

EXPEDITO BARACHO JUNIOR

**USO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS NA CONFECÇÃO
DE COMPÓSITOS DE CIMENTO E AREIA PARA FINS
CONSTRUTIVOS NÃO ESTRUTURAIIS**

RECIFE
Pernambuco - Brasil
Abril - 2016

EXPEDITO BARACHO JUNIOR

USO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS NA CONFECÇÃO
DE COMPÓSITOS DE CIMENTO E AREIA PARA FINS
CONSTRUTIVOS NÃO ESTRUTURAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais, Área de Concentração: Silvicultura.

Orientador

Prof. Dr. Luiz Carlos Marangon

Coorientador

Prof. Dr. Daniel Alberto Alvarez Lazo

RECIFE
Pernambuco - Brasil
Abril - 2016

Ficha catalográfica

B223u Baracho Junior, Expedito

Uso de resíduos lignocelulósicos na confecção de compósitos de cimento e areia para fins construtivos não estruturais / Expedito Baracho Junior. – Recife, 2016.
78 f. : il.

Orientador: Luiz Carlos Marangon.
Tese (Doutorado em Ciências Florestais) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento
de Ciência Florestal, Recife, 2016.
Referências.

1. Compósito cimento-lignocelulósico 2. Traços
adotados 3. Testes de Compatibilidade 4. Ensaios
destrutivos e não destrutivos I. Marangon, Luiz Carlos,
orientador II. Título

CDD 634.9

EXPEDITO BARACHO JUNIOR

**USO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS NA CONFECÇÃO
DE COMPÓSITOS DE CIMENTO E AREIA PARA FINS
CONSTRUTIVOS NÃO ESTRUTURAIS**

APROVADA em 29.02.2016

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Nogueira
Departamento de Ciência Florestal - UFRPE

Prof. Dr. Rafael Leite Braz
Departamento de Ciência Florestal - UFRPE

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim
Departamento de Engenharia Agrícola - UFRPE

Prof. Dr. Gabriel Paes Marangon
Centro de Ciências Agrárias - UFAL

Orientador

Prof. Dr. Luiz Carlos Marangon
Departamento de Ciência Florestal - UFRPE

Recife - Pernambuco
Abril - 2016

*Às emoções de
Luiza, Lucas e Thiago*

AGRADECIMENTOS

A Luiza, Lucas e Thiago pelo incentivo, apoio, carinho, compreensão, alegrias e amor recíprocos.

Aos meus pais, Expedito e Doralice, irmãos Elanir, Edja e José, pelo acompanhamento, questionamentos e estímulos.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Marangon pela orientação, ensinamentos, paciência, tranquilidade, parcimônia e dedicação.

Ao Prof. Dr. Daniel Alvarez, Universidad Pinar Del Rio - Cuba, pela orientação, ensinamentos, amizade, atenção, empenho e dedicação.

Aos Doutores, amigos, Williams de Souza, Marcos Passos e Marangon pela colaboração, cobranças, incentivo e insistência desde tempos remotos.

Ao incentivo e torcida dos Professores Ana Lícia, José Aleixo, Aderaldo Alexandrino, Francisco Carvalho e Juárez Gomes,

Ao Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos do DEAGRI pelo apoio, em particular, ao Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim.

Ao Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal de Pernambuco.

Ao Laboratório de Ciência da madeira da UFES e a generosidade do Prof. Dr. Juarez Benigno Paes.

Ao laboratório de Química Vegetal do DQ, em particular, a dedicação e disposição da discente Laís Albina da Silva.

Ao Laboratório de Manejo e Conservação do Solo do DEPA, pelas análises.

Aos membros da Banca Examinadora pelas análises, recomendações e contribuições na apreciação do trabalho de tese.

Ao Eng. Florestal German Hugo Gutiérrez-Céspedes, do Grupo Industrial João Santos, pelo apoio.

Ao Eng. Florestal José Carlos de Oliveira, da Serraria Manassu, pelo apoio.

Aos colegas da Pós, pela preocupação, admiração e descobertas, em especial aos Eng. Florestais Rubeni Cunha, Wedson Batista e José Edson.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais pela oportunidade e confiança depositada nessa trajetória, em especial a Prof^ª. Dra. Ana Lícia Patriota Feliciano.

BARACHO JUNIOR, EXPEDITO. Uso de resíduos lignocelulósicos na confecção de compósitos de cimento e areia para fins construtivos não estruturais. 2016. Orientador: Luiz Carlos Marangon. Coorientador: Daniel Alberto Alvarez Lazo.

RESUMO

Esse trabalho resulta da utilização de resíduos lignocelulósicos, cimento Portland CP IV - 32, areia lavada e água na confecção de compósitos destinados a fornecer subsídios que viabilizem a produção de elementos para construção popular de baixo custo. Os objetivos dessa pesquisa referem-se aos usos de métodos e procedimentos de baixa exigência tecnológica, de acordo com a realidade da região metropolitana do Recife, que incrementem a utilização dos resíduos lignocelulósicos de modo a permitir a eficiência e qualidade na utilização da biomassa florestal disponível. Fragmentos nas dimensões originais – sem granulometria selecionada ou padronizada – de Bambu (*Bambusa vulgaris* var. *vulgaris*), Maçaranduba (*Manilkara* spp) e madeira mista previamente tratados com imersão em água e posteriormente em solução aquosa de NaOH a 2% foram adensados manualmente em moldes cilíndricos de aço 5 x 10 cm com cimento, areia lavada e água, constituindo compósitos, sendo avaliados tecnologicamente e possibilitando a obtenção de um produto com resistência adequada. A avaliação dos teores de extrativos totais dos resíduos sem tratamento e previamente tratados de maçaranduba apresentou 5,85 % para as partículas sem tratamento, 3,31% para as imersas em água quente e 11,22% para as tratadas com 2% NaOH. Formulações preliminares foram realizadas de forma a auxiliar na tomada de decisão do traço adotado. O traço empregado foi 1:0,05:3:0,4, respectivamente cimento, lignocelulósico, areia lavada e água. O grau de compatibilidade entre o cimento e os resíduos lignocelulósicos, determinado pelo índice de compatibilidade obtido através da temperatura máxima de hidratação, foi classificado como bom para o Bambu e regular para a Maçaranduba. A resistência à compressão simples mostrou-se adequada como ferramenta de decisão para determinar a compatibilidade dos compósitos cimento-lignocelulósicos. Determinada com o ultrassom, o compósito cimento-bambu apresentou velocidade do pulso ultrassônico de 1820 m/s, comprovando sua adequada compatibilidade com o cimento. Os compósitos cimento-lignocelulósicos apresentaram resistências médias a compressão simples de 10,28 MPa (Bambu), 9,95 MPa (Maçaranduba) e 7,40 MPa (madeira mista). Os módulos de elasticidade dinâmicos médios foram da ordem de 8870 MPa para o Bambu, de 8330 MPa para a Maçaranduba e de 7140 MPa para madeira mista. A densidade média apresentada por esses compósitos, em g/cm³, foi de 1,88 para o Bambu, de 1,85 para a Maçaranduba e de 1,85 para madeira mista. Com base nesses resultados, esses materiais lenhosos previamente tratados podem ser utilizados na associação com o cimento e serem destinados ao emprego não-estrutural, isolamentos acústico e térmico.

Palavras-chave: Compósito cimento-lignocelulósico. Traços adotados. Testes de compatibilidade. Ensaio destrutivo e não destrutivo.

BARACHO JUNIOR, EXPEDITO. Use of lignocellulosic wastes in the confection of cement-sand composite for non-structural construction purposes. 2016. Adviser: Luiz Carlos Marangon. Co-adviser: Daniel Alberto Alvarez Lazo.

ABSTRACT

This work results from the use of lignocellulosic residues, Portland cement CP IV - 32, washed sand and water in the production of composites intended to provide subsidies that enable the production of elements of popular low-cost construction. The objectives of this study relate to the use of methods and low technology requirement procedures, according to the reality of the metropolitan area of Recife, which boost the use of lignocellulosic wastes to enable efficiency and quality in the use of available forest biomass. Fragments of the original dimensions – not selected or standardized granulometry – Bamboo (*Bambusa vulgaris* var *vulgaris*), Maçaranduba (*Manilkara* spp) and mixed wood previously treated with soaking in water and subsequently in an aqueous solution of 2% NaOH was manually compacted into molds cylindrical steel 5 x 10 cm with cement, washed sand and water, forming composites, this being technologically and allowing to obtain a product of adequate strength. The evaluation of total content of extract residues of untreated and pretreated Maçaranduba showed 5.85% for the untreated particles, 3.31% for the immersed in hot water and 11.22% for those treated with 2% NaOH. Preliminary formulations were undertaken in order to assist in making the decision adopted trait. The employee trace was 1:0.05:3:0.4, respectively cement, lignocellulosic, washed sand and water. The degree of compatibility between cement and lignocellulosic residues, determined by the obtained compatibility index by maximum hydration temperature was classified as good for Bamboo and regular for Maçaranduba. The compression strength was adequate as a decision tool to determine the compatibility of the composite cement-lignocellulosic. Found with ultrasound, the composite cement bamboo presented ultrasonic pulse velocity 1820 m/s, proving its appropriate compatibility with cement. Composite cement lignocellulosic had average resistances to simple compression of 10.28 MPa (Bamboo), 9.95 MPa (Maçaranduba) and 7.40 MPa (mixed wood). The average dynamic modulus of elasticity were the order of 8870 MPa for Bamboo, of 8330 MPa for Maçaranduba and 7140 MPa for mixed wood. The average density shown by these composites in g/cm³, was 1.88 for Bamboo, 1.85 to 1.85 for Maçaranduba and mixed wood. Based on these results, those previously treated woody material can be used in combination with cement and are intended for non-structural use, acoustic and thermal insulation.

Keywords: Composite cement lignocellulosic. Traces adopted. Compatibility tests. Destructive and non-destructive testing.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	08
2 REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	11
2.1.1 Lignocelulósicos	11
2.1.2 Cimento	19
2.1.3 Água	24
2.1.4 Areia	26
2.1.5 Aditivos químicos	27
2.2 INCOMPATIBILIDADE DOS LIGNOCELULÓSICOS COM O CIMENTO....	30
2.3 PROCEDIMENTOS PARA REDUZIR, INIBIR, REMOVER, NEUTRALI- ZAR OU ANULAR A INCOMPATIBILIDADE.....	36
2.4 MÉTODOS PARA AVALIAR A COMPATIBILIDADE CIMENTO-LIGNO- CELULÓSICOS.....	42
2.5 TRAÇOS FORMULADOS DAS MISTURAS CIMENTO-LIGNOCELULÓSI- COS.....	44
3 MATERIAL E MÉTODOS	46
3.1 MATERIAIS DE ESTUDO.....	46
3.2 PREPARO DOS MATERIAIS.....	47
3.3 GRANULOMETRIA DAS PARTÍCULAS LIGNOCELULÓSICOS E AREIA.	47
3.4 DETERMINAÇÃO DOS TEORES DE EXTRATIVOS DOS RESÍDUOS DE MAÇARANDUBA.....	48
3.5 TRAÇOS PRELIMINARES.....	49
3.6 TESTES DE COMPATIBILIDADE.....	50
3.6.1 Temperatura máxima de hidratação	50
3.6.2 Ensaio não destrutivo e destrutivo	51
3.7 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS.....	54
3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS.....	56
4.2 TEORES DE EXTRATIVOS DE MAÇARANDUBA.....	57
4.3 COMPATIBILIDADE DO CIMENTO COM RESÍDUOS DE BAMBU E MA- ÇARANDUBA.....	59
4.3.1 Temperatura máxima de hidratação	59
4.3.2 Ensaio não destrutivo	61
4.3.3 Ensaio destrutivo	62
4.4 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS.....	63
5 CONCLUSÕES	67
6 REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos cimento-madeira, utilizados comercialmente desde o início do século passado, são confeccionados principalmente com fibras ou partículas de madeira de toras verdes. Utilizados principalmente em interiores, fornecem boa aparência, resistência ao fogo e isolamento/absorção do som. O cimento também adiciona defesa contra xilófagos.

