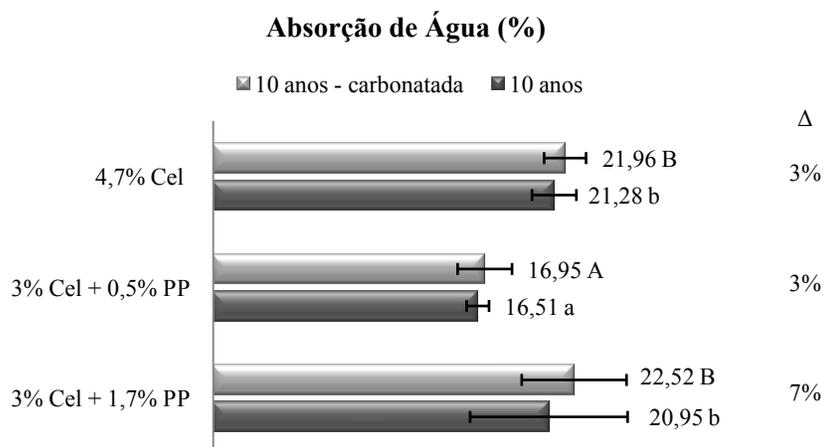


Figura 28 Valores médios e desvio padrão da absorção de águas telhas carbonatadas e não carbonatadas.

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para carbonatadas e minúscula para não carbonatadas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

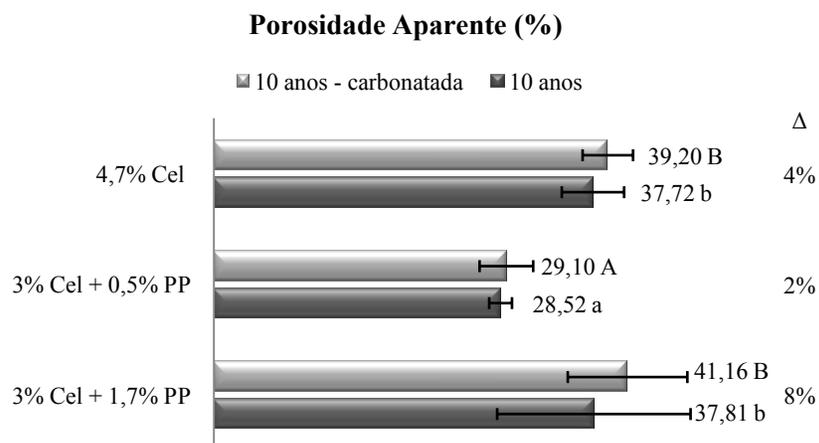


Figura 29 Valores médios e desvio padrão da porosidade aparente das telhas carbonatadas e não carbonatadas

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para carbonatadas e minúscula para não carbonatadas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

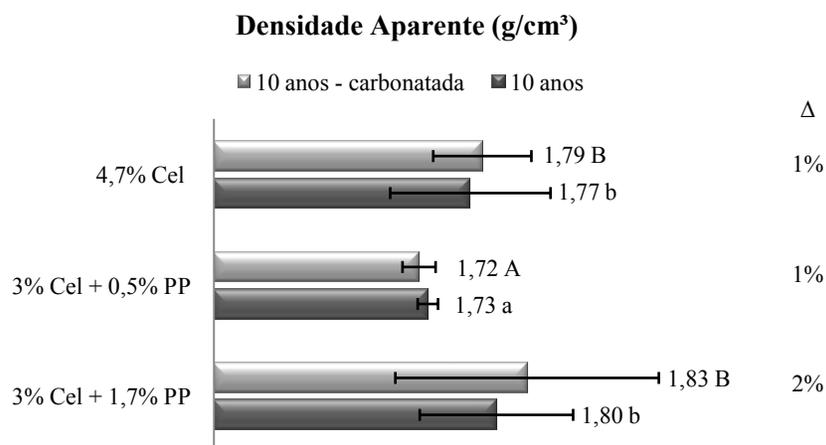


Figura 30 Valores médios e desvio padrão da densidade aparente das telhas carbonatadas e não carbonatadas

Nota: Valores seguidos pela mesma letra, maiúscula para carbonatadas e minúscula para não carbonatadas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Δ = variação.

Quanto aos resultados físicos nas três propriedades avaliadas, após 10 anos de envelhecimento natural, foi possível observar que as formulações com 4,7% Cel e 3% Cel + 1,7% Cel tiveram maiores valores e foram diferentes estatisticamente da formulação reforçada com 0,5% de PP.

