UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

MATHEUS ROBERTO CABRAL

Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar curados por carbonatação acelerada

Pirassununga

2016

MATHEUS ROBERTO CABRAL

Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar curados por carbonatação acelerada

VERSÃO CORRIGIDA

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

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria.

Orientador: Juliano Fiorelli

Pirassununga 2016

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cabral, Matheus Roberto CC117p Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar curados por carbonatação acelerada / p Matheus Roberto Cabral ; orientador Juliano Fiorelli. -- Pirassununga, 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. 1. Materiais lignocelulósicos. 2. Painéis de cimento. 3. Cimento Portland. 4. Carbonatação. 5. Partículas de bagaço. I. Fiorelli, Juliano, orient. II. Título.

Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - o autor

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antonio e Maria, que partiram do nosso convívio.

Bons momentos, eternas lembranças.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Juliano Fiorelli pela orientação, disposição e incentivo, ao longo desses quase seis anos de trabalho.

Ao Prof. Dr. Holmer Savastano Junior pela confiança e por abrir as portas do seu grupo de pesquisa.

Adicionalmente, gostaria de agradecê-los por terem feito contatos que viabilizaram a realização dos ensaios experimentais e análise dos resultados do meu projeto na Universidade de Laval e *Institut de recherche et de développement en agro lenvironnement*. Durante minha permanência no Canada, os Professores Stéphane Godbout e Robert Lagacé proporcionaram-me excelente orientação e não mediram esforços para assegurar que o meu trabalho fosse concluído com sucesso.

À universidade de Laval (Canada) e "*Institut de recherche et de développement en agro lenvironnement*-IRDA" pelo financiamento e auxilio na execução deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo financiamento do desenvolvimento do trabalho cedido ao Projeto de Pesquisa [464532/2014-0]-FAIXA A- Projetos Iniciais.

À empresa INFIBRA LTDA pela ajuda financeira e pelos conhecimentos adquiridos para o desenvolvimento do mestrado.

Ao Prof. Dr. Sergio dos Santos pela disposição infinita, ensinamentos e orientação.

À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA-USP) pela oportunidade oferecida para a realização do mestrado.

Aos membros do Grupo de Construções e Ambiência da FZEA-USP.

Aos engenheiros/técnicos do Constrambi, Diego, e Zaqueu que sempre estiveram dispostos a ajudar e compartilhar experiências.

Ao pesquisador e Eng. Jr Joahnn Palacios (IRDA) pelo auxilio prestado durante minha estadia no IRDA e total disponibilidade para ajudar.

Aos amigos que estiveram sempre ao meu lado, dando-me apoio incondicional, em especial as amigas que se tornaram parte de minha família, Bruna e Mariana, obrigado por tudo.

À minha família, pela compreensão e apoio durante essa longa jornada.

À Erika pelo auxílio durante a realização do trabalho, além de todo apoio, estímulo, paciência,

compreensão, amor e carinho ofertados, incondicionalmente.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista, e que, por falha de minha parte, não foram citados, minha eterna gratidão.

RESUMO

CABRAL, M. R. Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar curados por carbonatação acelerada. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

O presente estudo teve como objetivo produzir e avaliar o desempenho de painéis de partículas homogêneas de cimento-bagaço de cana-de-açúcar curados por carbonatação acelerada. Para atingir os resultados foram realizados ensaios de caracterizações morfológica e físico-química das partículas de bagaço de cana-de-açúcar, bem como ensaio de termometria para identificar a compatibilidade da matéria prima (bagaço) com o cimento. Os painéis de partículas cimentobagaço produzidos foram submetidos a dois processos de cura distintos: 1- cura por 48 h em câmara climática, seguida por 24 h em ambiente com concentração de 15% ±0.6 de CO₂, seguida por 24 dias em ambiente saturado ao ar; 2- cura em câmara climática por 48 h, seguida por 25 dias em ambiente saturado ao ar. Ao final dos 28 dias de cura e após ensaio de envelhecimento acelerado de imersão e secagem foram realizadas as caracterizações físico-mecânicas seguindo as recomendações das normativas DIN: 310; 322 e 323, bem como caracterização microestrutural e de condutividade térmica do painel de partículas cimento-bagaço. Os resultados obtidos indicaram que os painéis de partículas cimento-bagaço curados por carbonatação acelerada apresentaram melhor desempenho físico-mecânico quando comparados aos painéis não carbonatados, pois a carbonatação melhorou a interface entre as partículas e a matriz cimentícia, proporcionando maior adesividade entre as fases. E, além disso, reduziu o pH do meio alcalino em que as partículas de bagaço de cana-de-acúcar estão inseridas, minimizando o processo de degradação da lignina, celulose e hemicelulose.

Palavras-chave: Material lignocelulósico; painéis de cimento, cimento Portland, carbonatação.

ABSTRACT

CABRAL, M. R. **Particle-panels homogeneous cement bonded-bagasse cured by accelerated carbonation**. 2016. 81 p. M. Sc. Dissertation - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

The present study aimed to produce and evaluate the performance of homogeneous particles of cement panels-bagasse-sugar cured by accelerated carbonation. To achieve the results tests were carried out morphological and physical-chemical characterization of particles of bagasse of sugar cane, as well as Thermal-test to identify the compatibility of the raw material (bagasse) with cement. The particle cement-bagasse produced were subjected to two different curing processes: 1-cure for 48 h in climate Chamber, followed by 24 h in environment with concentration of 15% \pm 0.6, followed by 24 days in saturated air environment; 2-cure in climate Chamber for 48 h, followed by 25 days in saturated air environment. At the end of the 28 days of curing and after accelerated aging test of soaking and drying were realized the physical-mechanical characterizations according the recommendations of the DIN standards: 310; 322 and 323, as well as micro-structural characterization and thermal conductivity of Particleboard bagassecement. The results obtained indicated that the particle bagasse-cement cured by accelerated carbonation presented physical-mechanical performance better than compared with noncarbonated panels because the carbonation has improved the interface between the particles and the cementitious matrix, providing greater adhesion between phases. In addition, reduced the pH of the alkaline medium in which the particles of bagasse of sugar cane are inserted, minimizing the process of degradation of lignin, cellulose and hemicellulose.

Keywords: Lignocellulosic Material; Cement panel, Portland cement; carbonation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de classificação de materiais compósitos	15
Figura 2 - Processo de hidratação do cimento	19
Figura 3 - Estágios de hidratação do cimento	21
Figura 4 - Estrutura da Fibra Vegetal modificada	23
Figura 5 - Domínios cristalinos e amorfos das partículas de celulose	24
Figura 6 - Processo de carbonatação	32
Figura 7 - Equipamentos de processamento da matéria prima.	34
Figura 8 - Tratamento partículas de bagaço de cana. a) bagaço em fervura b) lava	gem água
corrente após fervura	35
Figura 9 - Processo de produção painéis. a) mistura componentes b) formação c	olchão c)
prensagem d) painel após 24 h	36
Figura 10 - Cura Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar.	a) câmara
de carbonatação b) painéis inseridos na câmara	38
Figura 11 - Componentes constituintes do ensaio de termometria: a) Cimento, b)	fibras de
bagaço, c) água, d) mistura	42
Figura 12 - Sistema de análise por termometria. a) computador com sistema de aqu	uisição de
dados, b) sistema hermético e porta amostras	43
Figura 13 - Corpos de prova ensaio físico	44
Figura 14 - Modelo de ensaio de flexão estática.	45
Figura 15 - a) Equipamento condutividade térmica, b) Corpo de prova	46
Figura 16 - Ensaio de envelhecimento acelerado. a) estuda automática b) corpos de	prova em
ensaio.	47
Figura 17 - Micrografia de superfície da partícula de bagaço de cana.	50
Figura 18 - Curva de hidratação do cimento	52
Figura 19 - Avaliação visual do procedimento de cura.	53
Figura 20 - Curvas TG e DTG de painéis cimento bagaço carbonatados e não carbonatado	dos54
Figura 21 - Difração de raio-X (DRX) amostras carbonatadas e não carbonatadas	56
Figura 22 - Curvas típicas tensão x deformação de painéis de partículas homogêneas	cimento-
bagaço não carbonatados e carbonatados	58

Figura 23 - Imagens de MEV de painéis cimento-bagaço. a) sem carbonatação. b) carbonatados

60

Figura 24 - Corpos de prova após ensaio de envelhecido acelerado - 200	ciclos a) não
carbonatado b) carbonatado	63
Figura 25 - Micrografias painéis envelhecidos. a) não carbonatado b) carbonatado	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura do Cimento Portland	18
Tabela 2 - Índice de inibição cimento-material lignocelulósico	30
Tabela 3 - Teor de umidade partículas de bagaço de cana-de-açúcar	48
Tabela 4 - Composição química partículas de bagaço de cana-de-açúcar	49
Tabela 5 - Valores de tempo, temperatura, taxa de variação máxima e índice de inibição	51
Tabela 6 - Valores médios de propriedades físicas de painéis de partículas cimento baga	ço57
Tabela 7 - Resultados médios de propriedades mecânicas de painéis experimentais e da	literatura
	59
Tabela 8 - Condutividade térmica dos painéis	61
Tabela 9 - Propriedades físicas painéis 200 ciclos	62
Tabela 10 - Propriedades mecânicas painéis 200 ciclos	64

SUMÁRIO

<u>1</u> INTRODUÇÃO	13	
2 <u>REVISÃO DE LITERATURA</u>	14	
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	14	
2.2 PAINÉIS CIMENTO-MATERIAL LIGNOCELULÓSICO	16	
2.3 CIMENTO PORTLAND	18	
2.3.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	19	
2.4 MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS	22	
2.4.2 Hemicelulose	25	
2.4.3 LIGNINA	25	
2.4.4 Extrativos	26	
2.4.5 PARTÍCULA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	26	
2.4.6 EFEITO DO MATERIAL LIGNOCELULÓSICO NO CIMENTO	27	
2.5 ÍNDICE DE INIBIÇÃO	28	
2.6 Aditivos Químicos	31	
2.7 DEGRABILIDADE DO MATERIAL LIGNOCELULÓSICO	31	
2.8 CARBONATAÇÃO ACELERADA	32	
<u>3</u> <u>OBJETIVOS</u>	33	
3.1 Objetivos específicos	33	
<u>4</u> MATERIAIS E MÉTODOS	34	
4.1 Matérias-primas	34	
4.1.1 BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	34	
4.1.2 CIMENTO PORTLAND	35	
4.1.3 ADITIVO QUÍMICO	35	

4.2 Metodologia para produção dos painéis de partículas homogêneas	CIMENTO-
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	36
4.3 PROCEDIMENTOS DE CURA	37
4.3.1 CURA NÃO CARBONATADA	37
4.3.2 CURA CARBONATADA	38
4.4 ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS DE CURA	38
4.4.1 ANÁLISE VISUAL POR FENOLFTALEÍNA	38
4.5 CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	40
4.5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	40
4.5.1.2 Teor de umidade	40
4.5.1.3 Caraterização química	40
4.6 Caracterização microestrutural das partículas de bagaço de cana-d	E-AÇÚCAR
	40
4.7 ESTUDO DE APTIDÃO CIMENTO-BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	41
4.8 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS PAINÉIS	43
4.8.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	43
4.9 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL PAINÉIS	46
4.10 Análise da condutividade térmica dos painéis	46
4.11 Envelhecimento acelerado: Imersão e secagem	47
4.12 Análise estatística dos resultados	48
5 <u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	48
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	48
5.1.1 TEOR DE UMIDADE	48
5.1.3 Composição química do bagaço de cana-de-açúcar	48
5.1.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL PARTÍCULAS BAGAÇO DE CANA	49
5.2 ESTUDO DE APTIDÃO CIMENTO-BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	51
5.3 AVALIAÇÃO DOS PAINEIS DE PARTICULAS HOMOGENEAS CIMENTO-BAGAÇO	53
5.3.1 Avaliação visual do procedimento de cura	53
5.3.2 Avaliação por TG e DRX dos procedimentos de cura	54
5.3.3 Propriedades físicas dos painéis	56

5.3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS	58
5.3.6 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS PAINÉIS	61
6. ENVELHECIMENTO ACELERADO	62
6.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA PAINÉIS ENVELHECIDOS - 200 CICLOS	62
6.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA PAINÉIS ENVELHECIDOS - 200 CICLOS	63
6.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL PAINÉIS ENVELHECIDOS 200 CICLOS	64
7. CONCLUSÕES	66
BIBLIOGRAFIA	67

1 INTRODUÇÃO

Segundo Moslemi (1999) o ato de misturar o adesivo inorgânico com madeira ou biomassa oriunda da agricultura é de longa data. Na pré-história, a palha de arroz ou o trigo eram misturados ao barro para produzir um compósito nomeado de bloco ou tijolo de barro. Os painéis de cimento-material lignocelulósico foram inseridos na construção civil mais recentemente, em 1920, na Áustria e na Alemanha. Esse produto apresentou expansão de produção após a II Guerra Mundial, nos Estados Unidos (*wood fiber cement*) e no México (*cement-bonded particleboard*).

A aceitação destes materiais está ligada a utilização do aglomerante inorgânico, que propicia propriedades superiores em comparação aos painéis produzidos com matrizes orgânicas, assegurando resistência ao fogo, ataque de fungos e cupins, além de isolamento térmico e acústico (LATORRACA, 2000).

No entanto, a junção desses materiais acarreta alguns problemas como, por exemplo, a alta densidade do produto final e o efeito inibidor da cura do cimento causado pelos extrativos e polissacarídeos presentes no material lignocelulósico, que podem afetar as reações com o cimento, resultando em painéis de baixa qualidade (JORGE et al., 2004). Diversos pesquisadores (SOUZA; GEIMER; MOSLEMI, 1997; SOUZA; GEIMER; MOSLEMI, 1997; HACHMI; MOSLEMI; CAMPBELL, 1990; OKINO et al., 2004; CABRAL et al., 2015) têm direcionado seus estudos para avaliar as interações físicas e químicas entre o material lignocelulósico e o cimento e, também, para a redução no tempo de cura.

O crescente aumento do consumo de madeira, e a necessidade de tecnologias para a utilização de insumos considerados como resíduos, minimizando a pressão sobre os ecossistemas naturais, abrem desafios para o desenvolvimento tecnológico e a inovação de novos produtos.

Desta forma, a busca por materiais compósitos com resíduos agroindustriais, desperta interesse nos meios acadêmicos e industriais. Porém, o estudo de painéis de partículas de resíduos agroindustriais aglomerados com matriz inorgânica, se depara com o problema da baixa durabilidade das partículas em meio alcalino (pH~13) e, consequentemente, mineralização desse material.