A partir dos resíduos gerados nos processos de transformação mecânica dos lignocelulósicos, desenvolveram-se indicadores aceitáveis que possibilitam a fabricação de blocos de cimento-lignocelulósicos que possam ser utilizados na construção de moradias populares.

De uma maneira geral, a quase totalidade das pesquisas consultadas com cimento-madeira, com ou sem o uso de areia – a maioria – utilizam resíduos de coníferas conhecidas, os disponíveis no mercado local ou então promissoras, seguidas em menor grau de folhosas das regiões subtropicais, particularmente na Ásia e Oceania e, finalmente, o bambu, objeto de vários trabalhos. Na grande maioria dos casos as características tecnológicas das madeiras empregadas nos compósitos são conhecidas. Porém, essas propriedades não são as determinantes na decisão do uso com o cimento. Entre os fatores que determinam o uso da madeira na elaboração de blocos ou painéis a base de cimento estão a disponibilidade e viabilidade do material lignocelulósico, a proposta alternativa da possibilidade de um novo uso da madeira, a utilização de resíduos (pó, serragem, maravalhas, cavacos, entre outros) gerados ou descartados pela industrialização da madeira e, também – incluindo todos os fatores mencionados anteriormente – a aptidão com o cimento, que é determinada pelas características químicas da madeira.

Fan et al. (2012) afirmam que os compósitos cimento-madeira possuem muitas vantagens em relação a outros materiais convencionais de madeira, tais como melhor isolamento e desempenho ao fogo, melhor resistência a imersão em água, propriedades bactericidas e rigidez. Comparado ao concreto, o compósito reduz o custo, reutiliza resíduos de madeira e melhora o desempenho térmico dos painéis convencionais de concreto, preservando suas qualidades mecânicas. Possui ainda, ampla disseminação de usos em coberturas, estruturas pré-fabricadas, móveis, formas, revestimentos, barreiras acústicas e pavimentação.

Segundo Wolfe e Gjinolli (1996), o desenvolvimento e utilização de compósitos de cimento-madeira atestam a sua atração como material de construção. Além da resistência ao fogo, esses materiais podem ser usados em climas quentes e úmidos, sujeitos a incidência de cupins e fungos. O cimento proporciona uma superfície durável facilmente gravada e pintada em cor atraente, com acabamento de baixa manutenção. Os autores recomendam que os compósitos possam ser fabricados para apresentar propriedades únicas de dissipação de energia, vantajosas em áreas sujeitas a abalos sísmicos e ou ação de ventos fortes. Concluem ser essa resistência ao impacto uma vantagem ao adicionar fibras e ou partículas de madeira ao compósito, constituindo a tenacidade o mais relevante atributo desse material. Além de proporcionar maior valor agregado aos resíduos de madeira, a matriz de cimento aumenta a estabilidade dimensional do painel em comparação com a madeira maciça (WOLFE e GJINOLLI, 1999). Esses autores, entretanto, alertam que esses compósitos não são um substituto direto dos materiais estruturais convencionais de engenharia, pois sua habilidade reside na capacidade de adsorver energia.

Os painéis cimento-madeira possuem boa aceitação mundial, por reunirem as propriedades desejáveis da madeira e as do cimento (MATOSKI e IWAKARI, 2007). São usados principalmente em paredes interiores e forros, reunindo características desejáveis de aparência, resistência ao fogo e atenuação acústica (WOLFE e GJINOLLI, 1999).

Entre os exemplos de valor agregado encontram-se os produtos aglomerados com ligantes inorgânicos que foram definidos por Beraldo e Balzamo (2009), como uma família de produtos para construção que combinam partículas e fibras de madeira com materiais inorgânicos como o cimento e o gesso. Estes materiais incluem painéis para fachadas, paredes laterais, pisos, telhas e tijolos para edifícios.

Descartados tempos atrás, os resíduos provenientes do processamento de madeiras nas serrarias da Região Metropolitana do Recife atualmente são objetos de uma atividade econômica crescente, notadamente para fins energéticos. A grande maioria desses estabelecimentos é de pequenas dimensões, com produção limitada de resíduos.

A produção dos compósitos com cimento pode abrir uma nova atividade para o uso dos resíduos lenhosos gerados e agregar economicamente o produto final, possibilitando a sua execução em habitações de baixo custo.

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar compósitos produzidos com cimento Portland CP IV-32, areia lavada e resíduos lignocelulósicos, utilizando baixa exigência tecnológica, como subsídio a confecção de elementos não estruturais destinados à construção popular.

A partir desta compreensão, foram implementadas atividades específicas que favoreceram a obtenção dos parâmetros necessários ao completo desenvolvimento da pesquisa, tais como:

- Avaliar os teores de extrativos dos resíduos lignocelulósicos.
- Determinar o grau de compatibilidade dos resíduos lignocelulósicos com o cimento.
- Avaliar a granulometria dos resíduos lignocelulósicos.
- Analisar a influência dos pré-tratamentos nos resíduos lignocelulósicos para incrementar sua compatibilidade com o cimento.
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimento-lignocelulósicos-areia-água.
- Avaliar a utilização de métodos não destrutivos na determinação das propriedades dos compósitos cimento-lignocelulósicos-areia.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

2.1.1 Lignocelulósicos

Para melhor compreensão do assunto, algumas informações da composição química dos materiais lenhosos foram obtidas de Taylor et al. (2002), Pereira et al. (2003), Taylor et al. (2007), Yang e Jaakkola (2011), Baracho Jr (2012), Rowell et al. (2013), Adams (2015) e estão resumidas a seguir.

A madeira é constituída por celulose, hemiceluloses e lignina e por uma quantidade menor de extrativos, açúcares e inorgânicos. Os componentes estruturais da parede celular são:

Celulose - é o mais abundante composto orgânico da natureza e principal constituinte estrutural da parede celular. É um polissacarídeo que se apresenta como um polímero composto de cadeias lineares de unidades de glucose unidas covalentemente, muito estável quimicamente e extremamente insolúvel.

Lignina – é o mais abundante antioxidante da natureza. Formada a partir da glucose através de intrincados trajetos químicos. Extremamente complexa e estável, é constituída por unidades de fenilpropano. É um polímero tridimensional, aromático, isotrópico, amorfo, hidrofóbico e termoplástico. A lignina das coníferas, folhosas e monocotiledôneas diferem quimicamente entre si.

Hemiceluloses – grupo de polissacarídeos ramificados, amorfos, muito hidrofílicos, altamente hidratados que compreende vários compostos de diferentes composições químicas e estrutura molecular. São solúveis em álcalis e facilmente hidrolisáveis em ácidos. Algumas são solúveis em água. As mais importantes hemiceluloses são as xilanas (predominantes nas folhosas) e glucomanas (predominantes nas coníferas).

Extrativos – embora não façam parte estrutural da parede celular, é um grupo de grande diversidade de químicos que pode ser separado em quatro categorias. A de compostos aromáticos (fenóis taninos, flavonoides, lignanas), a de compostos alifáticos (hidrocarbonetos, álcoois, graxas), a de terpenos (mono, di, tri, sesqui e politerpenos) e a de açúcares (D-glucose, D-frutose, sucrose, raffinose, D-xylose, L-arabinose, L-rhamnose e D-manose). Localizam-se em sua maioria no cerne,

sendo responsáveis pela cor, odor e durabilidade da madeira. Os extrativos também podem ser encontrados no alburno, quando estão envolvidos na síntese da parede celular, ou ocorre uma micro distribuição dentro da madeira mais importante do a presença no cerne.

Os extrativos do alburno diferem dos extrativos do cerne. Os do alburno incluem açúcares, amido e lipídeos, que servem como energia de reserva; os do cerne, tais como fenóis e terpenos, atuam como um sistema de defesa passivo contra os xilófagos. Os extrativos compõem um grupo de compostos que podem ser classificados em voláteis em vapor d' água, solúveis em água e solúveis em solventes orgânicos. Os extrativos diferem entre as espécies e também na quantidade e distribuição dentro da própria árvore. São componentes químicos importantes pelos efeitos negativos que provocam na produção de compósitos cimento-madeira. Encontram-se em pequenas quantidades na madeira, até 10%.

Embora mínima, entre 0,2 e 0,5%, a presença de açúcares também são importantes na compatibilidade do cimento com os lignocelulósicos.

A madeira é constituída por duas camadas, o alburno e o cerne. O alburno é a porção externa, funcional do xilema, geralmente clara; possui células vivas e mortas e tem como função principal a condução ascendente de água ou seiva bruta; também armazena água e substâncias de reserva tais como amido, açúcares, óleos e proteínas. O cerne é a camada interna e mais antiga do lenho, desprovida de células vivas e materiais de reserva. Em algumas espécies difere do alburno pela cor mais escura, baixa permeabilidade e ou aumento da durabilidade natural. Desempenha a função de suporte da árvore, incluindo mecanismo de defesa contra os xilófagos, proveniente do acúmulo de extrativos.

Para Pfeil e Pfeil (2009), a propriedade relevante da madeira para a engenharia, comparada com outros materiais de construção (aço e concreto), está na relação entre a densidade da madeira e as suas características de resistência quanto à compressão paralela às fibras e a tração paralela às fibras, conforme a Tabela 1, adaptada de Parchen (2012).

A tabela 1 demonstra a relação da resistência do aço à tração em relação à sua densidade, e a do concreto à compressão, comparando à resistência das madeiras de reflorestamento à tração e à compressão paralelas às fibras. A relação entre a resistência média das madeiras de reflorestamento à tração paralela às fibras e sua densidade é quatro vezes maior se comparada com a mesma relação

para a resistência média à tração do aço. Igualmente ocorre com o concreto à compressão, aos 28 dias, em relação à resistência à compressão paralela às fibras das madeiras; essa relação é quatro vezes e meia maior se comparada com a relação para o concreto de cimento Portland.

Tabela 1. Valores médios de densidade aparente, resistências de madeira de coníferas de reflorestamento para umidade de 12%, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997).