As menores médias obtidas pelas telhas reforçadas com menores quantidades de fibras (3% Cel + 0,5% PP), também, foi relatado por Dias (2011), que, ao avaliar diferentes formulações em fibrocimento, constatou que quanto menor o teor de fibras menor a porosidade aparente do compósito.

Também, foi possível observar que houve pouca variação das telhas carbonatadas e não carbonatadas após 10 anos de envelhecimento natural. Porém, para todas as propriedades físicas, as telhas que passaram pelo processo de carbonatação mostraram valores médios superiores às telhas não carbonatadas após a exposição ao intemperismo, o que pode ser explicado pela preservação da fibra vegetal na matriz carbonatada. Essa maior conservação da

fibra vegetal em uma matriz carbonatada faz com que a mesma absorva mais água em razão de seu caráter hidrofílico.

A maior variação na AA e na PA foi relatada para a formulação que continha maior teor de PP (3% Cel + 1,7% PP). Esse fato pode estar relacionado a problemas durante a produção do compósito. Como as fibras de PP são longas (6 mm), é possível que não tenha havido boa dispersão na matriz, o que com o passar dos anos pode intensificar a formação de poros no fibrocimento. Esses poros fazem com que o material fique mais frágil, explicando, assim, a piora na CM e na DCM que ocorreu para essa formulação.

De forma geral, a carbonatação acelerada confere maior influência nas propriedades mecânicas do que nas propriedades físicas das telhas que passaram por 10 anos de exposição ao ambiente. Além disso, esse processo se mostrou mais eficiente para as telhas reforçadas apenas com polpa de celulose.

4.3 Efeito da autoclavagem na durabilidade das telhas

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados mecânicos de energia específica (EE), carga máxima (CM), deformação na carga máxima (DCM) e deformação total (DT), após 28 dias e 10 anos para as telhas reforçadas apenas com celulose que passaram ou não pela autoclavagem.

Tabela 3 Resultados mecânicos das telhas autoclavadas e não autoclavadas

4,7 cel		CM (N)	DCM (mm)	DT (mm)	EE (kJ/mm ²)
28d ¹	Sem	1275 ± 290*	5,20 ± 0,55ns	1,70 ± 0,44*	7,31 ± 1,33ns
	Aut	773 ± 126	4,72 ± 0,53	1,25 ± 0,38	6,48 ± 0,92
10a	Sem	367 ± 73ns	1,37 ± 0,22ns	1,71 ± 0,23*	0,11 ± 0,04ns
	Aut	495 ± 317	1,64 ± 0,39	2,68 ± 0,52	0,15 ± 0,05

¹ Fonte: Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a).

Médias seguidas pelo desvio padrão; ns = não significativo; * significativo a 5%. 28d = ensaio realizado aos 28 dias; 10a = ensaio realizado após 10 anos; Sem = telhas não autoclavadas; Aut = telhas autoclavadas; CM = carga máxima; DCM = deformação na carga máxima; DT = deformação total; EE = energia específica.

Nos ensaios mecânicos, realizados aos 28 dias, foi possível observar diferença estatística nas propriedades de CM e EE. Já, após 10 anos, apenas a DT teve diferença significativa entre as telhas autoclavadas e não autoclavadas. Nota-se, também, que a autoclavagem diminui os valores médios de todas as propriedades mecânicas avaliadas aos 28 dias. Porém, após 10 anos de envelhecimento natural, a tendência é contrária, pois todas as propriedades tiveram valores médios superiores às telhas não autoclavadas.

Quanto ao ensaio realizado aos 28 dias, é possível perceber que a cura em autoclave foi deficiente, pois não foi capaz de completar a hidratação do cimento e por isso as telhas autoclavadas apresentaram desempenho inferior. Essa diminuição das propriedades mecânicas do fibrocimento autoclavado sem envelhecimento, também, foi descrita por Tonoli (2006) e Coutts (1988).

Após o envelhecimento natural, a melhora das propriedades mecânicas das telhas autoclavadas, quando comparadas àquelas não autoclavadas, pode estar relacionada com a hidratação mais intensa do cimento, durante a autoclavagem, o que, com o decorrer do tempo, permitiu que as ligações entre a

fibra e a matriz fossem mais eficientes. Além disso, como descrito por Tonoli (2009b), após 200 ciclos de envelhecimento acelerado em fibrocimento reforçado com fibras de eucalipto, houve menor mineralização das fibras dos compósitos autoclavados, o que resultou em maiores valores de EE para esses materiais em relação ao fibrocimento não autoclavado.