A mineralização das partículas consiste no processo de reprecipitação dos produtos de hidratação do cimento em seu interior (lúmen). A região da matriz em torno da fibra (interface ou zona de transição) é caracterizada pela porosidade elevada, permitindo o acúmulo da solução de

água com produtos alcalinos como a Portlandita Ca(OH)₂, que por sua vez, degrada as partículas (AGOPYAN et al., 2005).

A carbonatação acelerada da matriz de cimento Portland pode ser empregada para melhorar a durabilidade devido à modificação da matriz cimentícia, reduzindo sua alcalinidade, tornando-o menos agressivo para materiais lignocelulósicos (TOLÊDO ROMILDO et al., 2003; TONOLI et al., 2009).

A carbonatação pode ser descrita como a difusão do gás carbônico (CO₂) presente na atmosfera, por meio dos poros insaturados de matrizes cimentícias. O CO₂ é dissolvido na fase aquosa presente nos poros e se transforma em ácido carbônico (H₂CO₃), que são dissociados em íons de bicarbonato (HCO³⁻) e carbonato (CO³⁻), juntamente com a dissolução da Portlandita (Ca(OH)₂), que libera íons de cálcio (Ca²⁺) e hidróxido (OH⁻), os quais precipitam e formam o carbonato de cálcio (CaCO₃) (PETER et al., 2008).

Até o momento, há uma falta de informação sobre o estudo das partículas de bagaço de cana para utilização em painéis de cimento e a utilização da carbonatação acelerada nas primeiras idades.

Dentro desse escopo, o presente projeto de pesquisa visou produzir e avaliar o desempenho físico-mecânico de painéis de partículas homogêneas de cimento-bagaço de canade-açúcar curados por carbonatação acelerada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste item está apresentada a revisão de literatura que resume resultados de trabalhos científicos relacionados aos temas de painéis de cimento e material lignocelulósico, com ênfase no detalhamento das matérias primas empregadas, processo de produção, carbonatação acelerada, propriedades físico-mecânicas e microestruturais.

2.1 Materiais compósitos

Os primeiros materiais compósitos produzidos pelo homem surgiram após a humanidade ter abandonado as cavernas, quando houve a necessidade de construção de moradias. A princípio tal necessidade foi suprida pela disponibilidade de madeira e pedras. No entanto, a escassez de

matéria-prima em algumas regiões fez com que o homem passasse a empregar o barro para a produção de tijolos secos ao sol. Porém, estes tijolos eram muito frágeis, sendo melhorados com inserção de palhas de arroz ou de milho (materiais de reforço) ao barro (matriz), tornando-os mais resistentes e duráveis (GIACOMINI, 2001).

Um material compósito pode ser definido como multifásico que contêm proporções significativas das propriedades de ambas as fases que o constituem, de modo a obter a melhor combinação de propriedades (CALLISTER, 2009).

A Figura 1 apresenta um esquema de classificação para os materiais compósitos (MATTHEWS; RAWLINGS, 1999).



Figura 1 - Sistema de classificação de materiais compósitos

Fonte: MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. Composite materials: science and engineering. Boca Raton: CRC Press, 1999.

Portanto, tais materiais possuem fases constituintes com estruturas moleculares e propriedades diferentes. Tal combinação tem por finalidade agregar propriedades específicas ao material resultante, visando uma determinada aplicação. Os materiais compósitos podem apresentar adequadas combinações de resistência, tenacidade, densidade, dureza, resistência a altas temperaturas e corrosão (HERAKOVICH, 1998; MANO, 1991; CALLISTER, 2009).

2.2 Painéis cimento-material lignocelulósico

Os painéis à base de material lignocelulósico estão inseridos na classe de produtos que auxiliam a industrialização da construção civil, pois podem ser aplicados em paredes, pisos e coberturas de forma modulada, além da facilidade de sua utilização (MATOSKI, 2005).

As partículas são agregadas a agentes fortalecedores como o cimento sendo necessária adição de água para atuar como reagente e de aditivos químicos para acelerar o tempo de pega (endurecimento) do cimento, assegurando maior resistência (OKINO et al., 2004).

Os primeiros painéis com aglomerante inorgânico apareceram no mercado com a denominação de "Heraklith", em 1914, tornando-se popular na Alemanha. Em 1928, foi iniciado o uso de cimento Portland como aglomerante em painéis de cimento-madeira, mas o desenvolvimento desses painéis ocorreu somente após a II Guerra Mundial (LATORRACA, 1996)

Em 1940, nos Estados Unidos, foram produzidos em escala industrial painéis de partículas do tipo Excelsior, utilizados para isolamento acústico ou como elemento decorativo (PIMENTEL; BERALDO; SAVASTANO JUNIOR, 2006).

A manufatura dos painéis cimento-material lignocelulósico é semelhante à utilizada para o aglomerado convencional à base de matriz orgânica, sendo iniciada com a inserção das partículas na porcentagem de água aferida, onde, pode haver aditivos aceleradores da pega do cimento (LOPES et al., 2005). Em seguida, o cimento Portland é adicionado a esses componentes, que são misturados até a completa homogeneidade. Após essa etapa, há formação do colchão de partículas utilizando um molde formador. Um determinado número de colchões é empilhado e separado por uma base de aço. Em seguida, o aparato é movido para prensa hidráulica, sendo prensados por 10 min., com pressão de 1,5 - 3,0 MPa (AZAMBUJA et al., 2014).

De acordo com estudo realizado por Frybort et al. (2008) o objetivo da inserção de partículas misturadas ao cimento é, principalmente, obter aumento no módulo de ruptura e ganho nas propriedades isolantes do painel. Partículas de todos os tamanhos e formatos são usadas na confecção de painéis minerais como: strands, flocos, fibras e chips.

Muitas pesquisas veem sendo realizadas com o objetivo de viabilizar o uso dos materiais lignocelulósicos para produção de painéis com matriz de cimento. Dentre os estudos de painéis com cimento estão as fibras de Curauá (BILCATI, 2015), fibra de coco (FERRAZ et al., 2011) e

as partículas de madeira, tais como, *Schizolobium amazonicum* (IWAKIRI et al., 2012), *Eucalyptus grandis* (IWAKIRI; PRATA, 2008), *Hevea brasiliensis* (OKINO et al., 2004) *Eucalyptus urophylla* (LILGE; HASELEIN, 2014).

Onuorah, Nnabuife e Nwabanne (2014) produziram painéis de cimento-bambu (*Bambusa vulgaris*) e as propriedades mecânicas médias obtidas foram de 5 MPa para o módulo de ruptura (MOR) e 9111 MPa para módulo de elasticidade (MOE). Os resultados físicos apresentaram resultados médios de 25 % de absorção de água (AA) e 5.21% para inchamento em espessura (IE). Estes resultados obtidos pelos pesquisadores apresentam a potencialidade para aplicação não estrutural dos painéis cimento-bambu em estudo.

Estudo desenvolvido por Wolfe e Gjinolli (1999) sugere que os painéis de cimentomadeira apresentam potencial para aplicação estrutural, embora suas propriedades de rigidez e resistência sejam 10% menores em comparação com outros tipos de painéis estruturais similares.

As principais vantagens do uso de painéis cimento-material lignocelulósico são:

• Disponibilidade de matéria-prima renovável, possibilitando o aproveitamento de resíduos (BERALDO; CARVALHO, 2004);

• Excelente trabalhabilidade, podendo ser serrado e furado (MATOSKI, 2005);

• Não emissão de resíduos tóxicos durante sua produção, além do emprego de material ligante inerte e com menores riscos à saúde dos trabalhadores da linha de produção (VAN ELTEN, 2006);

• Alta resistência ao fogo (ARO, 2008);

• Excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico (ARO, 2008);

• Excelente estabilidade dimensional, quando comparado a outros compostos de madeira, como painéis de partículas, além disso, a absorção de água é muito pequena (MOSLEMI, 1999).

No entanto, apesar das vantagens apresentadas quando comparados a outros tipos de painéis de madeira, existem desvantagens que tem impedido a difusão desses painéis, tais como:

• Processo de cura lento do cimento, que leva a redução da capacidade da produção e exige um grande estoque de painéis durante a cura (MOSLEMI, 1999);

• Variação de compatibilidade química da madeira com o cimento (MOSLEMI, 1999);

• Meio alcalino do cimento pode causar a mineralização da celulose e resultar na perda da resistência (MATOSKI, 2005).

2.3 Cimento Portland

De acordo com estudos realizados por Youngquist (1995) os aglomerantes inorgânicos apresentam densidade superior à madeira e se comparados às resinas, necessitam de maior proporção por unidade de volume do composto. As principais categorias de aglomerantes inorgânicos são: o gesso, o cimento de magnésio e o cimento Portland. O gesso e o cimento de magnésio são vulneráveis à umidade, fazendo com que as aplicações sejam restritas a ambientes interiores. Já, os compostos derivados do cimento Portland são mais duráveis, podendo ser utilizados tanto em ambiente interno como externo.

Os primeiros estudos indicavam o uso de cimento magnesiano ou gesso para a produção de painéis cimento-material lignocelulósico.

	Nome Técnico	Sigla	Classe
Cimento	Cimento Portland Comum	CP I	25, 32, 40
Portland Comum	Cimento Portland Comum com adição	CPI-S	25, 32, 40
(NBR 5732)			
Cimento	Cimento Portland composto com escória	CPII-E	25, 32, 40
Portland	Cimento Portland composto com pozolâna	CPII-Z	25, 32, 40
composto (NBR	Cimento Portland composto com filer	CPII-F	25, 32, 40
11578)			
Cimento Portland de Alto forno (NBR 5735)		CPIII	25, 32, 40
Cimento Portland Pozolânico (NBR 5736)		CPIV	25,32
Cimento Portland Alta Resistência Inicial (NBR 5733) CPV-ARI -		-	
Cimento Portland Resistentes aos Sulfatos (NBR 5737) - 25, 32, 40		25, 32, 40	
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (NBR 13116)		-	25, 32, 40
Cimento	Cimento Portland Branco Estrutural	СРВ	25, 32, 40
Portland Branco	Cimento Portland Branco Não Estrutural	СРВ	-
(NBR 12989)			
Cimento para Poços Petrolíferos (NBR 9831) CPP G			

Tabela 1 - Nomenclatura do Cimento Portland

Fonte: Adaptado pelo autor da Associação Brasileira de Cimento Portland (2016).

Desde o final da década de 1980, o cimento Portland (composto por silicatos e aluminatos de cálcio) passou a ser o aglomerante mineral mais empregado em virtude dos melhores resultados sobre as propriedades desses painéis (MOSLEMI; PFISTER, 1987).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland-ABCP (2016) o cimento pode ser classificado como um pó fino, com propriedades aglomerantes, ligantes, que tem reação quando há inserção de água. No Brasil, vários tipos de cimento estão disponíveis no mercado (Tabela 1).

Diversos estudos têm indicado o uso da matriz de cimento Portland CPV-ARI (LATORRACA; IWAKIRI, 2001; MOSLEMI; PFISTER, 1987; PIMENTEL; BERALDO; SAVASTANO JÚNIOR, 2006) devido às propriedades mecânicas superiores em relação aos outros cimentos disponíveis no mercado e também, por ele apresentar elevada resistência inicial, o que favorece a redução do tempo de manipulação de elementos pré-moldados.

2.3.1 Hidratação do cimento

O processo de hidratação do cimento é constituído por reações químicas que conduzem à formação de fases hidratadas. As reações de hidratação apresentam um complexo sistema com características termodinâmicas, cinéticas e estruturais que dependem da substância química e dos parâmetros físicos envolvidos (QUARCIONI, 2008).

Ao ser misturada ao cimento, a água forma uma suspensão concentrada, denominada pasta. Neste estágio de hidratação, cada partícula de cimento atua como um núcleo de formação de cristais de hidratos (Figura 2).

Esta concentração de cristais aumenta e, com isso, dificulta a passagem da água até as frações de cimento não hidratadas. Maior quantidade de água não significa, necessariamente, maior hidratação do cimento. A relação água/cimento (a/c) é um fator que possui grande importância no estudo da pasta de cimento, pois o excesso de água compromete as propriedades mecânicas e reológicas (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

O processo de hidratação do cimento pode ser influenciado por alguns fatores, especialmente pela sua natureza, finura, temperatura, presença de aditivos e adições minerais (NEVILLE, 1997).



Figura 2 - Processo de hidratação do cimento

Fonte: MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. Sao Paulo: Ibracon, 2008.

Durante os estágios iniciais o mecanismo predominante é a dissolução-precipitação, mas nos estágios seguintes, o processo é conduzido por meio da hidratação no estado sólido ou topoquímica, que progressivamente irá formar uma estrutura rígida (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.3.1.1 Reações de hidratação do cimento

O cimento Portland é composto basicamente por silicato tricálcico (C₃S) (alita), silicato dicálcico (C₂S) (belita), aluminato tricálcico (C₃A) e ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) (ferrita) (TAYLOR, 1998; RODRIGUES, 2012)

O silicato tricálcico (alita) compõe entre 50-70% do cimento Portland, e após o contato com a água, torna-se responsável pelo acréscimo da resistência até 28 dias de idade. Constituindo entre 15-30% do cimento a belita, possui reação mais lenta quando comparada a alita, o que resulta em pouco acréscimo de resistência durante os primeiros 28 dias. A belita contribui para a

resistência do cimento Portland em idades mais avançadas. Por fim entre 5-10 % do cimento são o aluminato tricálcico e a ferrita (TAYLOR, 1998).

Durante o processo de hidratação do cimento, o silicato de cálcio hidratado (CSH) é o resultado dos principais produtos. O CSH é formado pela hidratação dos silicatos tricálcico (C₃S) e dicálcico (C₂S). Cristais de Portlandita (CH), etringita (AFt), aluminatos de cálcio hidratados (CAH) e monosulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) são outros produtos resultantes do processo de hidratação do cimento (RODRIGUES, 2012).

O processo de hidratação do cimento está relacionado diretamente à evolução das propriedades do material, tais como módulo de elasticidade, resistência, fluência e retração. A hidratação é considerada um processo exotérmico, portanto, a liberação de calor pode ser expressa por uma curva típica com a taxa de evolução de calor versus tempo de reação. Essa curva apresentada quatro estágios diferentes (Figura 3).