Espécie	ρ	f_c	f_t	f_c/ρ	f_t/ρ
<i>Pinus caribea</i>	0,579	34,5	64,8	59,5855	111,91710
<i>P. bahamensis</i>	0,537	32,6	52,7	60,7076	98,13780
<i>P. elliotti</i>	0,560	40,4	66,0	72,1429	117,85714
<i>P. hondurensis</i>	0,535	42,3	50,3	79,0654	94,01869
<i>P. ocarpa</i>	0,538	43,6	60,9	81,0409	113,19703
<i>P. taeda</i>	0,645	44,4	82,8	68,8372	128,37209
Média da relação resistência/densidade das madeiras				72,3588	110,58331
Aço	7,85*		250,0**		
Relação resistência/densidade do aço					31,84713
Concreto	2,50*	40,0***			
Relação resistência-densidade do concreto				16,00	

ρ = densidade aparente a 12% de umidade em g/cm³
 * = densidade em g/cm³
 f_c = resistência média característica à compressão paralelas às fibras (MPa)
 f_t = resistência média característica à tração paralelas às fibras (MPa)
 ** = resistência média característica à tração (MPa)
 *** = resistência média característica à compressão (MPa)

Adaptado de Parchen (2012).

Normalmente madeiras proveniente de coníferas são as mais utilizadas na confecção dos painéis por apresentarem propriedades, principalmente químicas, que as tornam mais compatíveis com o cimento, não inibindo a pega e o endurecimento do mesmo (SILVA et al., 2005). O que é corroborado por Latorraca (2000) em que as madeiras mais utilizadas na fabricação deste tipo de compósito são as de coníferas.

Os primeiros trabalhos no Brasil utilizando fibras com matriz cimentícia ocorreram em 1980, na Bahia, utilizando fibras vegetais tais como sisal, coco, piaçava, cana-de-açúcar e bambu (DANTAS FILHO, 2004).

Beraldo e Carvalho (2004) concordam que a idade da árvore influencia no desenvolvimento de compósitos cimento-madeira. Material proveniente de árvores jovens apresenta grande instabilidade dimensional e maior porção de alburno em

relação ao cerne, influenciando significativamente o comportamento físico-mecânico do compósito, devido à diferença no teor de extrativos nessas duas regiões da madeira. Árvores mais antigas podem ser mais adequadas para a produção de compósitos. Observou-se tendência de que a região da base do tronco possui material mais adequado. Uma possível explicação para esse fato reside nas diferenças proporcionais entre o cerne e o alburno nas três regiões da árvore (base, centro e topo), e as respectivas diferenças nos teores de extrativos.

No trabalho de Frybort et al. (2008), o uso do cerne apresentou efeitos negativos na hidratação do cimento. Ao examinarem diferentes espécies de folhosas e coníferas, observou-se uma tendência de uma melhor hidratação com o uso de alburno de coníferas em comparação com o cerne, ocorrendo uma tendência inversa com as folhosas. Em geral coníferas são mais compatíveis com o cimento do que folhosas, embora haja exceções.

De fato, o cerne é mais severamente inibidor da hidratação do cimento do que o alburno, conforme relatado por Na et al. (2014). De acordo com Cabangon et al. (2000), o cerne ao possuir maior solubilidade que o alburno, libera maior quantidade de substâncias inibidoras da pega do cimento.

No trabalho de Silva et al. (2005), a densidade básica do *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake de $0,44 \text{ g/cm}^3$ influenciou na quantidade de partículas empregadas na formação do painel cimento-madeira, pois relaciona-se diretamente com seu peso, resultando na adequada compactação do compósito na prensagem do painel. Alertam os autores que esta característica não é observada para madeiras com densidade mais elevada, pois resultam em baixo grau de compactação e, conseqüentemente, geram painéis de baixa qualidade. Destacam ainda que a densidade apresenta alta influência na resistência de compósitos cimento-madeira. Entretanto, para Shmulsky e Jones (2011), a densidade da madeira não é um fator crítico, exceto quando afeta as máquinas na trituração das partículas.

Conforme Frybort et al. (2008), o tamanho e geometria das partículas afetam as propriedades dos compostos cimento-madeira. Madeira considerada incompatível com partículas finas pode ser compatível com partículas grossas. Quanto maiores e delgadas as partículas e filamentos (“strands”), com alto índice de esbeltez, mais resistentes, rígidos e dimensionalmente estáveis os painéis. O uso de partículas longas – ao contrário de pequenos flocos aglomerados – produz painéis de alta resistência. O uso de partículas pequenas torna a estrutura mais compacta,

reduzindo irregularidades e espaços vazios. Melhor compactação resulta em efeitos negativos na pega do cimento, provocada pelo maior volume da área superficial de madeira; ou seja, como existe uma relação entre superfície e volume de partículas, essa área maior da superfície necessita de mais aglutinante (cimento) para o desenvolvimento de uma união interna equivalente. Painéis cimento-madeira produzidos com filamentos delgados tendem a valores mais elevados de módulo de elasticidade do que aqueles feitos com filamentos mais grossos.

A densidade, absorção de água e porosidade dos compósitos são propriedades físicas inter-relacionadas. Savastano Jr et al. (2000), concluíram que uma maior quantidade de partículas aumenta a absorção de água e diminui a densidade. De acordo com Frybort et al. (2008), a condutividade térmica reduz quando a quantidade de partículas de madeira aumenta e a densidade diminui. Esta redução da condutividade está relacionada com o aumento da porosidade promovida pela madeira. Dependendo das características desejadas dos compósitos, a proporção cimento-madeira é ajustada. Os destinados ao isolamento térmico apresentam elevada porosidade, o que é alcançado pela baixa proporção cimento-madeira; por outro lado, alta proporção origina maior densidade, o que eleva as propriedades de isolamento acústico.

Entre as propriedades analisadas nos compósitos cimento-madeira estão o inchamento em espessura e a absorção de água. Como a madeira é higroscópica (assim como os demais lignocelulósicos) torna-se importante conhecer suas propriedades físicas como umidade, movimentação higroscópica (contração e inchamento) e a densidade, relacionando uma possível influência dessas características com os dados obtidos dos compósitos. Entre os trabalhos consultados, apenas um analisa esse fato. Os demais avaliam o compósito concluído, não considerando a influência ou contribuição individual das características físicas e mecânicas dos componentes no produto final.

Quiroga e Rintoul (2015) entendem os compósitos como materiais resultantes da combinação de dois ou mais constituintes essenciais, não miscíveis, que apresentam propriedades físicas e químicas e ou natureza estrutural ou geométrica diferentes, ou seja, cada um mantém sua identidade no composto (STOKKE et al. 2014). Podem apresentar propriedades superiores aos dos seus componentes originais. No entanto, o número de possíveis combinações dos constituintes, as relações entre eles, meios de ligação, interações na interface, forma e orientação

relativa, entre outras variáveis, tornam-se um verdadeiro desafio prever e projetar as propriedades de um compósito, mesmo conhecendo as propriedades de seus constituintes.

Embora as partículas de madeira não possuam uniformidade e dimensões, podem ser usadas com o cimento para a fabricação de painéis de construção. Além de fornecer valor agregado aos resíduos de madeira, a matriz de cimento melhora a estabilidade dimensional em comparação com a madeira maciça. Disponível na maioria dos países a um custo de processamento relativamente baixo, pode ser facilmente reduzida a uma matéria-prima relativamente inerte (WOLFE e GJINOLLI, 1999).

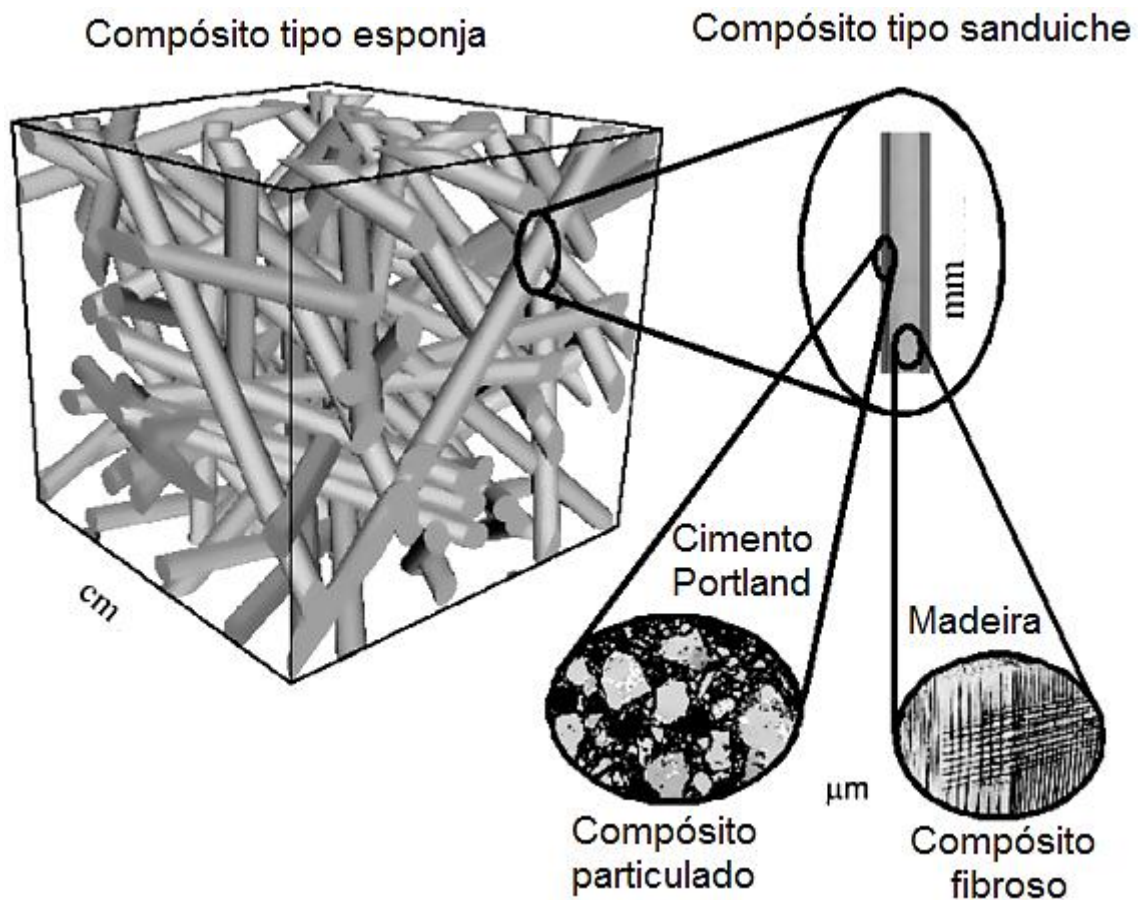
Para Frybort et al. (2012), apesar do fato dos componentes químicos serem nocivos ao cimento, a madeira, entretanto, desenvolve uma adesão com o mesmo. Diversas teorias explicam os mecanismos da ligação dos lignocelulósicos e o cimento. A maioria dos trabalhos admite que a integração mecânica desempenha papel principal, porém, mecanismos de ligação física também possuem sua importância; então, a ligação é uma combinação de forças físicas convencionais, notadamente, integração mecânica.