Assim como a carbonatação, a autoclavagem em telhas reforçadas apenas com sisal conferiu melhoras após 10 anos de envelhecimento natural. Diferentemente das telhas que passaram pela cura convencional, as telhas autoclavadas apresentaram valores médios para a CM acima do recomendado por Gram e Gut (1994), que estipula o valor mínimo de 425 N para essa propriedade em telhas com 8 mm de espessura.

Outro ponto importante a ser destacado é que o aumento das propriedades mecânicas das telhas reforçadas com polpa de sisal, após 10 anos de envelhecimento natural, oferecida pela técnica da autoclavagem, obteve valores médios inferiores às telhas carbonatadas descritas no item 4.2.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados físicos de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA) das telhas reforçadas com 4,7% de celulose.

Tabela 4 Resultados físicos das telhas autoclavadas e não autoclavadas

4,7 cel		AA (%)	PA (%)	DA (g/cm ³)
28d ¹	Sem	32,96 ± 1,15*	44,16 ± 0,74*	1,34 ± 0,03*
	Aut	34,50 ± 0,76	45,42 ± 0,59	1,32 ± 0,09
10 ^a	Sem	21,28 ± 1,38*	37,72 ± 3,10*	1,77 ± 0,09ns
	Aut	24,00 ± 1,42	42,12 ± 2,35	1,76 ± 0,12

¹Fonte: Tonoli (2006) e Tonoli et al. (2010a)

Médias seguidas pelo desvio padrão; ns = não significativo; * significativo a 5%. 28d = ensaio realizado aos 28 dias; 10a = ensaio realizado após 10 anos; Sem = telhas não autoclavadas; Aut = telhas autoclavadas; AA = absorção de água; PA = porosidade aparente; DA = densidade aparente.

Aos 28 dias, todas as propriedades físicas apresentaram diferenças significativas. Já, após 10 anos, apenas a DA não obteve diferença estatística entre os dados.

Assim como discutido anteriormente, após o envelhecimento natural, os compósitos tiveram diminuição na AA e PA e aumento da DA, fato que pode estar relacionado à absorção de CO₂ atmosférico ao longo dos anos, reduzindo a quantidade de Ca(OH)₂ e aumentando o teor de CaCO₃.

Porém, tanto aos 28 dias como após 10 anos, foi observado que as telhas, que não passaram pela autoclavagem, apresentaram menores valores para AA e PA e maiores valores para a DA. Esse fato, também, pode ser explicado pela menor dissolução e precipitação dos produtos de hidratação do cimento nos poros das telhas autoclavadas (TONOLI et al., 2009b), além da maior preservação da fibra vegetal na matriz.

Dessa forma, a técnica de autoclavagem se mostra como uma alternativa para a melhoria das propriedades mecânicas do fibrocimento reforçado apenas com celulose ao longo prazo.

5 CONCLUSÕES

A adição de fibras sintéticas na matriz cimentícia se mostrou eficiente após 10 anos de envelhecimento natural. Quanto maior o teor de polipropileno como reforço, menor foi a perda de desempenho mecânico do compósito ao longo do tempo.

A carbonatação acelerada teve grande influência na preservação da fibra vegetal em um ambiente alcalino e agressivo após 10 anos de envelhecimento natural. Mesmo após a exposição ao intemperismo, o material vegetal não degradou totalmente na matriz como ocorreu nas telhas de controle. Essa técnica teve maiores influências nas propriedades mecânicas e foi mais efetiva nas telhas reforçadas apenas com polpa celulósica de sisal.

De forma geral, a carbonatação é uma técnica que condiz com a busca por tecnologias sustentáveis, pois além de poder capturar CO₂ atmosférico é uma alternativa para o uso de materiais de fonte renovável no reforço do fibrocimento.

A autoclavagem não se mostra como uma técnica vantajosa, aos 28 dias, porém a longo prazo exerce melhoria no compósito cimentício. Assim como a carbonatação, a autoclavagem influencia na conservação da fibra celulósica em ambiente alcalino, porém os resultados físicos e mecânicos da autoclavagem foram inferiores aos obtidos para as telhas carbonatadas.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, L. K. Bagasse-reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 1, n. 2, p. 107–112, Feb. 1995.
- AGOPYAN, V. et al. Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 527–536, May 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**, Oxford, v. 11, n. 2, p. 93-97, May 1989.
- ALAMSHAHI, V. et al. Effect of composition and length of PP and polyester fibres on mechanical properties of cement based composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 36, n. 1, p. 534-537, Nov. 2012.
- ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Carbonatação acelerada efetuada nas primeiras idades em compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 233-246, dez. 2010.
- ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Improved durability of vegetable fiber in forced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 42, n. 2, p. 49-58, Sept. 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 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: ASTM, 2001. 2 p.
- ARDANUY, M. et al. Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. **Cellulose**, New Orleans, v. 18, n. 2, p. 281–289, Jan. 2011.
- ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 79, n. 1, p. 115-128, Mar. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS EXPOSTOS AO AMIANTO. **Panorama do setor**: ano base 2011. 2012. Disponível em: <<http://www.abrea.com.br/07panorama.htm>>. Acesso em: 05 maio 2015.