Figura 3 - Estágios de hidratação do cimento

Fonte: Adaptado de BULLARD, J. W., JENNINGS, H.M., LIVINGSTON, R.A., NONAT, A., SCHERER, G.W., SCHWEITZER, J.S., SCRIVENER, K.L., THOMAS, J.J. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v.4, p. 1208-1223, 2011.; *apud* RODRIGUES, 2012.

• **Período inicial (I):** De acordo com estudos realizados por Bullard et al. (2011) após o contato com a água, as partículas de cimento liberam calor rapidamente, nesse estágio há a dissolução dos íons de cálcio (Ca^{2+}) e íons de sulfato (SO_4^{2-}). A dissolução das fases anidras de silicato tricálcico (C_3S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) é iniciada, essa dissolução resulta em uma camada de gel de silicato de cálcio hidratado (CSH) que

reveste os grãos anidros. Com a dissolução do aluminato tricálcico (C_3A) e do ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) ocorre a reação com os íons Ca^{2+} e SO4⁻², formando um gel amorfo sobre a superfície dos grãos que forma pequenas agulhas de etringita (fase AFt) (FARIA, 2004).

• **Período indução ou dormência** (**II**): esta etapa é caracterizada pela baixa evolução do calor. A formação de uma camada de gel amorfo proveniente da precipitação inicial de etringita e de silicato de cálcio hidratado (CSH) recobre os grãos do cimento anidro e forma uma barreira entre as fases anidras e a solução aquosa. Este período tem duração aproximada entre 30 min e 3 h (HEWLETT; MASSAZZA, 2003).

• **Período de aceleração (III):** durante o terceiro estágio A Portlandita (CH) e o silicato de cálcio hidratado (CSH) formados são predominantes na reação, devido a diminuição da concentração de íons cálcio (Ca²⁺) na solução. O desenvolvimento da resistência mecânica e a diminuição dos poros ocorre devido a formação dos compostos hidratados. O fim desse período é marcado com o aparecimento do segundo pico na curva (Figura 3). A Portlandita (Ca(OH)₂) alcança sua concentração máxima e começa a precipitar (HEWLETT; MASSAZZA, 2003).

• **Período de desaceleração (IV):** nesse período, o mecanismo passa a ser controlado por difusão iônica (ou reação topoquímica), reações lentas. Tais reações resultam no silicato de cálcio hidratado (CSH) e Porlandita (CH), tanto pela hidratação do silicato tricálcico (C₃S), como pelo silicato dicálcico (C₂S). O período de desaceleração também é caracterizado pela diminuição da taxa de calor gerada, devido à redução na concentração dos íons na solução. O silicato dicálcico (C₂S) aumenta com a evolução do tempo e a taxa de formação de Portlandita diminui. O sulfato de cálcio esgota-se, dando formato a etringita por completo que. A etringita reage com o aluminato tricálcico (C₃A) e ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) formando o monossulfoaluminato de cálcio (AFm) (QUARCIONI, 2008).

• **Período final:** no último estágio ocorre a densificação da microestrutura, hidratação da ferrita e a formação de placas hexagonais delgadas de monossulfoaluminato de cálcio (AFm) (RODRIGUES, 2012).

2.4 Materiais lignocelulósicos

Os materiais lignocelulósicos desempenham papel importante nas atividades econômicas de diversos países. Nesse cenário, a tendência mundial é crescente para o máximo

aproveitamento desses recursos por meio do desenvolvimento de novos processos e produtos. Estes, por sua vez, não só ajudam na preservação ambiental, evitando seu descarte, mas também na geração de novos empregos (KOZLOWSKI et al., 2006).

Muitos desses materiais lignocelulósicos são oriundos do Brasil, país que apresenta posição de destaque na América do Sul, possuindo uma área de aproximadamente 8,5 milhões de km², onde 5-6% são terras aráveis, 22% de pastagens permanentes e 58% florestas e matas. O país também é privilegiado geograficamente, pois possui condições climáticas notáveis e solo fértil para o cultivo de uma gama de espécies de plantas (SATYANARAYANA; GUIMARÃES; WYPYCH, 2007).

Dentre os materiais lignocelulósicos cultivados no Brasil estão, por exemplo, o sisal, coco, rami, curauá, cana-de-açúcar e a soja (KALIA et al., 2011). A estrutura destes materiais é basicamente composta por um feixe de células individuais nomeadas fibrilas, e estas fibrilas compõe-se de microfibrilas arranjadas em camadas de distintas espessuras e ângulos de orientação (Figura 4) (THOMAS et al., 2011).



Figura 4 - Estrutura da Fibra Vegetal modificada

Fonte: Adaptado de THOMAS, S.; PAUL, S.A.; POTHAN, L.A.; DEEPA, B. Natural fibres: structure, properties and applications. Chapter 1. In: KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAUR, I. Cellulose Fibers: Bio and Nano-Polymer Composites. Green Chemistry Technology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011 *apud* BARRA, 2014.

O diâmetro dessas fibrilas pode variar de 10-50 µm e são constituídos por diversas paredes celulares que definem as características mecânicas, físicas e químicas do material lignocelulósico (XU, 2010). As paredes celulares são divididas em camadas denominadas lamela média, parede primária e parede secundária. Quimicamente é composta essencialmente por microfibrilas de celulose semicristalina, aglutinadas em uma matriz de hemicelulose e lignina estruturadas em cadeias que proporcionam resistência mecânica (FARUK et al., 2012).

Devido à complexidade da composição molecular dos materiais lignocelulósicos, seu estudo é elaborado por meio das substâncias constituintes, sendo: celulose, hemicelulose, lignina e extrativos (RAMIREZ-FUENTES et al., 2002).

2.4.1 Celulose

Atualmente, a celulose é o polímero mais abundante no mundo, com produção anual estimada em $1,5 \times 10^{12}$ toneladas (KLEMM; VEJBORG; SHERLOCK, 2006) e vem sendo utilizada pela indústria, principalmente, para produção de papel (CAO et al., 2011). Geralmente a maioria destes materiais contêm 60-70% de celulose (THAKUR; THAKUR, 2014) que é formada por átomos de Carbono (C), Hidrogênio (H) e Oxigênio (O) (SILVA et al., 2013).



Figura 5 - Domínios cristalinos e amorfos das partículas de celulose

Fonte: Adaptado de MARIANO, M. **Obtenção, caracterização e aplicação de nanocristais de celulose obtidos a partir do sisal**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013 *apud* MEJIA 2014.

A aplicação das partículas lignocelulósicas como constituintes de materiais compósitos têm obtido sucesso devido à sua alta resistência e rigidez combinada com baixo peso e biodegradabilidade (SIRO; PLACKETT, 2010). A celulose possui em sua cadeia várias regiões cristalinas dispersas em regiões amorfas. No entanto, sob efeito da temperatura, a cristalinidade da celulose aumenta consideravelmente (BHUIYAN; HIRAI; SOBUE, 2000). Tal aumento na cristalinidade da celulose pode auxiliar na interação com o cimento, pois esse também forma cristais durante o processo de endurecimento (Figura 5).

2.4.2 Hemicelulose

A denominação hemicelulose dá-se a todos os polissacarídeos ou açúcares não celulósicos presentes na parede celular dos materiais lignocelulósicos. Inicialmente este termo foi proposto para designar polissacarídeos que poderiam ser extraídos de plantas por uma solução aquosa alcalina. As hemiceluloses possuem grande variedade de estruturas que podem ser divididas em quatro grandes grupos, que são as xilanas, mananas, β -glucanas e as xiloglucanas (EBRINGEROVÁ; HROMADKOVA; HEINZE, 2005).

A hemicelulose está ligada às microfibrilas de celulose através de ligações de hidrogênio formando uma rede de hemicelulose e celulose, onde o principal elemento estrutural da fibra é a celulose, enquanto a lignina é dispersa nos espaços entre as microfibrilas, atuando como agente aglutinante das microfibrilas e fibrilas (XU, 2010).

Devido sua natureza heterogênea e ramificada, há na hemicelulose, a formação de uma substância predominantemente amorfa. O estado amorfo da hemicelulose está ligado ao fato de não haver cadeias ordenadas da mesma forma que a celulose, tal fato possibilita a formação de pontes de hidrogênio (MATOSKI, 2005).

2.4.3 Lignina

A lignina é um polímero fenólico, natural, não carboidrato presente na parede celular dos materiais lignocelulósicos em grande quantidade, servindo como uma espécie de adesivo natural ou matriz. Devido sua íntima ligação com a celulose, é normal encontrar a presença de lignina em compósitos baseados em partículas celulósicas. (GUPTA, 2010). A lignina é um complexo

composto de moléculas amorfas, formadas majoritariamente por três monômeros fenilpropanos, a guaiacila, a siringila e a *p*-hidroxifenila (LIU et al., 2008), cujo polímero é formado principalmente por unidades aromáticas de fenilpropano, que é considerada uma substância incrustante que exerce a função de adesivo ou matriz entre os tecidos do material lignocelulósico (WINANDY; ROWELL, 2005). Por apresentar tais ligações, a lignina é relativamente estável, se comparada à hemicelulose e à celulose (BOERJAN; RALPH; BAUCHER, 2003);(VANHOLME et al., 2010).

2.4.4 Extrativos

Os extrativos são constituídos por resinas (terpenos e outros compostos aromáticos), ácidos graxos, álcoois, taninos, flavonoides, entre outros (FENGEL; WEGENER, 1984).

São responsáveis por determinadas características como a coloração, o cheiro, a resistência natural ao ataque de organismos destruidores do material lignocelulósico (LIMA, 1996). Eles podem ser extraídos por meio de lavagem com água fria ou quente, ou por solventes orgânicos, tais como, etanol, tolueno, acetona ou diclorometano.

2.4.5 Partícula de bagaço de cana-de-açúcar

Pesquisas realizadas na última década têm avaliado a aplicação de matérias primas lignocelulósicas provindas de insumos agrícolas de menor custo, para a produção de compósitos em diversas regiões do mundo, apresentando resultados satisfatórios (XU et al., 2006) (LEE; LEE, 2005) (ASHORI; TABARSA; SEPAHVAND, 2012).

O bagaço de cana-de-açúcar é o subproduto fibroso gerado pelo processo de produção de álcool e açúcar, após a extração do suco do caule da cana. Este subproduto tem grande valor como fonte de energia, sendo utilizado comumente como combustível. Entre os anos de 2015/2016, a produção de cana-de-açúcar no Brasil foi da ordem de 658,7 milhões t, cultivada em uma área aproximada de 8.893 mil ha. Entre os estados produtores, São Paulo é responsável por 51,43% da produção total do país (CONAB, 2015).

A consequência da produção elevada é a grande quantidade de insumos gerados na indústria sucroalcooleira brasileira. De acordo com estudo realizado pela a União da Indústria de

Cana de Açúcar (UNICA, 2016), uma tonelada de cana produz em média 280 Kg de bagaço.

O bagaço *in natura* é composto, aproximadamente, por 92% de partículas lignocelulósicas e 8% de sólidos solúveis e insolúveis (MARABEZI, 2009). Levando em conta o elevado volume de insumos sólidos produzidos e o fator ambiental, o desenvolvimento de materiais alternativos com a aplicação de diferentes subprodutos pode apresentar uma possibilidade de utilização destes e evitar assim o descarte inadequado.

Entre as possibilidades em questão, estão às vinculadas à construção civil, destacando estudos realizados por Correia et al. (2014), Vanoli Scatolino et al., (2010), Battistelle; Marcilio; Lahr (2009), Agopyan et al. (2005).

Aggarwal (1995) em seus estudos avaliou as propriedades de compósitos de pasta de cimento reforçada com partículas de bagaço. O compósito produzido atingiu resistência à tração entre 1,58 e 1,71 MPa, resistência à flexão entre 8,85 e 9,60 MPa, densidade entre 1550 e 1650 kg/m³ e absorção de água entre 12,5% e 14,5%.

Teixeira et al. (2012) avaliaram compósitos cimentícios produzidos por processo de extrusão com reforço de partículas de bagaço de cana em 5%, os resultados médios das propriedades mecânicas foram de 9,6 MPa para o MOR e 3087 MPa de MOE.

Baseado nos resultados obtidos pelos estudos realizados por Correia et al. (2014), Teixeira et al. (2012), Battistelle; Marcilio; Lahr (2009), Agopyan et al. (2005) Aggarwal (1995) utilizando o bagaço de cana é possível afirmar que este material lignocelulósico possui potencial de aplicação em compósitos cimentícios.

2.4.6 Efeito do material lignocelulósico no cimento

O potencial de solidificação do cimento na presença do material lignocelulósico é determinado pela composição do mesmo, sendo os extrativos solúveis em água e açúcares os principais agentes inibidores de solidificação (FAN et al., 2012). Tais extrativos podem prolongar o tempo de "pega" do cimento (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004).

De acordo com Karade (2010), Frybort et al. (2008) e Matoski (2005), a problemática entre a compatibilidade do cimento e o material lignocelulósico está ligada ao fato de que estes, possuem em maior ou menor quantidade, substâncias inibidoras como a hemicelulose, e os componentes fenólicos que podem retardar a interação com o cimento, causando assim, problemas na hidratação do painel. Alguns compostos podem até inibir essa adesão, e sem a hidratação o composto não é formado.

O efeito causado pelos extrativos pode ser minimizado pela utilização de algum processo que diminua sua influência sobre a hidratação do cimento. A remoção dessas substâncias pela ação de soluções aquosas ou imobilização das substâncias utilizando um recobrimento de uma película protetora (oleosa ou salina), pode melhorar a compatibilidade do material com o cimento (BERALDO, 2006).

Bilba, Arsene e Ouensanga (2003) estudaram o impacto dos componentes botânicos das partículas de bagaço cana-de-açúcar no processo de pega do cimento. Esses autores concluíram que os açúcares solúveis em água, a hemicelulose e a lignina são responsáveis pelo retardo e diminuição da temperatura máxima de hidratação do cimento.

Uma alternativa a este problema é o pré-tratamento do material lignocelulósico, como a lavagem das partículas em água (fervente ou fria). O pré-tratamento (lavagem em água) é uma das técnicas mais simples e econômicas, sendo o tempo e a temperatura variáveis.

Sarmiento (1996) concluiu que a pré-lavagem do bagaço de cana-de-açúcar diminuiu significativamente o teor de açúcar residual, a lavagem consiste na imersão das partículas em água fervente por 30 min., com o objetivo de remover as impurezas e reduzir o teor de açúcar, seguida de lavagem em água corrente e a secagem ao ar livre durante 48 h e 24 h em estufa 60°C com circulação fechada.