Quiroga e Rintoul (2015) ilustram o compósito cimento-madeira como um material celular estruturado hierarquicamente em três diferentes níveis, como pode ser observado na Figura 1.

Na figura 1 os autores consideram o material como esponjoso na escala de centímetros, formando uma estrutura celular aberta; em sanduíche ao nível de milímetros, qualificado como laminado; e, finalmente, em particulados e fibrosos de cimento e madeira na escala micrométrica. Avaliam esse modelo hierárquico como uma contribuição a dedução e validação experimental, com um conjunto de expressões matemáticas para a rigidez e resistência de um material celular de estrutura aberta.

Os painéis cimento-madeira prestam-se aos modernos métodos de construção nos países desenvolvidos e aos sistemas habitacionais de baixo custo nos países em desenvolvimento devido ao (1) custo relativamente baixo, uma vez que a madeira procede de rejeitos ou são inadequadas para serrarias ou a madeira e o cimento estão prontamente disponíveis, (2) o baixo investimento na produção e tecnologia simples, (3) o manuseio mais fácil devido ao baixo peso dos painéis e (4) nenhum composto orgânico volátil é liberado (FAN et al., 2012).

Figura 1. Modelo de compósito madeira-cimento a diferentes níveis hierárquicos. *Adaptado de Quiroga e Rintoul (2015).*



Beraldo e Carvalho (2004) consideram as propriedades dos compósitos fortemente dependentes da origem da matéria-prima lenhosa que o constitui, e podem apresentar características interessantes tais como disponibilidade de matéria-prima renovável, resistência aos agentes deterioradores, facilidade de moldagem, transporte, corte, ligações, resistência a impactos, isolamento termo-acústico e alta resistência à ação da umidade, tornando-o apropriado para aplicações nas construções em regiões tropicais e subtropicais (EVANS, 2000).

De acordo com Jorge et al. (2004), as propriedades dos compósitos cimento-madeira são influenciadas pelas características dos fragmentos de madeira (espécie, tamanho, geometria, composição química), tipo de cimento, relação cimento-madeira-água, temperatura ambiente e tempo de cura. Todo esse conjunto de variáveis e suas interações torna extremamente difícil a previsão das propriedades dos compósitos, como também a elaboração de um processo padrão de fabricação comum a todos os tipos de madeira.

Quiroga e Rintoul (2015) citando vários autores, concluem que o conhecimento do comportamento mecânico e estrutural dos compósitos pode contribuir para projetar e melhorar suas propriedades a um custo mínimo. A rigidez e a resistência dos compósitos dependem das propriedades da madeira e do cimento, do tratamento de mineralização da madeira, da densidade ou grau de compactação do material e da relação cimento-madeira.

Das et al. (2012), especificam as vantagens dos painéis de cimento-madeira de aproveitar a elevada rigidez específica, resistência ao impacto e relação resistência-peso da madeira, um recurso natural renovável, de baixo custo, facilidade de processamento, isolamento térmico e acústico. O cimento ao formar uma camada atua como uma barreira, retarda a entrada de umidade e resiste ao ataque biológico. Além disso, ao citarem vários pesquisadores, afirmam que os painéis são livre de amiantos (asbestos), substâncias perigosas e voláteis e a poeira da confecção é não-agressiva.

Silva et al. (2006) destacam o uso desses painéis em paredes de casas pré-fabricadas, bancadas, pisos, divisórias, revestimento de túneis, paredes isolantes térmicas e acústicas, portas corta-fogo, forros de casas, etc. A sua utilização abrange também pavilhões, estádios e edifícios públicos, estando presentes em banheiros, lavanderias, cozinhas, etc. Beraldo e Balzamo (2009), enumeram ainda o uso desses painéis em fachadas, paredes laterais, pisos, telhas e tijolos para edifícios.

Alberto et al. (2000), mencionam que as características físicas e químicas da madeira possuem grande influência no produto final, pois nem todas as madeiras reagem favoravelmente com o cimento Portland, devido a qualidade e quantidade de extrativos presentes. Jorge et al. (2004), Frybort et al. (2008) e mais recentemente Na et al. (2014), citam inúmeros trabalhos com diversas espécies de madeiras e suas interações com o cimento, evidenciando a maior compatibilidade das madeiras de coníferas em relação às folhosas.

Frybort et al. (2008), mencionam a análise de partículas finas para fornecer informações valiosas sobre o máximo efeito possível da ação dos extrativos da madeira, ao exporem maiores áreas superficiais para a pasta de cimento e, portanto, mais extrativos podem entrar na solução.

Knill e Kennedy (2003) apresentam diversos mecanismos de degradação da celulose em condições alcalinas e os fatores físicos que afetam as taxas de reação e degradação alcalina das hemiceluloses.

O baixo conteúdo de açúcar e amido da espécie Mahang pode ter relação com a alta taxa de hidratação do compósito dessa espécie em relação as demais espécies analisadas no trabalho de Karade (2005).

Para Savastano Jr (2000), as fibras vegetais apresentam variações dimensionais, em razão de mudanças no teor de umidade, maiores que as das matrizes de cimento. Assim, repetidos ciclos de umedecimento e secagem introduzem tensões e, progressivamente, vão destruindo a ligação fibra-matriz, reduzindo a ductilidade do material. Dentre outros resíduos, Savastano Jr (1992), utilizou fibras vegetais de malva, sisal e coco e constatou que os compósitos com fibras vegetais não atingiram os níveis de resistência à tração e de energia específica em comparação com os resíduos inorgânicos testados. A perda de ductilidade em meio úmido e alcalino, a elevada absorção de água e a heterogeneidade de suas propriedades físicas e mecânicas são os fatores mais importantes que interferem negativamente no desempenho das fibras vegetais, quando aplicadas para reforço de matrizes à base de cimento Portland.

Por outro lado, Frybort et al. (2008) consideram o bambu um material adequado para a produção de compósitos com cimento. Em relação ao endurecimento do cimento e decomposição de fibras, o bambu possui um desempenho melhor do que a madeira de pinho.

Alguns autores citados por Gazola (2007) relatam que a presença de casca nos resíduos diminui a resistência dos compósitos, comprometendo sua aceitação no mercado.

2.1.2 Cimento

Cimentos são materiais aglutinantes, selantes e impermeabilizantes, formados por um pó mineral fino com propriedades hidráulicas, isto é, a habilidade de endurecer na presença de água (MÜLLER, 2006; PARCHEN, 2012) e a ela resistem se tornando impermeáveis. É uma complexa estrutura policristalina em forma de conglomerado hidráulico de óxidos de cálcio (CaO), silício (SiO₂), alumínio (Al₂O₃), ferro (Fe₂O₃) e magnésio (MgO) (QUIROGA e RINTOUL, 2015).

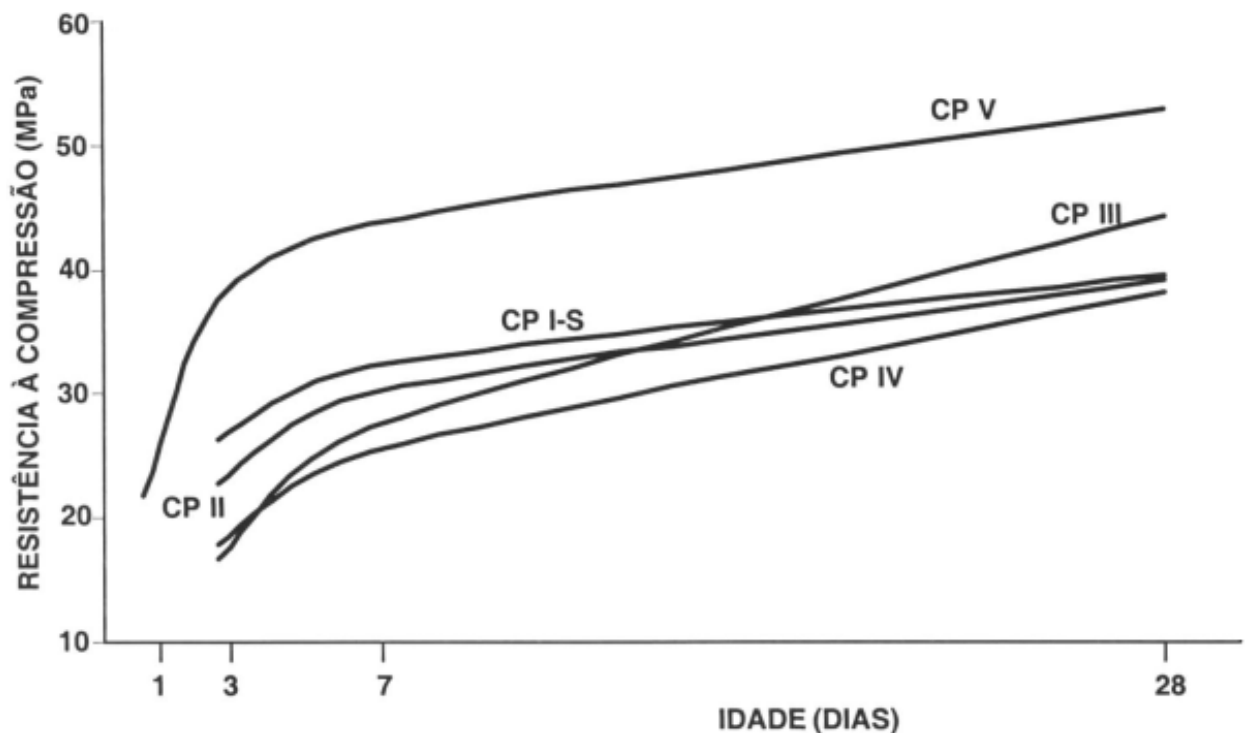
Wolfe e Gjinolli (1996) consideram o cimento como o mais amplo, utilizado e versátil material composto. Na sua forma mais comum, o cimento combina-se com areia e brita para melhorar a durabilidade e a resistência à compressão. O reforço com varões de aço melhora as resistências à flexão e rachaduras. O reforço com fibras também é utilizado para melhorar a tenacidade. O material mais conhecido foi a placa de cimento amianto, utilizada em telhados e como material de revestimento em todo o mundo por cerca de 100 anos.

O processo de hidratação do cimento Portland consiste na ocorrência simultânea de reações dos compostos anidros com a água, pois o mesmo é constituído por uma mistura heterogênea de várias substâncias. Entretanto, as velocidades de reação de cada um dos constituintes do cimento são distintas (SILVA et al., 2009). Após o contato do cimento com a água, a pasta formada começa o seu enrijecimento (pega). Porém, apenas após o início da pega ocorre o endurecimento, cuja velocidade depende de uma série de fatores, entre eles a finura do cimento, os componentes do clínquer, os tipos e teores de adições e também a temperatura. O clínquer do cimento é fabricado a partir da combinação de calcário moído e argila, submetidos a elevadas temperaturas ($\sim 1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$) caracterizando, assim, uma reação endotérmica. Após o contato do cimento com a água, essa energia é liberada em forma de calor, facilmente detectado após o início da pega, principalmente em peças de concreto de grande volume. O calor de hidratação é o calor gerado pela reação do cimento com a água. Esse calor é influenciado pela proporção de silicato tricálcico (C_3S) e aluminato cálcico (C_3A) no cimento, mas também pela relação água-cimento, finura e pela temperatura da cura (SILVA et al., 2009).

A Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002), esclarece que depois de endurecido – mesmo que entre novamente em contato com a água – o cimento Portland não se decompõe mais. O cimento Portland, misturado com água e outros materiais de construção, tais como a areia, a pedra britada, o pó-de-pedra, a cal e outros, resulta nos concretos e nas argamassas usadas na construção de casas, edifícios, pontes e barragens. O cimento Portland é composto de clínquer e adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. As adições (gesso, escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos) podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento.

Os principais tipos de cimento Portland encontrados no mercado são o comum, o composto, o de alto-forno e o pozolânico e, em menor escala, o de alta resistência inicial, o branco, o de poços petrolíferos, etc. A Figura 2 ilustra a evolução média de resistência dos tipos básicos dos cimentos CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI (ABCP, 2002).

Figura 2. Evolução média de resistência à compressão dos tipos de cimento Portland.
Fonte ABCP (2002).



Azrieda et al. (2009) esclarecem que o cimento Portland ao entrar em contato com a água, resulta em uma mistura viscosa, porém fluida, conhecida como pasta de cimento. Essa mistura é capaz de permanecer entre 2 a 4 horas antes de curar gradualmente, processo denominado hidratação. A cura do cimento é ocasionada por reações químicas entre a água e o silicato de cálcio, disponível na formulação do cimento.

A composição do cimento controla a velocidade de desprendimento do calor de hidratação e a resistência da pasta de cimento (SOUZA, 2006). O processo de endurecimento do cimento ocorre pela reação química de seus compostos na presença de água, gerando produtos hidratados menos solúveis. A hidratação dos compostos do cimento é uma reação exotérmica, e o calor total liberado pode ser usado como índice de sua reatividade e também caracterizar o comportamento de

pega e endurecimento da pasta de cimento. Determinadas substâncias podem interferir no processo de pega, algumas como aceleradores – a exemplo do cloreto de cálcio, o cloreto de sódio, alcalinos (potassa, soda) – e outras, como retardantes – gesso, carbonato de sódio, óxido de zinco, açúcar, tanino, bórax e ácido fosfórico. A constituição química e as diferentes proporções entre os constituintes do cimento desempenham um papel essencial nas características do compósito.

Para Souza (2006), na produção do compósito cimento-madeira é desejável a rápida solidificação da pasta de cimento. Por esse motivo, cimentos que liberam maiores quantidades de calor, bem como aqueles que proporcionam alta resistência nos primeiros dias, seriam os recomendáveis. De um modo geral, o uso de cimento de pega rápida é o mais recomendado para a fabricação do compósito (BERALDO e CARVALHO, 2004).

O cimento durante o processo de hidratação possui quatro fases principais, conhecidas como fase da alita, fase da belita, fase do aluminato e fase do ferrite (PARCHEN, 2012).

Beraldo e Carvalho (2004) ao utilizarem os cimentos CP II-E-32 e CP V-ARI observaram que o CP V-ARI permitiu, na maioria dos casos, a obtenção de compósitos com maior resistência à compressão axial, do que os fabricados com cimento CP II-E-32, embora alguns resultados desse último também fossem elevados e, independente do tipo de cimento, houve diferenças significativas quanto a época de corte e uso da madeira.

Latorraca (2000) investigou os cimentos CP-II-F-32, CP-II-E-32, CP-III e CP-V-ARI para determinação do mais indicado em compósitos cimento-madeira, o que apresentasse a maior resistência à compressão axial e a maior temperatura de hidratação em menor tempo. Concluiu que o cimento ARI apresentou o melhor desempenho na temperatura de hidratação (~100 °C), seguido do CP-II (79 °C) e o CP-III (51 °C) com o menor desempenho. O alto desempenho do cimento ARI é explicado pelo alto teor de C_3S e C_3A que liberam maior quantidade de calor. Souza (2006) cita vários trabalhos que demonstram o melhor desempenho desse cimento de alta resistência inicial em compósitos, também recomendado por Beraldo e Carvalho (2004).

Frybort et al. (2012) comentam que o cimento possui uma influência negativa nas propriedades mecânicas e dimensionais da madeira em função da degradação química dos componentes lenhosos. Ao introduzir a madeira na pasta do cimento, as

partículas são expostas a alta alcalinidade e, como resultado, decresce a estabilidade dimensional da madeira (KOLLMANN e COTÉ, 1968; ISHIKURA et al., 2010).

Frybort et al. (2008), citam a relação (traço) cimento-madeira como um parâmetro de grande influência nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos, entre as quais a condutividade térmica e o isolamento acústico. As características de rigidez de um compósito são funções da proporção cimento-madeira; essa relação baseia-se no fato de que o cimento é um material inerentemente mais rígido do que a madeira. Portanto, um maior quociente cimento-madeira resulta em maiores valores de módulo de elasticidade. Há uma relação linear entre a proporção cimento-madeira e a rigidez e, inversamente proporcional à resistência à flexão dos níveis 3,0 para 2,0, com um módulo de ruptura ideal próximo a razão de 2,0. Consequentemente, a resistência à flexão aumenta com a redução da proporção cimento-madeira (PAPADOPOULOS et al., 2006).

Zhou e Li (2012) comentam que nos últimos anos tem sido utilizado o cimento de oxidoreto de magnésio para fabricação de compósitos de cimento-madeira, a exemplo de painéis de fibras, isolamento térmico, aglomerado de bambu, etc. Esse cimento possui várias propriedades superiores ao Portland, tais como menor emissão de carbono, maior resistência ao fogo, maior resistência à abrasão, maior resistência a temperatura, condutividade térmica mais baixa, alcalinidade mais baixa, menor retração e fluência e melhor durabilidade. Por apresentar uma combinação excelente com a madeira, pode substituir o cimento Portland nas espécies que possuem alta incompatibilidade a esse cimento, conforme relatado por Na et al. (2014). Como exemplo, citam o ganho de resistência a flexão e compressão do bambu com cimento oxidoreto de magnésio.

Doudart de la Grée et al. (2014) informam que para estabelecer compósitos com propriedades mecânicas adequadas o cimento deve apresentar três critérios fundamentais:

- Primeiro, criar uma zona de transição interfacial adequada entre a madeira e a pasta. Nesse caso, um cimento com partículas finas será útil por ser capaz de reagir rápido, sem ser afetado substancialmente pelos açúcares dissolvidos.
- Segundo, formar uma camada protetora envolvendo a madeira. Para isso, o cimento deve ser bem distribuído ao cobrir a superfície da madeira.
- E terceiro, criar uma forte matriz de partículas de madeira interconectadas.

A adesão entre fibras de madeira e cimento pode ser química, física ou uma combinação das duas. As ligações químicas podem ocorrer através de pontes de hidrogênio e ou pontes de hidróxido. As pontes de hidrogênio formam-se entre as fibras ou entre as fibras e a matriz de cimento. Fisicamente, a ligação ocorre durante a hidratação do cimento sob a forma de cristais e integram-se um ao outro (PEHANICH et al., 2004). Relatam os autores que a resistência das ligações entre a madeira e o cimento determinam as propriedades dos compósitos e depende da espécie de madeira, tratamento das fibras e aditivos na mistura.

2.1.3. Água

Pela lei de Abrams, a relação água-cimento é a principal responsável pela resistência a esforços mecânicos nas argamassas e concretos. A resistência varia inversamente com a relação água-cimento, ou seja, o coeficiente decresce com o aumento da resistência (SOUZA, 2006).

Wolfe e Gjinolli (1999) evidenciam que a água da mistura do compósito cimento-madeira deve ser suficiente para manter as fibras de madeira saturadas, propiciar a hidratação do cimento e adicionar consistência à mistura. A água utilizada deve ser limitada, pois em excesso contribui para baixa resistência do painel.

A quantidade total de água necessária à união dos componentes também é um fator importante para a hidratação do cimento, conforme Frybort et al. (2008). Esta quantidade é composta pela umidade da madeira e a água da pasta de cimento. Ao utilizar madeira muito seca, a água necessária à hidratação do cimento será removida da pasta, resultando na diminuição da resistência final. Inversamente, segundo Miyatake et al. (2000), o excesso de água produz efeitos negativos nas propriedades de resistência.

Latorraca (2000) cita pesquisa que considera a hidratação completa do cimento somente quando a água requerida pela pasta for pelo menos igual ao dobro da água solicitada pela reação. A relação água-cimento não deve ser inferior a 0,38 em massa, pois não levará a hidratação completa. Por outro lado, se a relação for maior que 0,38 todo cimento pode hidratar, mas também estarão presentes poros capilares. Em consequência da grande incidência de poros permeáveis, incluindo os

vazios e lumens, as fibras vegetais apresentam grande absorção de água (> 90%) e massa específica aparente bastante inferior a real.

O excesso de água no compósito além de acarretar alta porosidade na mistura, permite que os espaços deixados pela mesma sejam ocupados pelo hidróxido de cálcio, contribuindo para formação de uma zona de transição de pouca resistência. Logo, a mistura deve conter uma quantidade mínima capaz de proporcionar a hidratação da pasta de cimento e a saturação das fibras de madeira, caso contrário não haverá água suficiente para hidratação da pasta (SOUZA, 2006). Silva et al. (2005) explanam que a água é responsável pela mistura das partículas com o cimento, pelas reações de hidratação que ocorrem no cimento e na dissolução dos aditivos. A água deve ser livre de componentes inibidores da cura do cimento. Adicionada acima do necessário, a evaporação da água forma poros, influenciando a resistência dos compósitos. Portanto, é adequado manter uma quantidade mínima de água durante a confecção dos painéis.

Fan et al. (2012) garantem que uma relação água-cimento adequada é a chave para conseguir um compósito com boas propriedades físicas e mecânicas. Além de um processo incompleto de hidratação, a escassez de água produz um material rígido, difícil de ser misturado, enquanto que o excesso dilui os constituintes do cimento, afeta adversamente o processo de hidratação e aumenta o tempo de cura. No trabalho dos autores, a relação ideal água-cimento foi de 0,39.

Karade (2005) observa que nos testes de hidratação a quantidade de água normalmente utilizada é de 0,25 ml por grama de cimento e 2,7 ml por grama de madeira, regra seguida por diversos pesquisadores. No entanto, esses parâmetros têm importância prática muito limitada, pois, proporções mais elevadas de madeira-cimento e partículas maiores são usadas, não devendo ser utilizadas para outras composições.

Uma relação invariável água-cimento geralmente é utilizada para todas as espécies. Contudo, as diferentes madeiras adquirem distintas quantidades de água, variando a disponibilidade para o cimento. Supõe-se que não há uma base lógica para descrever a necessidade de água para o compósito. Ausência de água pode reduzir a temperatura máxima, enquanto que o excesso pode impedi-la. Além disso, devido a limitações, os métodos baseados na temperatura máxima de hidratação não dão resultados consistentes (KARADE, 2005). Segundo o autor, durante a avaliação da compatibilidade da cimento-madeira através do teste de hidratação, a

água é consumida por três processos: i) hidratação do cimento, ii) absorção pelas partículas e iii), umidificação das superfícies das partículas de madeira. Conclui que a taxa ótima da relação água-cimento é da ordem de 0,35.