AZIZ, M. A.; PARAMASIVAM, P.; LEE, S. L. Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, London, v. 3, n. 2, p. 123-132, May 1981.

AZWA, Z. N. et al. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. **Materials and Design**, Birmingham, v. 47, n. 1, p. 424-442, May 2013.

BENTCHIKOU, M. et al. Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 34, n. 1, p. 451–456, Sept. 2012.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. London: Elsevier Applied Science, 1990. 449 p.
BEZERRA, E. M.; JOAQUIM, A. P.; SAVASTANO JUNIOR, H. Some properties of fiber-cement composites with selected fibers. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES, 2004, Pirassununga. **Proceedings...** Pirassununga: Nocmat, 2004. p. 33-43.

BILBA, K.; ARSENE, M. A. Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. **Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing**, Kidlington, v. 39, n. 9, p. 1488-1495, Sept. 2008.

BILBA, K.; ARSENE, M. A.; OUENSANGA, A. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part 1. Influence of botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 25, n. 1, p. 91-96, May 2003.

BOHNEMANN, K.; DIETZ, T. Process options for the production of fibre-cement sheets. In: INTERNATIONAL INORGANIC-BONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS CONFERENCE, 6., 1998, Sun Valey. **Proceedings...** Idaho: [s.n.], 1998. p. 01-12.

CLARAMUNT, J. et al. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 33, n. 5, p. 586–595, May 2011.

COOKE, A. M. et al. Durability of autoclaved cellulose fibre cement composites. In: INORGANIC-BONDED WOOD AND FIBRE CONFERENCE, 7., 2000, Sydney. **Proceedings...** Sydney: [s.n.], 2000. p. 01-37.

COUTTS, R. S. P. A review of Australian research into natural fibre cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 518-526, May 2005.

COUTTS, R. S. P. Wood fibre reinforced cement composites. In: SWAMY, R. N. (Ed.). **Natural fibre reinforced cement and concrete**. Glasgow: Woodhead Publishing, 1988. p. 208-250.

COUTTS, R. S. P.; KIGHTLY, P. Microstructure of autoclaved refined wood-fibre cement mortars. **Journal of Materials Science**, New York, v. 17, n. 5, p. 1801-1806, Mar. 1982.

COUTTS, R. S. P.; MICHELL, M. A. J. Wood pulp fiber-cement composites. **The Journal of Applied Polymer Science**, Malden, v. 37, n. 9, p. 829-844, May 1983.

COUTTS, R. S. P.; NI, Y. Autoclaved bamboo pulp fiber reinforced cement. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 17, n. 2, p. 99-106, Jan. 1995.

COUTTS, R. S. P.; WARDEN, P. G. Air cured wood pulp fiber cement composites. **Journal of Materials Science**, New York, v. 4, n. 10, p. 117-119, July 1985.

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

DIAS, C. M. R. **Fibrocimentos com gradação funcional**. 2011. 173 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

DIAS, C. M. R.; SAVASTANO JÚNIOR, H.; JOHN, V. M. Exploring the potential of functionally graded materials concept for the development of fiber cement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 140-146, Feb. 2010.

EL-ASHKAR, N. H. et al. Durability of pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN BUILDING TECHNOLOGY, 2002, Oxford. **Proceedings...** Oxford: Elsevier, 2002. p. 233–237.

EMBRAPA ALGODÃO. **Sistemas de produção**. 2006. Disponível em: <<http://sistemas.deproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sisal/CultivodoSisal/index.html>>. Acesso em: 14 fev. 2015.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, Pittsburgh, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, Nov. 2012.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. New York: Walter de Gruyter, 1984. 613 p.

FERNÁNDEZ-BERTOS, M. et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 112, n. 3, p. 193-205, Aug. 2004.