Outros exemplos de pré-tratamentos no material lignocelulósico são a termoretificação, que consiste em submeter o material a temperaturas entre 180 e 270 °C, o que faz eliminar a água e determinados produtos voláteis, tal temperatura degrada a hemicelulose, que interfere no processo de endurecimento do cimento (BERALDO, 2006). A pulverização, que consiste em envolver as partículas, com substâncias hidrofóbicas como óleos, ceras, resíduos minerais, tornando-as impermeabilizadas, deve ser utilizada de maneira que as partículas não fiquem entrelaçadas ou coladas (MOUGEL; BERALDO; ZOULLIAN, 1994).

2.5 Índice de inibição

Materiais lignocelulosicos exercem um papel demasiadamente danoso nas indústrias madeireiras principalmente devido aos problemas envolvidos com o seu descarte. No entanto,

podem representar uma alternativa para a produção de painéis cimento-material lignocelulósico (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004). Diversos autores têm estudado métodos para a aceitação do material lignocelulósico através de ensaios de "aptidão" deste com o cimento como, por exemplo, determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos com cimento e o material lignocelulósico (LATORRACA, 2000); evolução da temperatura de hidratação; e razão do índice de temperatura máxima (temperatura máxima e tempo de hidratação) (HACHMI; MOSLEMI; CAMPBELL, 1990); (LOPES et al., 2005).

A metodologia descrita por Okino et al. (2004) consiste em mensurar, de forma sistemática, a evolução da temperatura da mistura cimento-material lignocelulósico/água durante um período de 24 h, conforme observado na Eq. 1.

$$I = \left\{ \left[\frac{Tcim - Tml}{Tcim} \right] \times \left[\frac{Hml - Hcim}{Tcim} \right] \times \left[\frac{Scim - Sml}{Scim} \right] \times 100 \right\}$$
Eq.1

Onde:

- I = índice de hidratação da cura do cimento (%);
- TCim= temperatura máxima da mistura cimento/água (°C);
- TMl = temperatura máxima da mistura madeira/cimento/água (°C);
- HCim = tempo para atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento na mistura cimento/água (h);
- HMl = tempo para atingir a temperatura máxima da mistura de hidratação do cimento na mistura madeira/cimento/água (h);
- SCim= máximo incremento de temperatura da curva na mistura cimento/água (°C/h);
- SMl= máximo incremento de temperatura da curva na mistura madeira/cimento/água (°C/h)

Para a classificação do índice de inibição pode ser utilizado o sistema de classificação descrito na Tabela 2 (OKINO et al., 2004). Com base nesta metodologia são mensuradas a influência da temperatura e o tempo de hidratação para a mistura cimento-material lignocelulósico/água. Para mensurar a temperatura são utilizados cabos de termopares tipo "J", conectados a um módulo condicionador de sinais analógicos, acoplados a uma placa de

conversão analógico-digital, instalada em um microcomputador, onde os dados são armazenados e processados.

Índice de inibição (%)	Classificação
1-10	Baixo
10-50	Intermediário
50-100	Alto
Maior que100	Muito alto

Tabela 2 - Índice de inibição cimento-material lignocelulósico

Fonte: Adaptado pelo autor de Okino, E.Y.A.; De Souza, M.R.; Santana, M.A.E.; Da Alves, M.V.; De Souza, M.E.; Texeira, D.E. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement & Concretes Composites** 26:729-734.OKINO et al., 2004.

O conteúdo para o preparo das amostras cimento-material lignocelulósico/água é calculado com base na metodologia descrita por Souza (1994), sendo mantida uma relação de material lignocelulósico e cimento de 1:13,33.

As partículas de material lignocelulósico para a realização deste ensaio devem estar absolutamente secas. Para o cálculo da quantidade de água necessária é utilizada a Eq. 2, sugerida por Souza (1994), onde a relação água: cimento empregada é de 43% de água, com base no peso do cimento.

As amostras são inseridas em um sistema com fechamento hermético, acoplado a um cabo do termopar, onde o calor obtido da reação exotérmica do cimento não é dissipado para o ambiente.

$$\hat{A}gua(g) = \tan \hat{a}gua: \operatorname{cimento}(g) \times \left[ML(g) \left(0.3 - \frac{UM(100(\%))}{100} \right) \right]$$
 Eq. 2

Onde:

- UM = umidade do material lignocelulósico seca;
- ML = material lignocelulósico.

2.6 Aditivos Químicos

A utilização dos aditivos químicos tem por objetivo provocar o endurecimento rápido do cimento, facilitando a formação de etringita, que impede a formação imediata dos agentes de inibidores dos materiais lignocelulósicos solúveis em água e não retarda a reação exotérmica do cimento (ZUCCO, 1999) e tem a função de acelerar a evolução da resistência inicial do compósito durante o endurecimento (SILVA et al., 2006). Entre os diversos aditivos empregados estão o cloreto de cálcio, o cloreto de magnésio, o sulfato de alumínio, o silicato de potássio e o silicato de sódio (IWAKIRI et al., 2005).

O cloreto de cálcio tem sido o acelerador de pega mais utilizado, devido a sua eficiência na aceleração da hidratação dos silicatos de cálcio, principalmente o silicato tricálcico (C_3S), e por possuir baixo custo (IWAKIRI et al., 2005). Trabalho desenvolvido por Rashwan, Hatzinikolas e Zmavc (1992) indicou que o cloreto de cálcio adicionado a 4% (com base na massa do cimento) foi o composto químico mais eficiente na aceleração do processo de hidratação.

Estudos realizados por Okino et al. (2004) avaliaram a inibição do processo de hidratação do cimento de painéis cimento-madeira *Hevea brasiliensis*. Os resultados obtidos indicaram que a madeira in natura sem aditivo foi classificada como de "inibição extrema", porém com a adição de cloreto de cálcio foi classificada como de "baixa inibição".

2.7 Degrabilidade do material lignocelulósico

Frequentemente, a água apresenta relação direta com os mecanismos de degradação de compósitos cimentícios reforçados com material lignocelulósico (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Na presença de umidade, o preenchimento gradual do núcleo da partícula com produtos de hidratação do cimento e a densificação da matriz ao redor das partículas, pode gerar uma fragilidade nos compósitos (BENTUR, ARNON; MINDESS, 2007).

Uma das principais razões para essa rápida degradação das partículas é a elevada alcalinidade da água presente nos poros da matriz de cimento Portland, com pH aproximadamente 13, que favorece a decomposição da lignina e da hemicelulose (SAVASTANO; DANTAS; AGOPYAN, 1994). Nesse contexto, a carbonatação acelerada

representa uma alternativa para aumento da durabilidade das partículas lignocelulósicas em meio alcalino, pois o processo difunde o CO₂ presente na atmosfera, através dos poros insaturados da matriz cimentícia.

2.8 Carbonatação acelerada

O processo de carbonatação é uma etapa natural e lenta que ocorre ao longo dos anos na matriz cimentícia, por conta da baixa concentração de dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera. Porém, a carbonatação pode ser acelerada, por meio da exposição do cimento a ambientes com elevadas concentrações de CO_2 (LIU et al., 2001; VAN GINNEKEN et al., 2004).

A carbonatação pode ser descrita como a difusão de CO_2 através dos poros da matriz de cimento. O CO_2 é dissolvido na fase aquosa nos poros liberando hidróxido (H⁺) e carbonato ($CO_3^{2^-}$) (Figura 6). Além disso, a Portlandita ($Ca(OH)_2$) é dissociada em Cálcio (Ca^{2^+}) e hidroxila (OH^-). O gás carbônico dissolvido reage com o hidróxido de cálcio dissolvido, resultando na precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (TOLÊDO ROMILDO et al., 2003).



Figura 6 - Processo de carbonatação

Fonte: Própria autoria.

Compósitos curados em ambiente rico em CO_2 (9,8%) apresentaram maior tenacidade após ciclos de molhagem e secagem, quando comparados àqueles curados em ambiente saturado (TOLÊDO et al., 2003).

Tonoli et al. (2010) estudaram materiais compósitos reforçados com polpas Kraft de sisal e matriz de cimentícia carbonatada, os resultados demostraram incremento significativo na resistência mecânica quando comparados com amostras não carbonatadas. Almeida et al. (2010) em seus estudos constataram que a carbonatação acelerada nas idades iniciais de hidratação, resultou em melhores propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios. De acordo com os autores, a eficiência da carbonatação foi comprovada por ensaios de DRX, identificando diminuição da intensidade dos picos de Portlandita e aumento dos picos de calcita. Essa condição de carbonatação resultou na densificação da matriz cimentícia e melhora na aderência entre fibra e matriz (ALMEIDA et al., 2010).

Com a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO₃) ocorre a modificação da estrutura, tornando-a mais densa. Essa modificação acontece devido ao volume ocupado pelo carbonato de cálcio (CaCO₃) ser 11,8 % maior que o volume ocupado pelo hidróxido de cálcio (Ca(OH²) (BERTOS et al., 2004). Consequentemente, a estrutura carbonatada torna-se menos porosa do que a matriz hidratada, uma vez que os cristais de carbonato de cálcio (CaCO₃) podem unir-se e formar ligações densas (ARANDIGOYEN; ALVAREZ, 2006).

3 OBJETIVOS

Avaliar a viabilidade de uso do bagaço de cana-de-açúcar para produção de painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço e validar o processo de cura por carbonatação acelerada como alternativa para a melhoria das propriedades físico-mecânicas e da interface das partículas de bagaço com a matriz de cimento.

3.1 Objetivos específicos

- Avaliar o potencial de aplicação das partículas de bagaço de cana para produção de painéis de cimento, por meio do ensaio termometria com pasta de cimento;
- Avaliar a eficiência da cura por carbonatação acelerada quando aplicada em painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço;
- Estudar o comportamento físico-mecânico, microestrutural e térmico de painéis cimentobagaço submetidos à cura por carbonatação acelerada;
- Verificar o desempenho físico-mecânico dos painéis de cimento-bagaço após ensaio de envelhecimento acelerado de 200 ciclos de imersão e secagem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Matérias-primas

4.1.1 Bagaço de cana-de-açúcar

Foram utilizadas partículas de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) coletadas no pátio de usinas de açúcar e álcool localizadas na região de Pirassununga, estado de São Paulo. O material *"in natura"* foi acondicionado em saco plástico e posteriormente processado em moinho de facas modelo DPC-1 (marca Cremaso).

As partículas de bagaço de cana-de-açúcar foram classificadas granulometricamente em peneira vibratória da marca Produtest modelo G, que contém 6 peneiras de dimensões de 500 x 500 x 100 mm, com aberturas de 0,3 a 8,0 mm e timer automático eletromecânico ajustável (até 60 min), para a obtenção de partículas com tamanho aproximado de 8mm de comprimento (Figura 7).



Figura 7 - Equipamentos de processamento da matéria prima. a) Moinho de facas b) peneira vibratória

Fonte: Própria autoria.

Após o peneiramento, foi realizado o tratamento das partículas de bagaço de cana-deaçúcar com água a 100°C, de acordo com a metodologia proposta por Sarmiento e Freire (1996). Para realização deste tratamento foi utilizada a relação de 8 1 de água para 250 g de partículas.
Inicialmente a água foi inserida em um caldeirão com capacidade de 32 l e aquecida até 100°C (Figura 8).



Figura 8 – Tratamento de partículas de bagaço de cana. a) bagaço em fervura. b) lavagem água corrente após fervura



Fonte: Própria autoria.

Após o processo de imersão das partículas em água a 100°C, elas foram lavadas com água corrente e inseridas em estufa 60°C, com ventilação forçada por 72 h, até atingir o teor de umidade de \pm 8% (MUSOKOTWANE, 1982).

4.1.2 Cimento Portland

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPV-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - 34 MPa aos 7 dias de idade) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-NBR 5733, 1991). A escolha deste cimento ocorreu pela sua elevada resistência inicial, o que favorece a redução do tempo de manipulação de elementos pré-moldados.

4.1.3 Aditivo químico

O aditivo químico utilizado foi o cloreto de cálcio dihidratado em pó (CaCl₂ 2H₂O), da marca Dinâmica química.

A aplicação deste aditivo teve como objetivo eliminar os efeitos inibitórios dos

componentes químicos das partículas de bagaço e acelerar o processo de cura do cimento.

4.2 Metodologia para produção dos painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar

A metodologia utilizada para efetuar os cálculos dos constituintes do painel de partículas homogêneas cimento-bagaço foi a indicada por Latorraca (2000).

Foram considerados os seguintes parâmetros: comprimento, largura e peso específico do painel; teor de umidade das partículas; taxa de partícula:cimento; taxa de água:cimento e taxa de água de hidratação:cimento. A água de hidratação não é adicionada ao sistema durante a mistura e é utilizada como parâmetro para o cálculo dos constituintes. Inicialmente, foi realizada a separação dos constituintes (partículas de bagaço, teor de cimento, teor de água, aditivo químico e água).

Figura 9 - Processo de produção painéis. a) mistura componentes b) formação colchão c) prensagem d) painel após 24 h



Fonte: Própria autoria.

Em seguida, essas matérias primas foram introduzidas em misturador planetário e homogeneizadas por 5 min., (Figura 9a). Esse procedimento, segundo Valenzuela e Dong (2007) é necessário para obter uma umidificação homogênea das partículas, evitando a aglomeração do material. Após esse processo, a massa é retirada do misturador e inserida aleatoriamente na caixa formadora de painel (Figura 9 b), com as dimensões de (40 cm x 40 cm).

Posteriormente são inseridos os separadores em aço com espessura de 1,5 cm (Figura 9c) para o controle da espessura final do painel. Posteriormente, uma pressão de 5 MPa foi aplicada por 24 h (Figura 9d).

4.3 Procedimentos de cura

Tento em vista que apenas parte do cimento é hidratada após a adição de água faz-se necessário a realização da cura do material. A cura do cimento é um processo lento e envolve um complexo sistema de reações, principalmente no caso de painéis contendo material lignocelulósico.

Devido a importância da água e do ambiente de exposição das partículas, foram realizados dois procedimentos de cura. O primeiro consistiu em manter os painéis em ambiente úmido (cura não carbonatada) e o segundo, na exposição dos painéis em ambiente controlado com aplicação de CO₂ (cura carbonatada).

4.3.1 Cura não carbonatada

A cura não carbonatada aplicada aos painéis de partículas cimento-bagaço consistiu no armazenamento do material em ambiente controlado com controle de temperatura ($60 \pm 2 \, ^{\circ}$ C), umidade relativa ($90 \pm 5\%$) por 48 h (câmara climática ESPEC - modelo EPL4H) seguida de ambiente saturado (23° C) embalados em sacos plásticos ($100 \times 60 \, \text{cm}$) ao ar até os 28 dias de idade.