Para Frybort et al. (2010) a umidade inicial da madeira empregada na confecção do compósito Abeto-cimento é importante. Comparado com o material seco (12% de umidade), o uso da madeira com 20% de umidade adiciona um leve aumento de 20% das propriedades mecânicas do compósito, enquanto que ao utilizar com 90% de umidade, a resistência do compósito quase dobrou. Concluem os autores que o uso de material lenhoso com umidade inicial elevada na fabricação do compósito é um artifício bastante eficaz e econômico para melhorar as propriedades mecânicas do produto final. Resultados importantes foram obtidos no estudo pelo fato de que compósitos confeccionados com partículas úmidas (~ 90% umidade) apresentaram resistência ao arrancamento equivalente aos confeccionados com partículas secas (12%) acrescidas com aceleradores. Concluem ainda que os aditivos não são rigorosamente necessários para melhorar a resistência da ligação entre a madeira e o cimento. Um efeito secundário vantajoso dessa umidade elevada é que, simultaneamente, alguma extração está ocorrendo quando as partículas estão imersas. No entanto, para alcançar esse objetivo secundário, as partículas devem ser retiradas após 10 min de armazenadas em água. A madeira úmida adia e minimiza o transporte de minerais por umas horas. Relacionam esse efeito a natureza hidrofílica da madeira, afetando a relação água-cimento, limitando assim a água disponível para hidratação.

Como as fibras incham em função da aquisição de água, desenvolvem-se consideráveis forças de atrito, que por sua vez podem levar a ruptura das fibras. Portanto, a resistência da ligação interfacial entre a fibra e a matriz de cimento é influenciada pelo teor de umidade. Os mesmos autores propõem que a mudança de comportamento mecânico pode ser explicada pela reduzida resistência à flexão das fibras úmidas, tornando-se mais flexíveis e menos susceptíveis em inibirem a fissuração na matriz de cimento.

2.1.4. Areia

Para Frybort et al. (2010), a introdução de sílica com madeira é um método simples para melhorar a resistência do cimento e, adicionalmente, a qualidade de

união entre a madeira e a matriz cimentícia. A presença de sódio, no caso de silicato de sódio, promove a formação de agulhas de etringita (PRINCE et al., 2003). A presença de agulhas de etringita melhora a ligação entre a madeira e a matriz (COATANLEM et al., 2006).

Moreira et al. (2012), utilizaram areia-cimento-seixos e pó de serra de anjo-vermelho para confecção de blocos de concreto, obtendo resultados satisfatórios com a substituição de 5% do agregado miúdo por pó de serra tratado com sulfato de alumínio.

O uso de areia associado com o cimento e madeira elevam a densidade e a resistência à compressão e diminui a absorção de água pelo compósito, conforme conclusão de Basher (2005).

2.1.5. Aditivos químicos

Aditivos são substâncias adicionadas a outras para melhorar suas propriedades ou atribuir funções às mesmas. É acrescida em pequenas quantidades para uma variedade de fins, tais como promover reações, estabilizar e fortalecer polímeros, preservar e realçar materiais, entre outros (LI, 2011). São adicionados à mistura com o objetivo de acelerar a hidratação ou cura do cimento (MATOSKI, 2005). Silva et al. (2005), afirmam que os aditivos atuam de modo a aumentar ou diminuir a quantidade de água utilizada no aglomerante, pois se tratam de substâncias químicas que fluidificam o cimento.

Aceleradores de pega do cimento são amplamente utilizados, de fácil aplicação, reduz o tempo de prensagem e fixação e, adicionalmente, aumenta a qualidade do vínculo entre a madeira e o cimento e, assim, melhora as propriedades mecânicas dos compósitos (FRYBORT et al., 2010). Melhoram a compatibilidade dos compósitos cimento-madeira, além de abreviar ainda mais a pega do cimento em madeiras tratadas previamente (JORGE et al., 2004).

Uma série de sais tais como cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de ferro (FeCl_3) e sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) são utilizados para acelerar a pega do cimento, sendo o CaCl_2 em particular, com baixo custo, obtido sucesso em melhorar as propriedades de resistência dos compósitos cimento-madeira (NA et al., 2014). Os autores descrevem o efeito acelerador de 137 compostos inorgânicos na hidratação do cimento adicionado com *Acacia mangium* Willd, incluindo cloretos, sulfatos,

nitratos, acetatos, óxidos, carbonatos e fluoretos dos cátions Al, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr e Zn. Os resultados mostraram que os compostos com forte capacidade de aceleração na hidratação do cimento formaram quelatos insolúveis com os taninos do cerne de *A. mangium*, sendo os mais eficazes os cloretos e nitratos em reduzir os efeitos inibidores.

Várias substâncias são adequadas para acelerar a cura do cimento, entre elas, cloreto de Magnésio ($MgCl_2$) e cloreto de amônia (NH_4Cl), mas devido a ação corrosiva dos cloretos o aproveitamento desses painéis é limitado (FRYBORT et al., 2010). Por isso é preferível o uso de silicato de sódio (Na_2SiO_3) ou aceleradores não-clorosos. Os resultados das amostras com aceleradores no trabalho dos autores provavelmente são explicados pelo reduzido tempo de pega, o que impede os extrativos migrarem para fora da madeira. Embora o Na_2SiO_3 não possua efeitos sobre a aceleração da hidratação do cimento, muitas vezes é mencionado, assim como outras substâncias, como acelerador (WEI et al., 2002).

Segundo Maltese et al. (2007), a adição de $CaCl_2$ e $MgCl_2$ aumenta a temperatura dos compósitos e estimula a ativação da hidratação do cimento, originando uma estrutura mais densa, com menos poros em comparação com a pasta de cimento puro. De acordo com Azrieda et al. (2009), o aumento da concentração de $CaCl_2$ e $MgCl_2$ torna a ativação mais rápida e uma pasta mais densa pôde ser obtida, concluindo que quanto menor o tempo de pega, mais eficiente o acelerador.

Azrieda et al. (2009), afirmam que durante o primeiro estágio de hidratação, os íons de cálcio e sulfato, fornecidos pelo regulador de fixação, reagem com o alumínio normalmente presentes nas formulações de cimento e água para se obter uma camada amorfa de aluminato. A camada de aluminato diminui gradualmente a hidratação para uma fase dormente. Os aceleradores normalmente são adicionados depois da formação da camada de aluminato. Verifica-se que quanto menor o grau de solubilidade instantânea do regulador mais eficiente o acelerador. A razão para este comportamento pode estar ligado com a diferente morfologia da etringita formada, durante a primeira hora da reação entre a hidratação do cimento e o acelerador.

Frybort et al. (2010) descrevem os efeitos dos tratamentos químicos comuns e o uso de NH_4Cl como acelerador. As substâncias do trabalho foram selecionadas por serem bastante citadas na literatura para melhorar a compatibilidade de compósitos, mas agindo de diferentes formas. Enquanto o hidróxido de sódio

(NaOH) extrai substâncias inibidoras das partículas de madeira, o Na_2SiO_3 altera a superfície da madeira. O uso de Na_2SiO_3 ocasionou um aumento da resistência ao cisalhamento em 1,3 vezes comparado com partículas não tratadas. Resultado semelhante também foi obtido por Pehanich et al. (2004).

Frybort et al. (2010) mencionam a impregnação de partículas de madeira com sais (CaCl_2 , MgCl_2 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e $\text{Fe}(\text{SO}_4)$ sulfato de ferro). Esses sais retardam a formação de um ambiente alcalino em torno das partículas lenhosas, promovendo assim a hidratação ao suprimir o desenvolvimento de ácidos sacarínicos. Concluem que a aplicação de silicato de sódio nas partículas de madeira é um método convencional e, conseqüentemente benéfico, ao melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos. Também que a adição de aceleradores, caso do NH_4Cl , aumenta as propriedades mecânicas e reduz o tempo de pega. O emprego de aceleradores pode ser muito simples no processo industrial, apenas misturado ao pó de cimento. As partículas úmidas (~ 90%) obtiveram maiores resistências de ligação.

Um efeito colateral negativo ao usar aceleradores de pega é uma diminuição na estabilidade dimensional dos compósitos (HERMAWAN et al., 2002). Souza (2006) menciona pesquisa que ao testar 30 aditivos verificaram-se os efeitos negativos de alguns sobre a hidratação da mistura cimento-madeira, dependendo da quantidade e da espécie.

O cloreto de cálcio e o sulfato de alumínio são os aceleradores mais comuns devido a disponibilidade, eficácia e baixo custo (ABDALLAH, 2006). O CaCl_2 proporciona aumento das velocidades de resistência e de desprendimento de calor nos estágios iniciais, sendo seus resultados notados no tempo de pega inicial e final e no aumento a compressão nos três primeiros dias de cura (SOUZA, 2006). Considerado um dos aditivos de melhor desempenho, o cloreto de cálcio apresenta efeito corrosivo nas armaduras, embora sua aplicação em concreto não estrutural não ofereça riscos ao material.

A mistura de aceleradores químicos pode ser mais eficaz do que o uso individual. Ao combinar Na_2SiO_3 e CaCl_2 , Fernandez e Taja-on (2000) proporcionaram melhor resistência ao compósito fibro-cimento do que o uso isolado de cada um. Frybort et al., (2008) mencionam trabalhos com informações sobre diversos aceleradores, com diferentes volumes e aptidões para incrementar o tempo de cura do cimento.

A adição de minerais a mistura cimento-madeira melhora sua qualidade (NA et al., 2014), sendo a sílica ativa (SiO_2) um dos mais promissores devido aos efeitos benéficos na resistência e redução da permeabilidade dos compósitos. A substituição de cimento por 10% de sílica ativa elimina o efeito inibidor da madeira na pega do cimento (DEL MENEZZI et al., 2007).

2.2. INCOMPATIBILIDADE DOS LIGNOCELULÓSICOS COM O CIMENTO

O maior obstáculo para a produção desses compósitos é a incompatibilidade do cimento com certas madeiras ou outras biomassas lignocelulósicas (SILVA et al., 2002) pois alguns químicos solúveis da madeira impedem ou cessam a hidratação do cimento ao serem atacados pelo ambiente alcalino, propagando-se na pasta de cimento e resultando em menor resistência mecânica dos compósitos de cimento-madeira em comparação com o cimento puro (ZHENG TIAN e MOSLEMI, 1986; THOMAS e BIRCHALL, 1983). Portanto, essa incompatibilidade pode limitar o uso de madeiras para a fabricação dos compósitos (NA et al., 2014).

Vaickelionis e Vickelioniene (2003) elucidam o processo, no qual os açúcares envolvem as partículas de cimento e formam uma fina camada que impede a adsorção de água e a união dos grãos. A água ao não reagir com os partículas, retarda a hidratação do cimento. Lima (2005) comenta que as partículas vegetais provocam na pasta alterações nocivas na hidratação do cimento, fundamentalmente na redução do calor de hidratação, maior tempo de pega e decréscimo da resistência mecânica.