FERNÁNDEZ-CARRASCO, L.; CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M. Autoclaved cellulose fibre reinforced cement: Effects of silica fume. **Construction and Building Materials**, Guilford, v. 66, n. 7, p. 138-145, Sept. 2014.

FU, S.; HU, X.; YUE, C. Y. The flexural modulus of misaligned short-fiber reinforced polymers. **Composites Science and Technology**, Newark, v. 59, n. 10, p. 1533-1542, 1999.

GARCIA-HORTAL, J. A. **Fibras papeleras**. Barcelona: Edicions UPC, 2007. 244 p.

GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 21, n. 1, p. 39-48, Mar. 1999.

GIANNINI, M. B. et al. Methodologies to identify asbestos-cement roofing by remote data. **Italian Journal of Remote Sensing**, Milano, v. 44, n. 1, p. 27-37, Feb. 2012.

GRAM, H. E.; GUT, P. **Directives pour le controle de qualite. Quality control guidelines for fiber or micro concrete tiles.** Saint Gallen: Skat, 1994. 69 p.

HANNANT, D. J.; HUGHES, D. C. Durability of cement sheets reinforced with layers of continuous networks of fibrillated polypropylene fil. In. **DEVELOPMENTS OF FIBRE REINFORCED CEMENT AND CONCRETE**, 1986, Oakley. **Proceedings...** Sheffield: RILEM, 1986.

HANNANT, D. J. Overview: fibre reinforcement in the cement and concrete industry. **Material Science and Technology**, Wellington, v. 11, n. 9, p. 853–861, May 1995.

IKAI, S. et al. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 171-180, Feb. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CRISOTILA. **Utilização do amianto no Brasil.** Disponível em: <<http://www.crisotilacomcerteza.com.br/?tag=instituto-brasileiro-do-crisotila>>. Acesso em: 14 abr. 2015.

JOAQUIM, A. P. et al. Sisal organosolve pulp as reinforcement for cement based composites. **Materials Research**, São Carlos, v. 12, n. 3, p. 305–314, jul. 2009.

KUDER, K. G.; SHAH, S. P. Processing of high-performance fiber-reinforced cement-based composites. **Construction and Building Materials**, Guildford. v. 24, n. 2, p. 181–186, Feb. 2010.

LI, Y.; MAI, Y. W.; YE, L. Sisal fiber and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, Newark, v. 60, n. 11, p. 2037-2055, Aug. 2000.

LIU, X. et al. On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 38, n. 4, p. 487-499, Apr. 2008.

MACVICAR, R.; MATUANA, L. M.; BALATINECZ, J. J. Aging mechanism in cellulose fiber reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 21, n. 3, p. 189-196, July 1999.

MARIKUNTE, S.; SOROUSHIAN, P. Statistical evaluation of long-term durability characteristics of cellulose fiber reinforced cement composites. **ACI MaterJournal**, Michigan, v. 91, n. 6, p. 607-616, Jan. 1994.

MATTOSO, L. H. C.; FERREIRA, F. C.; CURVELO, A. S. Sisal fiber: morphology and applications. In: LEÃO, A. L.; CARVALHO, F. X.; FROLLINI, E. (Ed.). **Lignocelulosic-plastic composites**. São Paulo: Editora da USP, 1997. p. 241-266.

MEDINA, J. C. **Plantas fibrosas da flora mundial**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1959. 913 p.

MENDES, R. F. **Desempenho de fibrocimentos extrudados produzidos com polpas celulósicas modificadas com silanos**. 2014. 159 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

MENDES, R. F. et al. Modification of eucalyptus pulp fiber using silane coupling agents with aliphatic side chains of different length. **Polymer Engineering and Science**, Amherst, v. 55, n. 6, p. 1273–1280, Mar. 2015.

MOHR, B. J.; BIERNACKI, J. J.; KURTIS, K. E. Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 37, n. 11, p. 1531-1543, Nov. 2007.

MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 4, p. 435-448, Apr. 2005.

MORTON, J. H.; COOKE, T.; AKERS, S. Performance of slash pine fibers in fiber cement products. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 165-170, Feb. 2010.

MURHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. Structure and properties of some vegetable fibers, part 1. Sisal fiber. **Journal of Materials Science**, New York, v. 19, p. 3925-3934, 1984.

NEGRO, C. et al. Influence of flocculant molecular weight and anionic charge on flocculation behaviour and on the manufacture of fibre cement composites by the Hatschek process. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 35, n. 11, p. 2095-2103, Nov. 2005.

NEITHALATH, N.; WEISS, J.; OLEK, J. Acoustic performance and damping behavior of cellulose–cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 26, n. 4, p. 359-370, May 2004.