4.3.2 Cura Carbonatada

O processo de carbonatação foi em câmara climática da marca ESPEC - modelo EPL4H, com controle de temperatura (60 ± 2 °C), umidade relativa ($90 \pm 5\%$) com concentração de CO₂ ($15 \pm 0.6\%$), (ALMEIDA et al., 2013) (Figura 10 a).

A cura por carbonatação acelerada foi iniciada após os painéis terem permanecido durante 48 h em ambiente controlado (temperatura de 60 ± 2 °C e umidade relativa de $90 \pm 5\%$) (Figura 10 b). Seguido de ambiente saturado (23°C) embalados em sacos plásticos (100 x 60 cm) ao ar até os 28 dias de idade.

Figura 10 - Cura Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar. a) câmara de carbonatação b) painéis inseridos na câmara



Fonte: Própria autoria.

4.4 Análise dos procedimentos de cura

4.4.1 Análise visual por fenolftaleína

O efeito dos procedimentos de cura (não carbonatada e carbonatada) nos painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar foi avaliado com solução de fenolftaleína 2%. Para o preparo desta solução foram utilizados 98 g de álcool etílico, da marca Dinâmica e 2 g fenolftaleína, da marca Êxodo científica. Usualmente a solução de fenolftaleína é

empregada para aferição do pH. A solução, quando em contato com compostos altamente alcalinos, apresenta coloração violeta ou rosa e na presença de compostos com pH neutro é incolor e indica a ocorrência de carbonatação (ALMEIDA et al., 2013).

4.4.2 Análise físico-química (TGA e DRX)

A análise físico-química dos procedimentos de cura foi realizada também, por meio de análises de difração de raios-X (DRX) e de termogravimetria (TGA-DTG).

A análise de difração de raios X (DRX) foi utilizada para identificar variações decorrentes dos diferentes processos de cura nas principais fases cristalinas presentes nas amostras dos painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar.

O equipamento utilizado foi o Difratômetro AXS Analytical X-Ray Systems Siemens D5005, operado com 1600 W de potência: 40kVx40mA. Radiação Cu-K alfa, comprimento de onda λ : 1,54056Å, inerente ao tubo de cobre. Ensaio padrão: theta/2theta de 10°/min entre 5 e 65° (MOHR; BIERNACKI; KURTIS, 2006).

A análise termogravimétrica (TGA) consiste em um método que relaciona as variações de massa ocorridas na amostra durante o aquecimento com o tempo ou temperatura. A derivada dessa curva, em relação à temperatura (DTG), permite determinar as temperaturas limites das reações de decomposição para cada produto (TSIVILIS et al., 1998); (HOPPE FILHO, 2008).

A análise foi realizada em balança TG/DSC STA449 F3 Netzch, com atmosfera de gás nitrogênio fluxo 50 ml/min, taxa de aquecimento de 10°C/min, no intervalo de 25 °C a 1000 °C (HOPPE FILHO, 2008).

Para realização destas análises (DRX; TGA; DTG) foram extraídas amostras dos painéis não carbonatados e carbonatados com 28 dias de idade. Foi utilizado álcool isopropílico para cessar o processo de hidratação do cimento; as amostras foram moídas e peneiradas em peneira 150 mesh (Tyler).

4.5 Caraterização dos materiais

4.5.1 Caracterização das partículas de bagaço de cana-de-açúcar

Para a caracterização das partículas de bagaço de cana-de-açúcar foram determinadas propriedades físicas, morfológicas e químicas.

4.5.1.1 Caracterização física

4.5.1.2 Teor de umidade

O teor de umidade das partículas de bagaço de cana-de-açúcar foi determinado após a permanência do material em estufa de circulação de ar forçada, a 60°C por 48 h. Para a realização da análise, foi utilizada uma balança semi-analítica (0,001g) com capacidade de 160 g, da marca BEL seguindo o método por diferença de massa proposto pela EMBRAPA (2010).

4.5.1.3 Caraterização química

As análises químicas foram realizadas no laboratório de química do instituto de pesquisa e desenvolvimento agroalimentar "*Institut de recherche et de développement en agro lenvironnement*" (IRDA) da Universidade de Laval-Canadá. O conteúdo de celulose, hemicelulose e lignina das partículas de bagaço de cana-de-açúcar foram determinados pela metodologia da Associação Francesa de Normatização (AFNOR, 2013). A análise dos extrativos solúveis em água (fria 23°C e quente 100°C) foi realizada seguindo as diretrizes dos documentos normativos ASTM D1110:2007 - Standard test method for water solubility of Wood.

4.6 Caracterização microestrutural das partículas de bagaço de cana-de-açúcar

Para a caracterização microestrutural das partículas de bagaço de cana-de-açúcar foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Esta análise teve como objetivo identificar alterações na superfície das partículas antes e após do processo de lavagem.

As amostras das partículas lavadas e não lavadas foram fixadas em suportes metálicos ("stub") com fita adesiva dupla face de carbono. Em seguida, as partículas foram inseridas em microscópio eletrônico de varredura de baixo vácuo, modelo TM-3000 marca Hitachi acoplado a um sistema de microanálise de raios X, por espectroscopia de energia dispersiva.

Por operar a baixo vácuo, o equipamento permite observar amostras sem a necessidade de recobrimento metálico. Foi utilizada tensão de aceleração de 15 kV e as imagens foram geradas por aquisição de elétrons retroespalhados, em diferentes campos e aumentos (x100, x500, x1000 e x2000).

4.7 Estudo de aptidão cimento-bagaço de cana-de-açúcar

O método utilizado para avaliar a aptidão das partículas de bagaço de cana-de-açúcar com o cimento foi adaptado de Hofstrand; Moslemi; Garcia (1984). Para esta avaliação, foram utilizadas partículas com comprimento máximo de 8 mm. Foi determinado também, o teor de umidade destas partículas para o cálculo da quantidade partícula-água. A aptidão consiste em mensurar a evolução da temperatura da mistura cimento-bagaço durante as primeiras 24 h.

O resultado do monitoramento da temperatura de reação é utilizado como parâmetro para determinar índices de inibição de pega ou endurecimento do cimento-material lignocelulósico. As amostras foram inseridas em um Becker e adicionados 200 g de cimento Portland CP V-ARI/Plus, 15 g de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e 90 ml de água, sendo misturados por 5 min. (Figura 11).

Após a mistura dos constituintes, a massa foi introduzida em um saco plástico (19,7 x 28,6 cm), no qual foi inserido um termopar tipo "J" conectado a um modulo condicionador de sinais analógicos, acoplados a uma placa de conversão modelo Campbell Scientific Data 21X, ligado a um microcomputador (Figura 12a).

As amostras foram inseridas em um Becker e adicionados 200 g de cimento Portland CP V-ARI/Plus, 15 g de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e 90 ml de água, sendo misturados por 5 min. (Figura 11).

Figura 11 - Componentes constituintes do ensaio de termometria: a) Cimento, b) fibras de bagaço, c) água, d) mistura



Fonte: Própria autoria.

Após a mistura dos constituintes, a massa foi introduzida em um saco plástico (19,7 x 28,6 cm), no qual foi inserido um termopar tipo "J" conectado a um modulo condicionador de sinais analógicos, acoplados a uma placa de conversão modelo Campbell Scientific Data 21X, ligado a um microcomputador (Figura 12a). Cada experimento consistiu de três repetições. Os dados de temperatura foram coletados em intervalos de 1 min., durante 24 h. Cada saco plástico com a mistura e o termopar foi amarrado, envolvido em papel alumínio e colocados em frascos Dewar, que foram introduzidos em uma caixa térmica forrada com lã de vidro e o conjunto foi hermeticamente fechado (Figura 12b).

Figura 12 - Sistema de análise por termometria. a) computador com sistema de aquisição de dados. b) sistema hermético e porta amostras



Fonte: Própria autoria.

4.8 Caracterização físico-mecânica dos painéis

4.8.1 Caracterização física

Os ensaios físicos de densidade aparente (DA), absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE) dos corpos de prova extraídos dos painéis de partículas homogêneas cimentobagaço de cana-de-açúcar seguiu as recomendações da norma Deutsches Institut für Normung DIN EN 323 (1993). Para determinar a densidade aparente foram utilizados 10 corpos de prova com dimensões de 50 x 50 mm para cada procedimento de cura. Foram determinadas as dimensões: comprimento, largura e espessura com paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm e, para a determinação da massa foi utilizada balança analítica, com resolução de 0,01 g. O cálculo da densidade foi realizado pela Eq. 3:

$$\varrho = \frac{m}{b1 \times b2 \times t} \times 10^6$$
 Eq. 3

Onde:

- M = Massa do corpo de prova;
- b₁ = Largura do corpo de prova;

- b₂=Comprimento do corpo de prova;
- t = Altura do corpo prova.

Para determinar a absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE) 10 corpos de prova foram preparados com as mesmas dimensões do ensaio de densidade aparente (DA) (50 x 50 mm) para cada procedimento de cura, foram submersos em água por 24 h (Figura 13), a temperatura ambiente.

Posteriormente, os corpos de prova foram retirados da água e o excesso de água foi removido sendo assim, determinadas as dimensões: comprimento, largura e espessura com paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm.



Figura 13 - Corpos de prova ensaio físico

Fonte: Própria autoria.

4.8.2 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica dos painéis de partículas homogêneas de cimento-bagaço de cana-de-açúcar foi realizada na máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 30.000 (Figura 14a). Foram analisados 10 corpos de prova de dimensões 350 x 50 mm para cada procedimento de cura, sendo as dimensões comprimento, largura e espessura, determinadas precisamente com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

O ensaio foi conduzido seguindo a metodologia descrita pela normativa europeia para painéis de madeira Deutsches Institut für Normung DIN EN310 e foi determinado o módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). Os corpos de prova foram posicionados sobre dois apoios da máquina universal de ensaios, com vão de 300 mm (Figura 14b), velocidade de ensaio de 7 mm/min e célula de carga de 5 kN. Os valores de MOR e MOE foram determinados pelas Eq. 4 e 5.

Figura 14 - Modelo de ensaio de flexão estática.a) Máquina universal de ensaio. b) Corpo de prova.



Fonte: Própria autoria.

$$MOR = 1.5 \times \frac{(P \times D)}{B \times (E)^2}$$
 Eq. 4

Onde:

- MOR = módulo de ruptura, em MPa;
- P = carga de ruptura, em N;
- D = distância entre apoios do aparelho, em mm;
- B = largura do CP, em mm;
- E = espessura, em mm.

$$MOE = 1.5 \times \frac{(P_1 \times D^3)}{d \times 4 \times B \times (E)^3}$$
 Eq. 5

Onde:

- MOE = módulo de elasticidade, em MPa;
- *P*1 = carga no limite proporcional, em N;

- D = distância entre apoios do aparelho, em mm;
- d = deflexão, expressa em mm, correspondente à força P;
- B =largura do CP, em mm;
- E = espessura, em mm.

4.9 Caracterização microestrutural painéis

As imagens da microestrutura eletrônica de varredura (MEV) dos painéis de partículas cimento-bagaço foram coletadas seguindo a metodologia prescrita por Kitajima e Leite (1999) no microscópio eletrônico de varredura , da marca Hitachi e modelo Analytical TableTop Microscope TM3000. Este ensaio avaliou a interface entre as partículas de bagaço de cana-de-açúcar com a matriz cimentícia por meio da visualização da densificação da matriz.

4.10 Análise da condutividade térmica dos painéis

O ensaio de condutividade térmica foi realizado seguindo as recomendações da normativa American Society For Testing And Materials ASTM E1530-11 (2014). Para esse ensaio foi utilizado o equipamento Thermal Conductivity Tester DTC-300 marca Discovery que opera com medidores de fluxo de calor e em estado estacionário com fluxo de calor descendente (Figura 15a).



Figura 15 - a) Equipamento condutividade térmica, b) Corpo de prova

Fonte: Própria autoria.

Para a avaliação da condutividade térmica dos painéis de partículas homogêneas cimentobagaço de cana-de-açúcar foram elaborados cinco corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 cm de diâmetro e 1,5 cm de espessura (Figura 15b). Com o objetivo de reduzir a resistência térmica entre a amostra e o equipamento, os corpos de prova foram cobertos na parte superior e inferior com pasta térmica (marca Wakefield Solutions).

4.11 Envelhecimento acelerado: Imersão e secagem

O ensaio de imersão-secagem teve como objetivo estudar o comportamento de degrabilidade dos painéis cimento-bagaço sob o efeito da variação climática do ambiente (temperatura e umidade), incitando o ataque da água alcalina dos poros nas partículas. Foram realizados 200 ciclos de envelhecimento acelerado em estufa automática da marca Marconi, modelo MA 035 (Figura 16), seguindo as recomendações da normativa European Committee for Standardization (1994), com adaptações indicadas por (TONOLI, 2009) e foi realizado em câmara automática de envelhecimento acelerado, marca Marconi, modelo MA 035, com ciclos de imersão completa em água por 170min, no qual ocorria o preenchimento de água nos poros capilares e aquecimento até 70°C +/- 5°C pelo mesmo período de tempo, no qual ocorria a secagem dos poros capilares. Um ciclo completo é representado por um período completo de imersão e secagem. Para evitar o impacto produzido pelo choque térmico entre as etapas de imersão e secagem foi fixado o intervalo de 10min entre as fases.

Figura 16 - Ensaio de envelhecimento acelerado. a) estuda automática b) corpos de prova em ensaio.





Fonte: Própria autoria.

4.12 Análise estatística dos resultados

A análise dos dados foi executada em experimentos dispostos em um delineamento inteiramente casualizado (DIC), onde o fator estudado corresponde a painel com dois níveis (sem carbonatação e carbonatado), totalizando em dois tratamentos. Para todos os experimentos, os fatores foram considerados qualitativos e foi utilizado o Teste de Tukey quando a ANOVA foi significativa, sendo ambos testados a P<0,05. O software utilizado para interpretar os resultados foi o programa SAS versão 2.5.1. (SAS, 2011).

5 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

5.1 Caracterização das partículas bagaço de cana-de-açúcar

5.1.1 Teor de umidade

A Tabela 3 apresenta resultados do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar. O valor aferido pelo determinador automático foi de 7,2%. De acordo com Iwakiri et al. (2012) valores de teor de umidade variando de 0-15% são mais indicados uma vez que contribui com a cura dos painéis de cimento. A umidade do material lignocelósico também está relacionada com as propriedades mecânicas do painel, e consequentemente com interface partícula-matriz. A umidade é responsável pela variação dimensional da partícula que ocasiona o descolamento da matriz de cimento, diminuindo a aderência partícula-matriz e consequentemente, as propriedades mecânicas (EVANS, 2002).