A razão precisa da incompatibilidade entre a madeira e o cimento não é inteiramente conhecida, embora dois possíveis mecanismos tenham sido propostos (NA et al., 2014). Primeiro, os extrativos, constituídos de vários compostos orgânicos, formam complexos com os íons metálicos presentes na solução de cimento; isso decresce a concentração de íons Ca^{2+} no cimento e provavelmente altera o equilíbrio da solução, retardando o início da nucleação do gel ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e CSH. Segundo, os compostos orgânicos formam uma fina camada de adsorção na superfície dos grãos de cimento e atrasa o processo de hidratação (JUENGER & JENNINGS, 2002; NA et al., 2014).

Na et al. (2014) esclarecem que a compatibilidade cimento-madeira é afetada por vários fatores tais como espécie, tipo de cimento, traço cimento-madeira, condições de armazenagem, parte da árvore, época de corte, etc.

O FOREST PRODUCTS LABORATORY (2010) considera que o ambiente alcalino da matriz de cimento fragiliza o componente lignocelulósico. As hemiceluloses, açúcares, amido, taninos e lignina, cada um num grau variável, afetam a taxa de cura e resistência final dos compósitos cimento-madeira. Não existe incompatibilidade da celulose com o cimento, porém as hemiceluloses solúveis e os açúcares simples, ao se combinarem com íons metálicos, provocam incompatibilidade entre a madeira e o cimento (CARVALHO, 2000).

Doudart de la Grée et al. (2014) enumeram os efeitos do atraso na hidratação do cimento pelos constituintes da madeira por diversas razões: em contato com a água a madeira começa a absorver-la, principalmente pelas hemiceluloses hidrofílicas. Posteriormente, o cimento é adicionado e inicia diferentes mecanismos, a saber:

- Primeiramente, químicos solúveis como hemiceluloses, amidos, açúcares, ácidos carboxílicos hidroxilados e fenóis começam a dissolver e lixiviar das partículas de madeira; o processo acelera devido ao rápido aumento da alcalinidade (provocado pela adição de cimento), promovendo a difusão dessas substâncias inibidoras no ambiente.
- Em segundo lugar, ao difundir, a hidrólise alcalina dessas substâncias resultam em sais de cálcio de lignina, polissacarídeos e açúcares, interferem na hidratação do cimento, formam diferentes produtos de hidratação e alteram estruturas cristalinas.
- Terceiro, devido ao fenômeno da absorção, íons de potássio (K^+) e cálcio (Ca^{2+}) são absorvidos em algum grau pelas partículas lignocelulósicas. Assim, o cálcio, essencial dos produtos da hidratação que promove o endurecimento do cimento, é removido da solução, reduzindo sua disponibilidade e ocasionando sua deficiência para endurecer o cimento até certo ponto.
- Quarto, as partículas lignocelulósicas podem absorver água destinada à hidratação, reduzindo a quantidade de água necessária à cura do cimento.
- Finalmente, observa-se forte inibição da formação de portlandita (CH) após 48 h de hidratação e uma quantidade crescente de carbonatos de cálcio. Provavelmente essa inibição é devido a degradação alcalina da madeira que induz a liberação de dióxido de carbono, e não a diminuição da relação água-cimento; o CO_2 leva à carbonatação da portlandita, aumentando a quantidade de $CaCO_3$ na pasta.

Beraldo e Carvalho (2004) enfatizam que resinas e outras substâncias químicas podem migrar para a superfície durante o período de secagem da madeira.

Conseqüentemente, a formação de uma camada, considerada hidrofóbica, reduz as pontes de hidrogênio entre a madeira e o cimento, o que implica na redução da resistência na interface. Os autores afirmam que não se deve apenas considerar a quantidade de extrativos, mas também o tipo de extrativo (ácidos graxos, taninos, carboidratos e outros). Substâncias solúveis em água apresentam um efeito mais pronunciado sobre a inibição da pega do cimento e as madeiras ricas em taninos devem ser descartadas para a fabricação de compósitos à base de cimento.

Na et al. (2014) informam que os açúcares e amidos eram reconhecidos como os compostos mais importantes a atuarem na incompatibilidade da madeira com o cimento, particularmente nas coníferas. Entretanto, nem todo açúcar possui o mesmo efeito inibidor. Por exemplo, a glucose e a sacarose inibem a cura do cimento, sendo esta última, de efeito mais acentuado. Contudo, a frutose não provoca efeitos essenciais na hidratação do cimento, mesmo a elevada concentração (0,5%), enquanto outros açúcares com a metade dessa concentração inibe por completo a hidratação. Por outro lado, a rafinose em concentrações até 0,125% melhorou as propriedades do cimento.

Para Carvalho (2000), não existe incompatibilidade da celulose com o cimento, porém as hemiceluloses solúveis e os açúcares simples, ao se combinarem com íons metálicos, provocam incompatibilidade entre a madeira e o cimento. Pequenas quantidades de hemiceluloses (0,1%) podem diminuir significativamente a cura do cimento e influenciar fortemente nas propriedades de hidratação da pasta de cimento (NA et al., 2014). Avaliaram também que pentoses (xilose, arabinose) tinham menos interferência na hidratação do cimento. Trabalho conduzido por Govin et al. (2005), concluiu que as hemiceluloses solúveis em água foram hidrolisadas e convertidas em ácido carboxílico na pasta alcalina de cimento e os produtos dessa degradação alcalina foram três vezes mais eficientes em inibir a hidratação do cimento do que os extrativos.

Algumas madeiras de folhosas possuem determinadas substâncias químicas que liberadas durante as reações químicas de hidratação do cimento inibem ou mesmo impedem a união entre as partículas (SANTOS et al., 2008). As folhosas, devido ao elevado teor de hemiceluloses, são mais inibidoras que as coníferas. Os teores máximos de açúcares tolerados pelo cimento situam-se entre 0,4 – 0,5% para coníferas e 0,20 a 0,25% para folhosas.

A época de corte da árvore pode ter grande influência na pega da mistura madeira e cimento, pois o teor de açúcares livres sofre alteração durante o decorrer do ano; amostragens efetuadas ao longo da altura do tronco mostraram diferenças significativas na distribuição dos açúcares (sacarose, glucose, frutose), em espécies de coníferas alemãs. Foi constatado que o teor em açúcares foi mais elevado nos meses de abril (primavera) e mais baixo em agosto (verão). Efeito mais notável foi observado sobre a frutose, a qual, praticamente, desapareceu/transformou-se na primavera; o tipo de armazenamento da madeira, após o corte, exerceu grande influência na diminuição dos teores de açúcares. Teores de açúcares diminuíram devido às ações enzimáticas. As transformações dos açúcares conduziram à obtenção de constituintes não inibitórios ao cimento; o que não ocorreu com os compostos fenólicos; partículas de bambu, estocadas durante dois anos em ambiente protegido, apresentaram queda significativa no teor de açúcares, embora tal operação ainda se mostrasse insuficiente para permitir a pega do cimento (BERALDO e CARVALHO, 2004).

Semple et al. (2000) apresentam os polissacarídeos do alburno como fortes inibidores dos processos de hidratação do cimento. Fan et al. (2012) afirmam que os carboidratos de baixo peso molecular e hemiceluloses contribuem diretamente para a inibição dos compósitos cimento-madeira. Peschard et al. (2006), concluem que o amido afeta a taxa de crescimento dos cristais de CaOH_2 prejudicando a resistência do cimento. Na et al. (2014) dividem em dois grupos as substâncias inibidoras do endurecimento do cimento. De um lado estão os carboidratos de sucrose e arabinogalactanas e do outro, os compostos fenólicos. Conforme Vaickelionis e Aickelioniene (2006), o ambiente alcalino dissolve muito mais extrativos da madeira do que a água.

Frybort et al. (2008) destacam as hemiceluloses como maior efeito inibidor na cura do cimento. As substâncias inibidoras incluem ainda os açúcares, amido, ácidos carboxílicos, fenóis e extrativos. Um ambiente alcalino ocorre durante a hidratação do cimento, produzindo hidróxido de cálcio. O resultado é uma solução alcalina ($\text{pH} = 12,5$), a pasta de cimento. As hemiceluloses por serem amorfas e alcalinas solúveis, dissolvem-se na pasta e afetam a cristalização do cimento. Devido ao meio alcalino, provocado pelo cimento, as hemiceluloses são degradadas a substâncias que danificam o cimento. Durante as fases iniciais da hidratação, di- e tri-silicatos de cálcio são convertidos para gel tobermorite ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este último

umenta o pH da mistura de cimento-madeira a ~ 12,5, o que facilita a dissolução dos constituintes da madeira, particularmente carboidratos de baixo peso molecular e extrativos do cerne (EVANS, 2000). Supõem que as espécies com baixos teores de extrativos solúveis em água são geralmente desejáveis para a união com o cimento.

Frybort et al. (2008), esclarecem que o uso de madeira seca retira água da pasta – essencial para a hidratação do cimento – o que resulta na falta de componentes necessários e indispensáveis para o desenvolvimento da resistência. Além disso, o ácido e os componentes alcalinos, que penetram na madeira, podem danificar a estrutura da madeira, resultando em perda adicional de resistência. Além disso, os produtos de degradação oriundos da penetração do ácido e componentes alcalinos irão influenciar a hidratação do cimento. Supõem que as espécies com baixos teores de extrativos solúveis em água são geralmente desejáveis para a união com o cimento. A análise de partículas finas pode fornecer informações valiosas sobre o máximo efeito possível da ação dos extrativos da madeira, ao exporem maiores áreas superficiais para a pasta de cimento e, portanto, mais extrativos podem entrar na solução.

Cabangon et al. (2000) concordam que muitas espécies de madeira são incompatíveis com o cimento devido aos compostos de baixo peso molecular que inibem a hidratação do cimento. Em geral as madeiras de folhosas são menos compatíveis com o cimento do que as coníferas, pois contêm mais substâncias inibidoras, tais como fenóis e açúcares. Assim, muitas folhosas em estado natural não são adequadas para a fabricação de compósitos cimento-madeira. Fan et al., 2012, ao investigarem a compatibilidade de 15 espécies tropicais concluíram que os extrativos e os teores de açúcar variavam consideravelmente de uma madeira para outra, tornando-se necessário a análise sistemática dos mecanismos de hidratação do cimento para a compreensão das espécies tropicais.

Pehanich et al. (2004), esclarecem que a madeira contém muitas substâncias inibidoras (açúcares, amidos, hemiceluloses, fenóis, terpenos, sais, terpenóides, ácidos carboxílicos hidroxilados). Essas substâncias podem dissolver e afetar a cristalização do cimento. Algumas madeiras de folhosas possuem determinadas substâncias químicas que liberadas durante as reações químicas de hidratação do cimento inibem ou mesmo impedem a união entre as partículas (SANTOS et al., 2008). Os diferentes extrativos provocam variados graus de inibição e retardamento

na hidratação do cimento (NA et al., 2014). Latorraca (2000), informa que os extrativos da madeira são os principais responsáveis pela inibição da pega da pasta de cimento e a causa exata da inibição provocada por essas substâncias é de difícil averiguação.