OLIVEIRA, A. B. **Melhoria do processo Hatschek, por meio de tratamento de dados históricos, para fabricação de telhas onduladas**. 2010. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PAIVA, J. M. F.; FROLLINI, E. Unmodified and modified surface sisal fibers as reinforcement of phenolic and lignophenolic matrices composites: thermal analyses of fibers and composites. **Macromolecular Materials and Engineering**, Gollm, v. 291, n. 4, p. 405-417, Apr. 2006.

PASTUSZKA, J. S. Emission of airborne fibers from mechanically impacted asbestos-cement sheets and concentration of fibrous aerosol in the home environment in Upper Silesia, Poland. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 162, n. 2, p. 1171-1177, Mar. 2009.

PICANÇO, M. S. **Compósitos cimentícios reforça dps com fibras de carauá**. 2005. 25 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PIZZOL, V. D. **Carbonatação acelerada: nova tecnologia de cura para fibrocimento sem amianto**. 2013. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

PIZZOL, V. D. et al. Effect of accelerated carbonation on the microstructure and physical properties of hybrid fiber-cement composites. **Minerals Engineering**, Cornwall, v. 59, n. 1, p. 101-106, May 2014.

RADVANEK, M. et al. Change of carcinogenic chrysotile fibers in the asbestos cement (eternit) to harmless waste by artificial carbonatization: petrological and technological results. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 252, n. 1, p. 390-400, May 2013.

RILEM Technical Committee 49 TFR. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. **Materials and Structures**, London, v. 17, n. 102, p. 441-456, 1984.

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

ROMA, L. C.; MARTELLO, L. S.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 22, n. 4, p. 668-674, Apr. 2008.

SAETTA, A. V.; SCHEREFLE, B. A.; VITALIANI, R. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat, and carbon dioxide flow through porous materials. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 23, n. 4, p. 761-772, July 1993.

SANTOS, S. F. et al. Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 56, n. 1, p. 84-94, Feb. 2015.

SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. G. C.; WYPYCH, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers - an overview. **Progress in Polymer Science**, Pittsburgh, v. 34, n. 9, p. 982-1021, Sept. 2009.

SAVASTANO JUNIOR, H. et al. Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 31, n. 4, p. 232-243, Apr. 2009.

SAVASTANO JUNIOR, 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. **PatentesOnline.com.br**, São Paulo, 02 abr. 2002.

SAVASTANO JUNIOR, 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. 56 p. (Boletim, 67).

SAVASTANO JUNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Microstructure and mechanical properties of waste fibre-cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 583-592, May 2005.

SAVASTANO JUNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 25, n. 6, p. 585-592, Aug. 2003.

SILVA, P. et al. Carbonate binders: reaction kinetics, strength and microstructure. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 28, n. 7, p. 613-620, Aug. 2006.

SOROUSHIAN, P.; SHAH, Z.; WON, J. P. Optimization of wastepaper fiber–cement composites. **ACI Materials Journal**, Michigan, v. 92, n. 1, p. 82-92, Jan. 1995.

SOROUSHIAN, P.; SHAH, Z.; WON, J. P. Wood fiber reinforced cement composites under wetting–drying and freezing–thawing cycles. **ASCE Materials Journal**, Miami, v. 6, n. 4, p. 595-611, Nov. 1994.

SOROUSHIAN, P.; WON, J. P.; HASSAN, M. Durability characteristics of CO₂-cured cellulose fiber reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 34, n. 1, p. 44-53, Sept. 2012.

SUDIN, R.; SWAMY, N. Bamboo and wood fiber cement composites for sustainable infrastructure regeneration. **Journal of Materials Science**, New York, v. 41, n. 21, p. 6917-6924, Nov. 2006.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 25, n. 2, p. 185–196, Feb. 2003.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 22, n. 2, p. 127-143, Apr. 2000.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 5, p. 537-546, May 2005.

TONOLI, G. H. D. **Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas**. 2006. 156 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2006.

TONOLI, G. H. D. et al. Cellulose modified fibers in cement based composites. **Composites Part A, Applied Science and Manufacturing**, Kidlington, v. 40, n. 12, p. 2046-2053, Sept. 2009a.

TONOLI, G. H. D. et al. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 2, p. 193-201, Feb. 2010a.

TONOLI, G. H. D. et al. Eucalyptus pulp fibres as alternative reinforcement to engineered cement-based composites. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 31, n. 2, p. 225-232, Mar. 2010b.