Tabela 3 - Teor de umidade partículas de bagaço de cana-de-açúcar

	Umidade (%)
Determinador automático	7.2

Fonte: Própria autoria.

5.1.3 Composição química do bagaço de cana-de-açúcar

A Tabela 4 apresenta os teores de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos solúveis em água das partículas de bagaço de cana-de-açúcar tratadas utilizadas neste estudo e teores desses

componentes químicos apresentados em trabalhos científicos. Os resultados obtidos nesse estudo são similares aos da literatura. As diferenças existentes tem relação com o local de cultivo, variedades da cana-de-açúcar e metodologia de ensaio (MARTIN et al., 2010). A temperatura de hidratação do cimento (60 °C) é reduzida pela adição de substâncias inibidoras, como os extrativos. Esses são constituídos por açúcares, taninos, gomas, amidos, corantes, gorduras, resinas, entre outros componentes, que podem ser removidos com água fria ou quente, ou solventes orgânicos como, por exemplo, etanol, tolueno, acetona ou diclorometano (IWAKIRI; PRATA, 2008).

Tabela 4 - Composição química partículas de bagaço de cana-de-açúcar Celulose Hemicelulose Lignina **Extrativos (%)** Referência (Água 23°C) (Água 100°C) (%) (%) (%) 44.7 25 Em estudo 24.8 7.1 7.7 8 (MARABEZI, 2009) 50.28 24.27 25,07 _ $(FIORELLI et al., 2014)^*$ 10.74 50.47 30.56 -

Fonte: Própria autoria.

A presença elevada dessas substâncias acarreta a diminuição da temperatura de hidratação do cimento (IWAKIRI; PRATA, 2008). A temperatura monitorada durante a reação de hidratação é utilizada como parâmetro para a determinação do índice de inibição, ou seja, valores inferiores a 60°C durante a reação de hidratação podem acarretar em alto índices de inibição (LATORRACA, 2000).

5.1.4 Caracterização microestrutural partículas bagaço de cana

A análise microestrutural das partículas de bagaço de cana-de-açúcar tratadas e não tratadas permitiu identificar a presença e poros na superfície das partículas (Figura 17).



Figura 17 - Micrografia de superfície da partícula de bagaço de cana.

a) 1.0k. b) 5.0 k

Fonte: Própria autoria.

A característica anatômica contribui com a dispersão da matriz de cimento e consequentemente com a adesão das partículas. Outro fato observado após a lavagem foi a redução dos conteúdos de açúcares residuais e impurezas das partículas tratadas (Figura 17).

O bagaço comumente apresenta certa quantidade de impurezas como terra, fuligem e constituintes indesejáveis como o açúcar residual que produz um efeito inibidor sobre o tempo de pega do cimento (TEIXEIRA, 2010). É possível identificar por meio da Figura (17 a) e (17 c) a presença de resíduos na superfície e nos poros das partículas.

5.2 Estudo de aptidão cimento-bagaço de cana-de-açúcar

O estudo de aptidão do cimento-bagaço de cana-de-açúcar foi realizado para avaliar a compatibilidade das partículas de bagaço com o cimento. Os valores obtidos no ensaio de inibição estão apresentados na Tabela 5.

A mistura ideal deve atingir a temperatura máxima (Tm) em menor tempo (T), com máximo incremento (Sm) (OKINO et al., 2004).

As curvas de hidratação, ao longo do tempo, do composto cimento-água (controle) e dos compósitos com partículas de bagaço de cana-de-açúcar tratadas em água quente (100°C) estão apresentadas na Figura 18. Na evolução das reações de hidratação do cimento, a mistura cimento-água atingiu a temperatura máxima próxima a 85°C em 9 h, enquanto que o compósito cimento-água-bagaço tratado atingiu sua temperatura máxima 56,1°C em 12h.

Tm Índice de inibição Sm **T** (h) (°C) (°C/h) (%) 9 Cimento 85,4 -----3,51 Cimento e bagaço 12 56,10 5,85

Tabela 5 - Valores de tempo, temperatura, taxa de variação máxima e índice de inibição

Fonte: Própria autoria.

De acordo com Yaguang e Kamdem (2002) a diminuição da temperatura máxima (Tm) da pasta de cimento com partículas de bagaço pode ter relação com o volume da mistura, resultando na geração de uma quantidade de calor inferior a necessária para a ocorrência da reação exotérmica do cimento. Vale ressaltar também que, ao serem inseridas na mistura, as partículas de bagaço de cana-de-açúcar podem absorver parte do calor gerado pelo cimento. Tais fenômenos podem explicar a diferença de temperatura entre a amostra controle (cimento puro) e o cimento com adição das partículas de bagaço tratadas.

A composição química do bagaço em estudo (Tabela 4) não interferiu no processo de hidratação do cimento, os valores apresentados em estudo foram indicados como baixa inibição (Tabela 2) (OKINO et al., 2004).

Figura 18 - Curva de hidratação do cimento



Fonte: Própria autoria.

Ferraz et al. (2011) avaliaram por meio da termometria a compatibilidade das fibras de coco tratadas em água quente (80°C) com o cimento e os resultados obtidos para a temperatura máxima de hidratação foram de 34,15°C, o tempo para atingir a máxima temperatura foi de17 h, resultando em índice de inibição de 14%.

Bilcati (2015) avaliou fibras de curauá tratadas com água quente a 60 °C por 6 h para aplicação em painéis de cimento. O resultado para a temperatura máxima apresentado foi de 22,27 °C em tempo de 17 h, representando índice de inibição de 7,88%.

Os resultados deste estudo mostram que a temperatura de hidratação da mistura cimentobagaço de cana-de-açúcar foi inferior a amostra controle (cimento) (Tabela 5). No entanto, a temperatura máxima de hidratação da amostra cimento-bagaço de cana-de-açúcar foi próxima a 60°C, similar ao estabelecido na literatura (IWAKIRI et al., 2012). O índice de inibição obtido foi de 5.85 %, valor esse inferior aos obtidos por Okino et al.(2004), Ferraz et al. (2011) e Bilcati (2015).

5.3 Avaliação dos painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço

5.3.1 Avaliação visual do procedimento de cura

A análise visual dos painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar não carbonatados testados com solução de fenolftaleína 2% apresentaram coloração violeta (Figura. 19a). Santiago (2013) afirma que a maior intensidade da coloração do material, após a análise por fenolftaleína, refere-se a um pH da matriz variando de 10 a 12, devido a presença de Portlandita (CH) dissolvida no meio aquoso.

Figura 19 - Avaliação visual do procedimento de cura.a) painel não carbonatado, b) painel cabonatado



Fonte: Própria autoria.

Os painéis carbonatados não apresentaram coloração violeta quando em contato com a solução de fenolftaleína (Figura 19b), demonstrando que o processo de carbonatação neutralizou o meio alcalino da matriz de cimento. Isto ocorreu, pois, a reação do CO_2 com o hidróxido de cálcio dissolvido na solução resultou na formação do carbonato de cálcio (CaCO₃).

Do ponto de vista da degradação das partículas lignocelulósicas, essa alteração química pode resultar na melhora da durabilidade das partículas, pois segundo Almeida et al. (2013) o meio alcalino da matriz cimentícia degrada a fibra, e ocasiona perda das propriedades mecânicas ao longo do tempo.

5.3.2 Avaliação por TG e DRX dos procedimentos de cura

Na Figura 20 estão apresentadas as curvas de termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG) dos painéis não carbonatados e carbonatados com idade de cura de 28 dias.

Na curva DTG são observados quatro picos principais. No primeiro pico (1) entre 105 a 200 °C identifica-se a ocorrência de desidratação do silicato de cálcio hidratado (CSH) (ROSTAMI et al., 2012a) e a decomposição da etringita (TAYLOR, 1998).

Figura 20 - Curvas TG e DTG de painéis cimento bagaço carbonatados e não carbonatados



Fonte: Própria autoria.

O segundo pico (2) entre 200 e 380°C, representa a decomposição térmica da celulose, hemicelulose das partículas de bagaço de cana-de-açúcar e de outros compostos hidratados (silicatos e aluminatos) (SEYE, 2003).

No terceiro pico (3) entre 400 e 500°C ocorre a desidroxilação da Portlandita (Portlandita) (ALMEIDA et al., 2013) (Eq.6). O quarto pico (4) entre 650 e 800°C está relacionado com a descarbonatação de carbonato de cálcio, como mostrado na Eq. (7).

$$Ca (OH)_{2 (s)} \rightarrow CaO_{(s)} + H_2O_{(g)}$$
 Eq. 6

O teor de Portlandita e carbonatado de cálcio dos painéis foram calculados pelas taxas de perda de massa (Figura 20, Picos 3 e 4) obtidas das curvas de TG, utilizando a metodologia proposta por Borges et al. (2010). O teor de Portlandita pode ser estimado pelo desprendimento da água adsorvida da transformação da Portlandita em óxido de cálcio e o teor de carbonato de cálcio pode ser estimado através do desprendimento do gás carbônico da transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio. A porcentagem de Portlandita identificada nas amostras carbonatadas e não carbonatadas foi de 11,61% e 11,66%, respectivamente. Apesar da Portlandita ser consumida durante a realização do processo de carbonatação ela continua a ser produzida pelo processo natural da hidratação do cimento (Eq. 7) (ALMEIDA et al., 2013).

Vale destacar que o processo de carbonatação empregado neste trabalho foi iniciada no terceiro dia, o que pode otimizar o processo de cura e favorecer a solidificação e densificação do painel em um período de menor de tempo Eq. (8).

$$C_3S \text{ ou } C_2S + H_2O \rightarrow CSH + CH$$
 Eq. 8

A porcentagem de carbonato de cálcio (CaCO₃) também foi obtida pelo cálculo estequiométrico. O painel carbonatado apresentou 25,5% de CaCO₃, enquanto que o painel sem carbonatação apresentou apenas 15,16%, ou seja, o painel carbonatado apresentou 10,37% a mais de CaCO₃ na matriz como resultado da reação do processo de carbonatação.

Na Figura 21 estão apresentados os difratogramas das amostras de cimento dos painéis não carbonatados e carbonatados aos 28 dias.

Pode-se identificar, para ambos os painéis, a presença de Portlandita. Sendo que, nas amostras dos painéis carbonatados houve o aparecimento de picos de carbonatos e o não aparecimento de picos de Portlandita quando comparado à amostra não carbonatada. Esses resultados indicam a adsorção do CO_2 pela matriz cimentícia, fato observado também por Almeida et al. (2010) e Tonoli et al. (2009).



Figura 21 - Difração de raio-X (DRX) amostras carbonatadas e não carbonatadas

Fonte: Própria autoria.

Pelos resultados obtidos por meio das técnicas com solução de fenolftaleína, TG e DRX é possível afirmar que o processo de carbonatação ocorreu no pico referente ao ângulo 29° e que a Portlandita (Ca(OH)₂) foi transformado principalmente em carbonato de cálcio (CaCO₃), reduzindo assim o pH da matriz e tornando-a menos agressiva para as partículas de bagaço de cana e densificando a matriz de cimento (FERNÁNDEZ BERTOS et al., 2004).

5.3.3 Propriedades físicas dos painéis

Os resultados apresentados para as propriedades físicas indicam que os valores de absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE) para os painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar carbonatados foi estatisticamente inferior quando comparado aos valores observados para os painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar não carbonatado (Tabela 6).

A diferença nas propriedades físicas dos painéis cimento-bagaço não carbonatados e carbonatados pode ser explicada pela densificação da matriz de cimento do painel carbonatado

devido a formação do carbonato de cálcio (CaCO₃) durante o processo de hidratação da matriz, que é um produto mais estável que a Portlandita (BERTOS et al., 2004).

Procedimento de	AA 24 h	IE 24 h	DA
Cura	(%)	(%)	(kg/m ³)
Não carbonatado	$16,\!22\pm3.29^{\mathrm{a}}$	$0,82\pm0,49^{\mathrm{a}}$	1130 ± 90^{a}
Carbonatado	$10,\!17\pm4,\!90^{\mathrm{b}}$	$0,\!28\pm0,\!25^{\mathrm{b}}$	$1314 \pm 123^{\text{b}}$

Tabela 6 - Valores médios de propriedades físicas de painéis de partículas cimento bagaço

Médias com mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey com p<0,05.

Fonte: Própria autoria.

Uma das razões para a ocorrência de densificação da matriz dos painéis curados por carbonatação acelerada é o aumento no volume de sólido do compósito, ou seja, cada molécula de hidróxido de cálcio (gravidade específica 2,24 g/mol, vol molar 33 ml) foi convertida em carbonato de cálcio (densidade 2,71 g/ml, vol molar 36,9ml) devido essa troca houve o aumento de 11,8% em volume de sólidos o que resultou em um material mais denso e menos poroso (JOHANNESSON; UTGENANNT, 2001).

O resultado para a densidade dos painéis não carbonatados e carbonatados estão compatíveis com a densidade dos painéis comerciais, superior a 1100 kg/m³ (BISON, 1978).

Observa-se uma diferença estatística significativa (p<0,05) entre os valores de AA e IE 24h referente aos painéis não carbonatados e carbonatados, comprovando que a cura por carbonatação acelerada contribuiu com a redução dessas propriedades.

Os painéis cimento-bagaço carbonatados apresentaram valores médios de AA 24 h de 10,17 %, sendo inferior aos obtidos para painéis cimento-*Corimbia citriodora* (15,69%) (LATORRACA, 2000); cimento-*Pinus taeda* (14,05%) (IWAKIRI et al., 2008) e cimento-Curauá (15,38%) (BILCATI, 2015).

Os painéis cimento-bagaço não carbonatados apresentaram resultados médios para AA 24 h de 16%, sendo inferior aos resultados obtidos nos estudos de painel cimento-*Eucalytus urophylla* (16,21%) (LATORRACA, 2000); cimento-*Cecropia hololeuca* (20,86%) (IWAKIRI et al., 2012) e cimento-fibra de coco (26,70%) (FERRAZ et al., 2011).

Os valores médios de IE dos painéis não carbonatados foi de 0,82%, e dos painéis carbonatados 0,28%, inferiores aos obtidos nos estudos de Iwakiri et al. (2012) (*Cecropia hololeuca* 0,92% e *Schizolobium amazonicum* 1,38%); Ferraz et al. (2011) (fibra de coco 1,60%) e Bilcati (2015) (fibra de Curauá 1,68%).