TONOLI, G. H. D. et al. Isocyanate-treated cellulose pulp and its effect on the alkali resistance and performance of fiber cement composites. **Holzforschung**, Berlin, v. 67, n. 8, p. 853-861, Dec. 2013.

TONOLI, G. H. D. et al. Murphy Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 33, n. 2, p. 225-232, Feb. 2011.

TONOLI, G. H. D. et al. Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp. **Materials and Manufacturing Processes**, Berlin, v. 22, n. 2, p. 149-156, Feb. 2007.

TONOLI, G. H. D. **Fibras curtas de Eucalipto para novas tecnologias em fibrocimento**. 2009. 148 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009b.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 25, n. 2, p. 575–581, Feb. 2011.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 73, n. 4, p. 1-16, July 2015.

WINKLER, J. High levels of dioxin-like PCBs found in organic-farmed eggs caused by coating materials of asbestos-cement fiber plates: a case study. **Environment International**, Lancaster, v. 80, n. 3, p. 72-78, Apr. 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Análise de variância dos ensaios mecânicos e físicos

Carga máxima – 28 dias

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	1030584.47	343528.15	5.040	0.0060
erro	30	2044635.55	68154.51		
Total corrigido	33	3075220.02			
CV(%) =	25.61				

Deformação na carga máxima – 28 dias

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	1.71	0.57	0.585	0.6293
erro	30	29.30	0.97		
Total corrigido	33	31.01			
CV(%) =	20.07				

Deformação total – 28 dias

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	56.98	18.99	22.455	0.0000
erro	30	25.37	0.84		
Total corrigido	33	82.36			
CV(%) =	11.95				

Energia específica – 28 dias

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	6.19	2.06	10.323	0.0001
erro	30	6.00	0.20		
Total corrigido	33	12.20			
CV(%) =	23.25				

Absorção de água – 28 dias

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	73.78	24.59	11.37	90.0000
erro	27	58.35	2.16		
Total corrigido	30	132.13			
CV(%) =	4.53				

Porosidade aparente – 28 dias

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	0.04	0.01	11.402	0.0000
Erro	27	0.03	0.00		
Total corrigido	30	0.08			
CV(%) =	2.82				

Densidade aparente – 28 dias

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	26.82	8.94	6.671	0.0016
erro	27	36.18	1.34		
Total corrigido	30	63.00			
CV(%) =	2.65				

Carga máxima – 10 anos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	309607.73	103202.57	10.055	0.0001
erro	29	297655.89	10263.99		
Total corrigido	32	607263.63			
CV(%) =	22.80				

Deformação na carga máxima – 10 anos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	23.58	7.86	13.789	0.0000
Erro	29	16.53	0.57		
Total corrigido	32	40.11			
CV(%) =	35.96				

Deformação total – 10 anos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	105.55	35.18	51.415	0.0000
erro	29	19.84	0.68		
Total corrigido	32	125.40			
CV(%) =	20.84				

Energia específica – 10 anos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	5.26	1.75	15.936	0.0000
erro	29	3.19	0.11		
Total corrigido	32	8.45			
CV(%) =	56.26				

Absorção de água – 10 anos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	329.39	109.79	18.678	0.0000
erro	53	311.55	5.87		
Total corrigido	56	640.94			
CV(%) =	11.99				

Porosidade aparente – 10 anos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	1197.38	399.12	19.243	0.0000
erro	53	1099.31	20.74		
Total corrigido	56	2296.69			
CV(%) =	12.76				

Densidade aparente – 10anos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	3	0.03	0.01	1.909	0.1393
erro	53	0.33	0.00		
Total corrigido	56	0.36			
CV(%) =	4.49				

Carga máxima – 10 anos carbonatada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	17283.40	8641.70	0.321	0.7296
erro	19	512229.91	26959.46		
Total corrigido	21	529513.31			
CV(%) =	31.06				

Deformação na carga máxima – 10 anos carbonatada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	11.78	5.89	13.018	0.0003
erro	19	8.59	0.45		
Total corrigido	21	20.38			
CV(%) =	32.91				

Deformação total – 10 anos carbonatada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	64.77	32.38	38.256	0.0000
erro	19	16.08	0.84		
Total corrigido	21	80.86			
CV(%) =	21.43				

Energia específica – 10 anos carbonatada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	4.79	2.39	67.826	0.0000
erro	19	0.67	0.03		
Total corrigido	21	5.47			
CV(%) =	27.73				

Absorção de água – 10 anos carbonatada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	290.44	145.22	33.318	0.0000
erro	44	191.78	4.35		
Total corrigido	46	482.22			
CV(%) =	10.23				