Os resultados para IE após 24 h de imersão em água de painéis cimento-madeira comerciais variam de 1 a 1,8 % (BISON, 1978), superior aos obtidos nesse estudo.

5.3.4 Propriedades mecânicas

A Figura 22 apresenta curvas típicas de tensão x deformação específica de painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar submetidos ao processo de cura carbonatada e não carbonatada.





Fonte: Própria autoria.

Matánia nuima da nainal	MOR	MOE	Deferêncie
Materia prima do pamer	(MPa)	(MPa)	Kelerencia
Bagaço não carbonatado	3,99ª	1635 ^a	Em estudo
Bagaço carbonatado	7,13 ^b	3681 ^b	Em Estudo
Schizolobium amazonicum	6,48	2571	(IWAKIRI et al., 2012)
Eucalyptus grandis	6,47	3330	(IWAKIRI; PRATA, 2008)
Hevea brasiliensis	6,60	5188	(AZAMBUJA et al., 2014)
Eucalyptus urophylla	3,56	1699	(LILGE; HASELEIN, 2014)
Eucalyptus citriodora,	3,52	1839	(LATORRACA, 2000)
Eucalyptus pellita	4,98	2792	(LATORRACA, 2000)
Eucalyptus robusta	4,58	2604	(LATORRACA, 2000)
Fibra de coco	1,84	634	(FERRAZ et al., 2011)
Casca de coco	3,80	1818	(ROCHA ALMEIDA; et al., 2002)
Bambusa vulgaris	5,00	9111	(ONUORAH; NNABUIFE;
			NWABANNE, 2014)

Tabela 7 - Resultados médios de propriedades mecânicas de painéis experimentais e da literatura

Fonte: Própria autoria.

De acordo com Okino et al. (2004) o processo industrial Bison-wood cement board (1978) estabelece que painéis com faixas de densidade entre 1300-1400 kg/m³ devem atender aos requisitos mínimos para as propriedades mecânicas, sendo 9000 MPa para o MOR e 3000 MPa para o MOE.

Porém, em estudos realizados por Latorraca (2000) foram obtidos valores médios de MOE igual 1800 MPa para painéis cimento-*Eucalyptus citriodora*.

Ferraz et al. (2011) obtiveram valores médios de MOE de painéis cimento-fibras de coco variando de 634 a 1783 MPa. Iwakiri; Prata (2008) produziram painéis cimento-madeira *Eucalyptus grandis* e obtiveram valores médios de MOE igual a 3330 MPa.

Os valores médios de MOE dos painéis cimento-bagaço curados por carbonatação acelerada foram superiores aos recomendados pelo processo industrial (BISON, 1978).

5.3.5 Análise microestrutural dos painéis

A Figura 23 apresenta imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostras polidas de painéis não carbonatados e carbonatados.



Figura 23 - Imagens de MEV de painéis cimento-bagaço. a) sem carbonatação. b) carbonatados



Na superfície do corpo de prova sem carbonatação (Figura 23a) são observadas a presença de poros e baixa aderência entre a fibra e a matriz, o que resulta no escorregamento das partículas (TOLÊDO FILHO et al., 2003) e explica os baixos valores de MOR e MOE (Figura 22). Para os corpos de prova carbonatados (Figura 23b), observa-se a matriz cimentícia mais densa e compacta, uma modificação positiva na zona de transição, favorecendo a aderência da fibra na matriz, explicando assim as variações obtidas nas propriedades físico-mecânicas de painéis cimento-bagaço carbonatados e não carbonatados.

De acordo com Bertos et al. (2004) a principal reação no processo de carbonatação acelerada corresponde ao consumo da Portlandita (Ca(OH)₂) pelo dióxido de carbono, formando carbonato de cálcio (Figura 6).

5.3.6 Análise do comportamento térmico dos painéis

A Tabela 8 apresenta os valores médios experimentais da condutividade térmica de painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar não carbonatados e carbonatos.

Matéria prima do painel	Condutividade térmica (W/mK)
Não carbonatado	0.25 ª
Carbonatado	0.29 ^b

Tabela 8 - Condutividade térmica dos painéis

Fonte: Própria autoria.

A condutividade térmica é uma característica física que define a capacidade de o material permitir ou dificultar a passagem do fluxo de calor através dele. Assim, valores mais baixos desta propriedade favorecem ao conforto térmico dentro do ambiente (CASTRO, 2012). Pode-se observar que os valores obtidos para os painéis não carbonatados foram inferiores quando comparados aos painéis carbonatados.

Tal fato pode ser explicado pela maior densificação da matriz carbonatada, maior densidade do compósito (Tabela 6) e menor quantidade de poros (Figura 23a) que são preenchidos com ar, considerado um meio de baixa condução de calor (XU et al., 2004).

Os valores obtidos para os painéis não carbonatados permitem classificar o material em estudo como isolante, uma vez que os valores obtidos são inferiores a 0,25 W/mK, enquadrandoos como isolantes térmicos (ZHOU et al., 2010). Khedari et al. (2001) avaliaram painéis de cimento-fibra de coco com densidade 1297 kg/m³ e obtiveram resultados médios de condutividade térmica igual a 0.59 W/mK, significativamente superior aos obtidos nesse estudo.

6. ENVELHECIMENTO ACELERADO

Este item apresenta resultados de propriedades físico-mecânicas de painéis cimentobagaço não carbonatados e carbonatados submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado de 200 ciclos de imersão e secagem.

6.1 Caracterização física painéis envelhecidos - 200 ciclos

A tabela 9 apresenta as propriedades físicas dos painéis cimento-bagaço carbonatados e não carbonatados submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado.

Procedimento de Cura	AA 24 h (%)	IE 24 h (%)	DA (kg/m ³)
Não carbonatado	$35,81 \pm 3,36^{a}$	$5,52 \pm 0,49^{a}$	1419 ± 100^{a}
Carbonatado	$26,10\pm15,90^{b}$	$1,47,\pm 0,20^{\rm b}$	1742 ± 271^{b}

Tabela 9 - Propriedades físicas painéis após 200 ciclos de imersão e secagem

Médias com mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey (p<0,05). Fonte: Própria autoria.

As propriedades de AA, IE e DA entre os painéis carbonatados e não carbonatados apresentaram diferença estatística significativa (p<0,05) após 200 ciclos de imersão e secagem. Os resultados inferiores de AA e IE 24 h para os painéis carbonatados podem ser atribuídos ao preenchimento dos vazios da matriz e da interface fibra-matriz por produtos da hidratação da matriz cimentícia, que são os responsáveis pela diminuição da porosidade do compósito (TONOLI, 2009) e consequentemente refletiu na densidade.

A Figura 24 apresenta a seção transversal de corpos de prova após ensaio de 200 ciclos de imersão e secagem. Nessas figuras é possível observar a deterioração dos painéis não carbonatados (Figura 24b) provocado pela dissolução/reprecipitação das fases cimentícias do compósito (TONOLI, 2009). Os painéis carbonatados (Figura 24a) sofreram menor degradação, fato que refletiu nas propriedades físicas e mecânicas.

A hipótese que pode explicar a redução das propriedades físicas (AA, IE) e o aumento da DA dos painéis são os ciclos iniciais de envelhecimento, pois de acordo com Mohr; Biernacki; Kurtis (2006), durante a realização dos primeiros ciclos de imersão e secagem, ou seja antes da inicialização da reprecipitação dos produtos hidratados, as partículas estão livres em grande parte do compósito para absorver e repelir água.

Figura 24 - Corpos de prova após ensaio de envelhecido acelerado - 200 ciclos. a) não carbonatado b) carbonatado



Fonte: Própria autoria

A variação diametral (entre 40-60%) das partículas pode criar uma pressão que expulsa a água com produtos hidratados do capilar do poro, no entanto esse processo realizado repetidamente acaba minimizando essa pressão e resulta no acúmulo e migração dos produtos hidratados para o interior do lúmen das partículas lignocelulósicas, resultando no decréscimo das propriedades físico-mecânicas.

6.2 Caracterização mecânica painéis envelhecidos - 200 ciclos

A tabela 10 apresenta as propriedades mecânicas (MOR e MOE) dos painéis de cimentobagaço carbonatados e não carbonatados aferidas após ensaio de envelhecimento acelerado de 200 ciclos de imersão e secagem. Os resultados indicam uma redução significativa nas propriedades mecânicas, quando comparadas com os painéis não envelhecidos. Nota-se também, que os painéis carbonatados apresentam valores de MOR e MOE estatisticamente superiores aos painéis não carbonatados.

A redução das propriedades mecânicas tem relação com o escorregamento das partículas na matriz devido a deterioração da interface partícula-matriz (ALMEIDA et al., 2013).

Tabela 10 - Propriedades mecânicas painéis 200 ciclos

Procedimento de Cura	MOR (MPa)	MOE (MPa)
Não carbonatado	$0,21 \pm 0,09^{a}$	215 ± 35^{a}
Carbonatado	$1,80\pm0,83^{\mathrm{b}}$	1046 ± 356^{b}

Médias com mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey com p<0,05.

Fonte: Própria autoria.

6.3 Análise microestrutural painéis envelhecidos 200 ciclos

A Figura 25 apresenta imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostras polidas de painéis não carbonatados e carbonatados após 200 ciclos de imersão e secagem.

Pela Figura 25a nota-se uma elevada presença de poros e baixa aderência entre a fibra e a matriz, comprovando na hipótese apresentada por Mohr; Biernacki; Kurtis (2006) em que a variação dimensional das partículas resultante do processo de reprecipitação do cimento, ocasionou o descolamento das partículas da matriz.

De acordo com Rostami et al. (2012) a cura por carbonatação acelerada cria uma microestrutura mais sólida em comparação com a cura saturada. Esse fato pode ser comprovado para painéis cimento-bagaço por meio das micrografias (Figura 25b).



Figura 25 - Micrografias painéis envelhecidos. a) não carbonatado b) carbonatado

Fonte: Própria autoria.

A reprecipitação do carbonatado de cálcio (CaCO₃) atua como aglutinante na diminuição dos poros e bloqueando a absorção de água (HYVERT et al., 2010). Entretanto é possível notar fissuras e a mineralização das partículas (MOHR; BIERNACKI; KURTIS, 2006). Porém mesmo com a apresentação de fissuras e mineralização das partículas os painéis cimento-bagaço submetidos a cura por carbonatação acelerada mostraram-se superiores para as propriedades

físicas (AA, IE e DA) e mecânicas (MOR e MOE) comprovando a efetividade desta cura nas primeiras idades para painéis com matriz de cimento.

7. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados neste estudo podem ser emitidas as seguintes conclusões:

- Partículas de bagaço de cana-de-açúcar apresentam potencial para aplicação na produção de painéis de cimento-bagaço uma vez que o índice de inibição aferido para esse material foi inferior a 10 %;
- 2- Nos painéis carbonatados foi observada redução da alcalinidade e densificação da matriz de cimento provocada pela formação de carbonato de cálcio (CaCO₃);
- 3- A cura por carbonatação acelerada dos painéis cimento-bagaço em fases iniciais de hidratação (após 2 dias de cura controlada) proporcionou um incremento nas propriedades físico-mecânicas do compósito quando comparados com painéis não carbonatados, indicando a eficiência desse processo de cura;
- 4- O ensaio de envelhecimento acelerado de 200 ciclos de imersão e secagem comprovou a efetividade da carbonatação acelerada na preservação das propriedades físico-mecânicas dos painéis.

BIBLIOGRAFIA

AFNOR. Norme française homologue, aliments des animaux. Détermination des constituants pariétaux. Méthode par traitement aux détergents neutre et acide et à l'acide sulfurique. **AFNOR**, Paris, v. 18, p. 18–122, 2013.

AGGARWAL, L. K. Bagasse-reinforced cement composites. Cement and Concrete Composites, Kidlington, v. 17, n. 2, p. 107–112, 1995.

AGOPYAN, V. et al. Developments on vegetable fibre-cement based materials in S??o Paulo, Brazil: An overview. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 27, n. 5, p. 527–536, 2005.

ALMEIDA, A. E. F. D. 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, 2010.

ALMEIDA, A. E. F. S. et al. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 42, p. 49–58, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM E1530-11** - Evaluating the resistance to thermal transmission of materials by the guarded heat flow meter technique. West Conshohocken: ASTM, 2011

ARANDIGOYEN, M.; ALVAREZ, J. I. Carbonation process in lime pastes with different water/binder ratio. **Materiales de Construccion**, Madrid, v. 56, p. 5–18, 2006.

ARO, M. Wood strand cement board. 11th INTERNATIONAL INORGANIC-BONDED FIBER COMPOSITES CONFERENCE, 11., 2008, Madrid. **Proceedings...** Madrid, 2008. p. 169-179.

ASHORI, A.; TABARSA, T.; SEPAHVAND, S. Cement-bonded composite boards made from poplar strands. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 26, n. 1, p. 131–134, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Básico sobre cimento**. Disponível em:<http://www.abcp.com.br>. Acesso em: 16 jan. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 5733-** Cimento Portland com alta resistencia inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

AZAMBUJA, R. R. et al. Performance of two types of cement in production of cement bonded wood panels combined with rice hull. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 4, p. 715–724, 2014.

BARRA, B. N. Funcionalização de fibras vegetais com plasma frio de metano para desenvolvimento de novos produtos em fibrocimento. 2014. 90 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2014.

BATTISTELLE, R. A. G.; MARCILIO, C.; LAHR, F. A. R. Emprego do bagaço da cana-deaçúcar (*Saccharum officinarum*) e das folhas caulinares do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na produção de chapas de partículas. **Minerva**, São Carlos, v. 5, n. 3, p. 297–305, 2009.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. London: Taylor & Francis, 2007. 625 p.

BERALDO, A. L. Durabilidade de compósitos biomassa vegetal-cimento modificado por polímeros. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 344-353, 2006.

BERALDO, A. L.; CARVALHO, J. V. Compósito Eucalyptus grandis - cimento Portland.

Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 65, p. 150–161, 2004.

BHUIYAN, M. T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 46, p. 431–436, 2000.

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

BILCATI;, G. K. Produção de painéis de cimento portland reforçados com fibra de Curauá (Ananas erectifolius). 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BISON WOOD-CEMENT BOARD. Bison Report., 1978. 10

BOERJAN, W.; RALPH, J.; BAUCHER, M. Lignin biosynthesis. Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, v. 54, p. 519–546, 2003.

BORGES, P. H. R. et al. Carbonation of CH and C–S–H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 40, n. 2, p. 284–292, 2010.

BULLARD, J. W. et al. Mechanisms of cement hydration. Cement and Concrete Research, Kidlington, v. 41, n. 12, p. 1208-1223, 2011.

CABRAL, M. R. et al. Study of the potential use of the sugarcane bagasse in cement-panels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE SCIENCE AND TECHNOLOGY, 10., 2015, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa, 2015. abst. ID-161 CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

CAO, Y. et al. Compatibilization of immiscible polymer blends using graphene oxide sheets. **ACS Nano**, Washington, v. 5, n. 7, p. 5920-5927, 2011.

CASTRO, A. C. Avaliação da eficiência térmica de materiais utilizados como sistemas de cobertura em instalações avícolas. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Univerisidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. A geração termoelétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil: análise do desempenho da safra 2009-2010. Brasília: CONAB, 2011. 160 p.

_____. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: décimo segundo levantamentosetembro/2013. Brasília: CONAB, 2015.

CORREIA, V. C. et al. Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber– cement materials. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 72, p. 65–71, 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN EN 322. 1993. Holzwerkstoffe - Bestimmung Des Feuchtegehaltes; Deutsche Fassung

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN EN 323. 1993. "Holzwerkstoffe -Bestimmung Der Rohdichte Deutsche Fassung

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN EN 310. 1993. Holzwerkstoffe - Bestimmung Des Biege-Elastizitätsmoduls Und Der Biegefestigkeit; Deutsche Fassung EN 310.

EBRINGEROVÁ, A.; HROMADKOVA, Z.; HEINZE, T. Hemicellulose. In: HEINZE, T. (Eds.). Advances in polymer science. Heidelberg: Springer, 2005. v. 186, p. 1-67.
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Procedimentos para análise lignocelulósica**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010a. 54 p

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN. 494. Fibre-cement profiled sheets and fittings for roofing – products specification and test methods. London, 1994.

EVANS, P, ed., 2002, ACIAR **Proceedings** No.107 Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region, Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.

FAN, M. et al. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 36, p. 135–140, 2012.

FARIA, E. F. DE. Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através Janeiro, de modelo termo-químico e modelo de dados. 2004. 130 f. Tese (Doutorado) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

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

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin: Walter de Gruyter, 1984.

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, 2004.

FERRAZ, J. M. et al. Effects of treatment of coir fiber and cement/fiber ratio on properties of cement-bonded composites. **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 3, p. 3481–3492, 2011.

FIORELLI, J. et al. Physico-chemical and anatomical characterization of residual lignocellulosic fibers. **Cellulose**, Dordrecht, v. 21, n. 5, p. 3269–3277, 2014.

FRYBORT, S. et al. Cement bonded composites - a mechanical review. **BioResources**, Raleigh, v. 3, p. 602–626, 2008.

GIACOMINI, N. P. **Compósitos reforçados com fibras naturais para a indústria automobilística**. 2003. 163 f. Escola de Engenharia de São Carlos -Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

GUPTA, A. Polymer chemistry. Meerut, 2010.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A.; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**,Heidelberg, v. 24, n. 4, p. 345–354, 1990.

HERAKOVICH C.T., "Mechanics of Fibrous Composites" New York: John Wiley & Sons, Inc. 1998. pp. 7.

HEWLETT, P. C.; MASSAZZA, F. Lea's chemistry of cement and concretelea's chemistry ofcementandconcrete,2003.Disponívelem:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750662567500229>.Acesso em: 19 dez.2015.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of wood particle from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57–61, 1984.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada:** mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. 2008. 296 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HYVERT, N. et al. Dependency of C-S-H carbonation rate on CO2 pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 40, n. 11, p. 1582–1589, 2010.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-ureia-formaldeido. **Revista Cerne**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 323–328, 2005.

IWAKIRI, S. et al. Utilização de madeiras de Eucalyptus grandis e Eucalyptus dunnii para produção de painéis de partículas orientadas - OSB. **Ciencia Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 265–270, 2008.

IWAKIRI, S. et al. avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* "paricá" e cecropia hololeuca "embaúba" para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 303–308, 2012a.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação das propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduos de serrarias de nove espécies de madeiras tropicais da Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 1, p. 59–64, 2012b.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de Eucalyptus dunnii na produção de painéis de cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68–74, 2008.

JOHANNESSON, B.; UTGENANNT, P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 31, n. 6, p. 925–931, 2001.

JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. Holz Als Roh-und Werkstoff, Heidelberg, v. 62, n. 5, p. 370–377, 2004.

KALIA, S. et al. Cellulose-based bio- and nanocomposites: a review. **International Journal of Polymer Science**, New York, v. 2011, p. 1–35, 2011.

KARADE, S. R. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 24, n. 8, p. 1323–1330, 2010.

KHEDARI, J. et al. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 23, n. 1, p. 65–70, 2001.

KITAJIMA, E. W.; LEITE, B. **Curso introdutório de microscopia eletrônica de varredura**. Piracicaba: Núcleo de Apoio à Pesq. em Microscopia Eletrônica, ESALQ/USP, 1999.

KLEMM, P.; VEJBORG, R. M.; SHERLOCK, O. Self-associating autotransporters, SAATs: functional and structural similarities. **International Journal of Medical Microbiology**, Muechen, v. 296, p. 187–195, 2006.

KOZLOWSKI, R. et al. Enzymes in bast fibrous plant processing. **Biotechnology Letters**, Dordrecht, v. 28, p. 761–765, 2006.

LATORRACA, J. V. F. Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira. 2013.191 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, 2013.

LEE, C. Y.; LEE, G. B. Humidity sensors: a review. **Sensor Letters**, Valencia, v. 3, n. 1-1, p. 1–15, 2005.

LIMA, T. G. Variação nos sentidos radial e longitudinal de algumas propriedades das madeiras de *Eucalyptus microcorus* F. MUELL e *Eucalyptus pilulares* SM. 1996. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

LIU, L. et al. Development of a CO2 solidification method for recycling autoclaved lightweight concrete waste. **Journal of Materials Science Letters**, Norwell, v. 20, n. 19, p. 1791–1794, 2001.

LIU, Q. et al. Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Amsterdam, v. 82, n. 1, p. 170–177, 2008.

LOPES, Y. L. V. et al. Avaliação do potencial técnico da madeira e cascas de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira. **Scientia Forestalis,** Piracicaba, n. 67, p. 111–122, 2005.

MANO, E. B. Polímeros como materiais de engenharia. Sao Paulo: Edgar Bluc ed., 1991.

MARABEZI, K. Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de- açúcar. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

MARIANO, M. Obtenção, caracterização e aplicação de nanocristais de celulose obtidos a partir do sisal. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013

MARTIN, A. R. et al. Studies on the thermal properties of sisal fiber and its constituents. **Thermochimica Acta**, v. 506, n. 1-2, p. 14–19, 2010.

MATOSKI, **A. Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 2005. 187 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. Composite materials: science and engineering. Boca Raton: CRC Press, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. Sao Paulo: Ibracon, 2008.

MOHR, B. J.; BIERNACKI, J. J.; KURTIS, K. E. Microstructural and chemical effects of wet/dry cycling on pulp fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 36, n. 7, p. 1240–1251, 2006.

MOSLEMI, A. A. Emerging technologies in mineral-bonded wood and fiber composites. Advanced Performance Materials, Lancs, v. 6, n. 2, p. 161–179, 1999.

MOSLEMI, A. A.; PFISTER, S. C. The Influence of cement wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science**, Monona, v. 19, n. 2, p. 165–175, 1987.

MOUGEL, E.; BERALDO, A. L.; ZOULLIAN, A. Compósito madeira-cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRICOLA, 1994. Campinas. Anais... Campinas, 1994

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

OKINO, E. et al. Chapa aglomerada de cimento-madeira de Hevea brasiliensis Müll. Arg. **Revista Árvore,** Viçosa, v. 28, n. 3, p. 451–457, 2004a.

OKINO, E. Y. et al. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 26, n. 6, p. 729–734, 2004b.

ONUORAH, E. O.; NNABUIFE, E. C.; NWABANNE, J. T. Potentials of *Bambusa vulgaris* grown in Southeast Nigeria for the manufacture of wood-cement composite panels. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering,** Irveni, v. 2, n. 5, p. 363–373, Sept. 2014.

PETER, M. A. et al. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 38, n. 12, p. 1385–1393, 2008.

PIMENTEL, L. L.; BERALDO, A. L.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Durabilidade de compósito biomassa vegetal-cimento modificado por polímero. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 344-353, 2006.

QUARCIONI, V. A. Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland: estudo em pasta. 2008. 172 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RAMIREZ-FUENTES, E. et al. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 85, n. 2, p. 179–187, 2002.

RASHWAN, M. S.; HATZINIKOLAS, M.; ZMAVC, R. Development of a lightweight, low-cost concrete block using wood residue. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 42, n. 5, p. 57–64, 1992.

ROCHA ALMEIDA, R.; HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI, C.; ETERNO TEIXEIRA, D. Utilization of the coconut shell of babaçu (Orbignya sp.) to produce cement-bonded particleboard. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 85, n. 2, p. 159–163, 2002.

RODRIGUES, M. S. Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias. 2012. 152 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ROSTAMI, V. et al. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. **Cement** and **Concrete Research**, Kidlington, v. 42, n. 1, p. 186–193, 2012a.

ROSTAMI, V. et al. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. **Cement** and **Concrete Research**, Kidlington, v. 42, n. 1, p. 186–193, 2012b.

SANTIAGO, L. F. F. Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e elementos construtivos inovadores, 2013.

SARMIENTO, C. R. Argamassa de cimento reforcada com fibras de bagaco de cana-de-

acucar e sua utiuzacao como material de construção. 1996. 104 f. Dissertação (Mestrado) -Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

SAS. **SAS/STAT 9.3 user's guideuser's guide.** Cary, NC: SAS Institute Inc., 2011. Disponível em:. Acesso em: 15 dez. 2015.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: source, production, morphology, properties and applications. **Composites Part A:** Applied Science and Manufacturing, Kidlington, v. 38, n. 7, p. 1694–1709, 2007.

SAVASTANO JR., H.; DANTAS, F. A. S.; AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras: correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas. Sao Paulo: IPT/Pini, 1994.

SEYE, O. Análise de ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético capim elefante (Pennisetum Purpureum Schaum). 2003. 167 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SILVA, G. C. et al. Efeito de aditivos minerais sobre as propriedades de chapas cimento-madeira. **Revista Arvore**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 451–456, 2006.

SOUZA, M. R. DE; GEIMER, R. L.; MOSLEMI, A. A. Degradation of conventional and Co 2 - injected cement-bonded particleboard by exposure to fungi and termites. **Journal of Tropical Forest Products**, Malaysia, v. 3, n. 1, p. 63–69, 1997.

SOUZA, M. R. Durability of cementbonded particleboard made conventionally and carbon dioxide injection. Idaho: University of Idaho, 1994.

TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry. London: Academic, 1998.

TEIXEIRA, R. S. et al. Extruded cement based composites reinforced with sugar cane bagasse fibres. **Key Engineering Materials**, Pfaffikon, v. 517, p. 450–457, 2012.

THAKUR, V. K.; THAKUR, M. K. P, V. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. **Carbohydrate Polymers,** Kidlington, v. 109, p. 102–117, 2014.

THOMAS, S. et al. Natural fibres: structure, properties and applications. In: KALIA, S.; KAITH, B. S.; KAUR, I. (Ed.). **Cellulose fibers:** bio- and nano-polymer composites: green chemistry and technology. Berlin: Springer, 2011. p. 3–42.

TOLÊDO ROMILDO, F. R. et al. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 25, n. 2, p. 185–196, 2003.

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

TONOLI, G. H. D. Fibras curtas de eucalipto para novas tecnologias em fibrocimento. 2009.
128 f. Tese (Doutorado) - Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

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, 2010.

TSIVILIS, S. et al. A study on the hydration of portland limestone cement by means of TG. **Journal of Thermal Analysis**, Budapest, v. 52, p. 863–870, 1998.

UNICA - União da Indústria de Cana de açúcar. Conquistas do setor sucroenergético na

matriz energética brasileira. Disponível em: http://www.unica.com.br/faq/, acesso em 10 jan. de 2016.

VALENZUELA, F. A. O.; DONG, T. L.; PANDOLFELLI, V. C. Avaliação reológica de concretos refratários para projeção a úmido em aplicações siderúrgicas. **Cerâmica**, São Paulo, v. 53, p. 270–278, 2007.

VAN ELTEN, G. J. Production of wood wool cement board and wood strand cement board (Eltoboard) on one plant and applications of the products. In: INTERNATIONAL INORGANIC-BONDED FIBER COMPOSITES CONFERENCE, 10., 2006, São Paulo. Abstracts... São Paulo, 2006. p. 1–12.

VAN GINNEKEN, L. et al. Effect of liquid and supercritical carbon dioxide treatments on the leaching performance of a cement-stabilised waste form. **The Journal of Supercritical Fluids**, Amsterdam, v. 30, n. 2, p. 175–188, 2004.

VANHOLME, R. et al. Lignin biosynthesis and structure. **Plant Physiology**, Rockville, v. 153, n. 3, p. 895–905, 2010.

VANOLI SCATOLINO, M. et al. Pesquisas desenvolvidas na UEPAM da UFLA: utilização de residuos variados na produção de painéis particulados. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 12., 2010, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2010.

VIROC. Características viroc. Disponível em:<http://www.viroc.pt>. Acesso em: 20 nov. 2015.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. Chemistry of wood strength. In: ROWELL, R. M. (Ed.). Handbook of wood chemistry and wood composites. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. cap. 11, p. 415-455.

WOLFE, R. W.; GJINOLLI, A. Durability and Strength of cement- bonded wood particle composites made from construction waste. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 49, n. 2, p. 24–31, 1999.

XU, F. Structure, ultrastructure, and chemical composition. New York: Elsevier, 2010.

XU, J. et al. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 50, n. 1, p. 62–67, 2004.

XU, J. et al. Development of binderless fiberboard from kenaf core. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 52, n. 3, p. 236–243, 2006.

YAGUANG, Z.; KAMDEM, D. P. Effect of cement/wood ratio on the properties of cementbonded particleboard using cca-treated wood removed from service. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 52, n. 3, p. 77, 2002.

YOUNGQUIST, J. A. The marriage of wood and nonwood materials. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 45, n. 10, p. 25–30, 1995.

ZUCCO, L. L. Estudo da viabilidade da fabricação de placas de compostos à base de de, cimento e casca de arroz. 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Campinas, Campinas, 1999.