Porosidade aparente – 10 anos carbonatada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	1272.16	636.08	45.898	0.0000
erro	44	609.77	13.85		
Total corrigido	46	1881.94			
CV(%) =	10.27				

Densidade aparente – 10 anos carbonatada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	0.09	0.04	7.568	0.0015
erro	44	0.27	0.00		
Total corrigido	46	0.36			
CV(%) =	4.43				

Carga máxima – 10 anos sem carbonatação

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	308024.14	154012.07	14.844	0.0001
erro	23	238632.46	10375.32		
Total corrigido	25	546656.61			
CV(%) =	23.11				

Deformação na carga máxima – 10 anos sem carbonatação

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	23.55	11.77	19.331	0.0000
erro	23	14.01	0.60		
Total corrigido	25	37.57			
CV(%) =	37.43				

Deformação total – 10 anos sem carbonatação

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	61.47	30.73	14.197	0.0001
erro	23	49.79	2.16		
Total corrigido	25	111.27			
CV(%) =	43.15				

Energia específica – 10 anos sem carbonatação

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	3.82	1.91	18.059	0.0000
erro	23	2.43	0.10		
Total corrigido	25	6.26			
CV(%) =	67.62				

Absorção de água – 10 anos sem carbonatação

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	223.60	111.80	18.114	0.0000
erro	42	259.23	6.17		
Total corrigido	44	482.835400			
CV(%) =	12.73				

Porosidade aparente– 10 anos sem carbonatação

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	877.43	438.71	17.959	0.0000
erro	42	1025.99	24.42		
Total corrigido	44	1903.429778			
CV(%) =	14.34				

Densidade aparente – 10 anos sem carbonatação

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	2	0.03	0.01	3.920	0.0275
erro	42	0.19	0.00		
Total corrigido	44	0.22			
CV(%) =	3.82%				

Energia específica – 28 dias com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	0.82	0.82	4.777	0.0451
erro	15	2.60	0.17		
Total corrigido	16	3.43			
CV(%) =	27.44				

Carga máxima – 28 dias com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	1035420.50	1035420.50	18.217	0.0007
erro	15	852589.25	56839.28		
Total corrigido	16	1888009.76			
CV(%) =	22.32				

Deformação na carga máxima – 28 dias com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	0.93	0.93	3.216	0.0931
erro	15	4.37	0.29		
Total corrigido	16	5.30			
CV(%) =	10.79				

Deformação total – 28 dias com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	2.83	2.83	2.012	0.1765
erro	15	21.11	1.40		
Total corrigido	16	23.947188			
CV(%) =	17.03				

Energia específica – 10 anos com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	0.00	0.00	2.303	0.1550
erro	12	0.02	0.00		
Total corrigido	13	0.027493			
CV(%) =	36.75				

Carga máxima – 10 anos com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	38710.91	38710.91	1.830	0.2011
erro	12	253836.30	21153.02		
Total corrigido	13	292547.21			
CV(%) =	36.85				

Deformação na carga máxima – 10 anos com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	0.16	0.16	2.503	0.1396
erro	12	0.79	0.06		
Total corrigido	13	0.96			
CV(%) =	18.00				

Deformação total – 10 anos com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	2.19	2.19	24.271	0.0003
erro	12	1.08	0.09		
Total corrigido	13	3.28			
CV(%) =	15.66				

Absorção de água– 28 dias com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	9.75	9.75	9.522	0.0075
erro	15	15.37	1.02		
Total corrigido	16	25.13			
CV(%) =	3.01				

Porosidade aparente – 28 dias com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	6.56	6.56	14.033	0.0019
erro	15	7.02	0.46		
Total corrigido	16	13.58			
CV(%) =	1.53				

Densidade aparente – 28 dias com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	0.00	0.00	5.293	0.0362
erro	15	0.00	0.00		
Total corrigido	16	0.010094			
CV(%) =	1.68				

Absorção de água – 10 anos com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	64.20	64.20	32.825	0.0000
erro	33	64.54	1.95		
Total corrigido	34	128.74			
CV(%) =	6.21				

Porosidade aparente – 10 anos com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	168.19	168.19	21.716	0.0001
erro	33	255.60	7.74		
Total corrigido	34	423.79			
CV(%) =	7.01				

Densidade aparente – 10 anos com e sem autoclavagem

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	1	0.00	0.00	0.184	0.6704
erro	33	0.34	0.01		
Total corrigido	34	0.34			
CV(%) =	5.76				