Latorraca (2000), informa que a incompatibilidade da madeira com o cimento está associada à quantidade de extrativos solúveis em água quente ou fria. Uma maior quantidade lixiviada durante a mistura com o cimento afetará negativamente a pega e o endurecimento. Souza (2006) refere-se a estudos com base no teor de extrativos solúveis em água fria ou quente como os mais realizados para identificar a ação dessas substâncias na pega e no endurecimento da pasta de cimento. Diferenças de compatibilidade podem acontecer se existirem variações no conteúdo e composição dos extrativos entre espécies semelhantes ou distintas. Vaickelionis e Vickelioniene (2006) mencionam que a hidratação, pega e endurecimento do cimento dependem da concentração de extrativos na madeira e não das espécies e métodos de preparação, como também o ambiente alcalino dissolve muito mais extrativos da madeira do que a água. Esse fenômeno ocorre devido à quantidade e qualidade dos extrativos presentes (BERALDO et al., 2000).

Latorraca (2000) informa que não apenas a quantidade, mas também o pH dos extrativos deve ser analisado. As substâncias de pH ácido inibem com menor intensidade a hidratação do cimento. O valor do pH tem grande influência na cura do cimento (FRYBORT et al., 2010). Segundo Subbotina et al. (2016), é conhecido que o controle da acidez da mistura resulta em modificações dos parâmetros físico-químicos do endurecimento da composição a base de cimento e, como consequência, a modificação das propriedades do sistema água-cimento. Embora o mecanismo desse fenômeno não esteja inteiramente claro, supõe-se que a diminuição do pH na água provoca uma reação de neutralização da taxa de hidratação, resultando na diminuição da resistência do cimento.

Karade (2005) cita trabalhos realizados com o cerne de *A. mangium*, em que o extrativo teracacidin inibiu o endurecimento do cimento. Semelhante informação é relatada por Evans (2000) e Na et al., 2014.

Frybort et al. (2010), esclarecem que os produtos da degradação, especialmente ácidos sacarínicos, surgem a partir de monômeros e oligômeros de açúcares, assim como os polissacarídeos (celulose, hemiceluloses), têm efeitos inibidores na hidratação semelhante aos monossacarídeos solúveis em água. Os ácidos

sacarínicos são muito mais eficazes na inibição da hidratação do cimento (GOVIN et al., 2005). Diversos autores citados por Azrieda et al. (2009), concordam que os açúcares presentes na madeira inibem significativamente a hidratação do cimento (pega e endurecimento).

No trabalho de Beraldo e Carvalho (2004), a glucose, sacarose e frutose foram responsáveis pelo fraco desempenho de compósito à base de partículas de bambu; quando da interação entre o cimento e a madeira, uma parte das hemiceluloses começam a solubilizar e retardam a pega do cimento; o ataque sofrido pela madeira pela ação dos álcalis do cimento pode converter parcialmente as hemiceluloses e polímeros de açúcar, o que provoca problemas na pega do cimento. Afirmam que nenhuma teoria, por mais complexa que seja, pode ser aplicada ao efeito de todos os açúcares em presença de todos os constituintes do cimento.

Knill e Kennedy (2003) apresentam diversos mecanismos de degradação da celulose em condições alcalinas e os fatores físicos que afetam as taxas de reação e degradação alcalina das hemiceluloses.

Boustingorry et al. (2005) observaram que nem o ácido acético nem os compostos fenólicos foram os principais agentes retardantes da hidratação do cimento, como também a presença de traços de taninos. Ácidos orgânicos tais como ác. acético e ác. tânico e outros compostos fenólicos podem não somente inibir a hidratação como também atacar e destruir lentamente as ligações do cimento, resultando em decréscimo de resistência, além de afetar outras propriedades do compósito (NA et al., 2014).

No trabalho de Powell et al. (2000), o armazenamento de madeiras de *Pinus* spp em água reduziu drasticamente a concentração dos carboidratos solúveis, provocando uma diminuição a 5% dos níveis iniciais após um ano

2.3. PROCEDIMENTOS PARA REDUZIR, INIBIR, REMOVER, NEUTRALIZAR OU ANULAR A INCOMPATIBILIDADE

Jorge et al. (2004) referem-se a compatibilidade como o grau de pega do cimento após a mistura com água e fragmentos de madeira.

Na et al. (2014) relataram que para melhorar a compatibilidade entre a madeira e o cimento, são empregados vários métodos, incluindo pré-tratamento de madeira, adição de aceleradores ao cimento e a injeção de dióxido de carbono (CO₂). A pega

do cimento por esses métodos pode ser atribuída a qualquer redução da quantidade de substâncias inibidoras disseminadas na pasta de cimento ou na aceleração da hidratação do cimento por uma ação externa que neutraliza o efeito retardante dos componentes da madeira.

Os métodos de tratamentos para a retirada dos extrativos da madeira e do bambu podem ser biológicos, físicos e químicos, segundo Frybort et al. (2008), Latorraca (2000) e Lima (2009).

Um procedimento muito adotado nas pesquisas é utilizar um cimento que tenha uma cura rápida para ser misturado com os resíduos lignocelulósicos. Frybort et al. (2010) mencionam a utilização de um cimento menos alcalino ou a adição de substâncias ácidas, reduzindo a degradação alcalina das hemiceluloses, chamada de reação de peeling.

Devido a incompatibilidade de algumas madeiras de folhosas, torna-se necessário a utilização de algum processo de compatibilização da madeira com a matriz de cimento, para que ocorra a menor influência possível no processo de hidratação do cimento. Esses processos podem ser realizados através de tratamentos químicos por diversos meios, em geral determinados em função da disponibilidade tecnológica, inclusive água fria (SANTOS et al., 2008).

Lima (2009), citando vários autores, enumera alguns tratamentos empregados para aperfeiçoar a compatibilidade madeira-cimento: extração em água quente e fria; extração com soluções alcalinas como hidróxido de sódio e cálcio; impregnação das partículas de madeira com substâncias químicas bloqueadoras como sódio, magnésio e alumínio; utilização de aditivos químicos aceleradores de pega como cloreto de cálcio.

A extração aquosa é um método eficaz para remover os compostos solúveis nocivos da madeira antes da mistura com o cimento, sendo a água quente, fria e a solução de NaOH os mais utilizados (NA et al., 2014). Do ponto de vista efetivo, o tratamento com solução de NaOH é mais eficaz do que água quente e esta, maior do que água fria (SUTIGNO, 2000). Segundo Sulastiningsih et al. (2000), embora o bambu apresente forte efeito inibidor na pega do cimento, após extração aquosa a incompatibilidade reduz drasticamente. Dependendo da espécie de madeira, Fan et al. (2012) constataram que a compatibilidade melhorou consideravelmente após prévia extração na madeira, com uma ordem de eficiência dos tratamentos $\text{Ca(OH)}_2 > \text{MeOH} > \text{H}_2\text{O} > \text{CaCl}_2$. Além disso, verificaram que o tratamento com sais cobre-cromo-

arseniato (CCA) também aumentou a compatibilidade da madeira em relação à extração com água quente, resultando em ampla redução dos teores de extrativos e alterações nos açúcares disponíveis após a madeira ser tratada com esse preservativo hidrossolúvel. Em geral, quanto menos extrativos difundirem na pasta de cimento, mais favorável a compatibilidade cimento-madeira (Na et al., 2014).

Outro método, citado por Na et al. (2014), consiste no revestimento da superfície da madeira isolando-a da pasta de cimento, aumentando a resistência aos ataques alcalino ou da água e na melhora da compatibilidade com o cimento, baseados nos exemplos com palhas de arroz e polpa de beterraba. Os autores ainda mencionam a imersão em Na_2SiO_3 para remover parte dos inibidores ou impedir a ação destes, formando uma camada na superfície da madeira, embora reconheçam ser menos eficaz comparada a extração com água ou NaOH.

No trabalho de Beraldo e Carvalho (2004), de uma maneira geral, quando há compatibilidade química entre a madeira e o cimento, a hidratação do aglomerante atinge um nível significativo, o qual permite a formação de uma rede de silicatos, ligando as partículas.

Frybort et al. (2012), verificam que apesar do fato dos componentes químicos serem nocivos ao cimento, a madeira, entretanto, desenvolve uma adesão com o mesmo. Diversas teorias explicam os mecanismos da ligação dos lignocelulósicos e o cimento. A maioria concorda que a integração mecânica desempenha o papel principal, porém, mecanismos de ligação física também possuem sua importância; então, a ligação é uma combinação de forças físicas convencionais, notadamente, integração mecânica.

Cabangon et al. (2000) ao investigarem determinado número de estudos, demonstram que o armazenamento de toras ao ar livre durante 4 a 20 semanas reduziu o teor de açúcares da madeira e aumentou a adequação desse material para a produção de compósitos cimento-madeira. Na et al. (2014) relatam que a compatibilidade cimento-madeira é afetada pelas condições de armazenamento. Informam que o teor de açúcar pode reduzir 75% quando as toras são estocadas ao ar livre durante três meses ou quando a secagem natural de toras aumenta a adequação para compósitos. Da mesma forma, a casca interfere na compatibilidade. Toras sem casca armazenadas naturalmente durante quatro semanas tiveram decréscimos nos teores de açúcar e amido; quando estocadas com casca, precisaram de um período três vezes maior para efeito semelhante. Embora

altamente incompatível com o cimento, o armazenamento pós-colheita da *A. mangium* durante 6 – 32 semanas melhora sua compatibilidade, segundo Cabangon et al. (2000). A estocagem a frio da madeira pode aumentar levemente a temperatura e encurtar o tempo de hidratação, conforme trabalho citado por Na et al. (2014)

Esses autores relatam pesquisas conflitantes com o uso da casca no compósito. A presença de casca pode aumentar a compatibilidade em comparação sem o uso da mesma ou, pelo contrário, inibir fortemente a hidratação do cimento, resultado da variação da composição química das cascas entre as espécies. Resultados semelhantes encontraram Semple e Evans (2004) com eucaliptos e melaleucas. Os Efeitos do uso das cascas com as madeiras na compatibilidade com o cimento ora foram positivos, ora negativos, ou simplesmente não houve nenhuma influência significativa.

Na investigação efetuada por Beraldo e Carvalho (2004), a lavagem permite eliminar certa quantidade de extrativos presentes na biomassa vegetal. A eficiência do método depende do pH da solução, da temperatura e tempo de extração, dentre outros. Aparentemente, a lavagem melhora o comportamento de espécies inibitórias, não se mostrando eficaz (ou se fazendo desnecessária) quando se utilizam partículas vegetais moderadamente inibitórias ou não inibitórias à pega do cimento. Concluem que a lavagem das partículas da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden considerado moderadamente inibitório, não alterou o desempenho dos compósitos submetidos à compressão axial. Beraldo e Rolim (1996) *apud*. Beraldo & Carvalho (2004), ao comparar compósitos fabricados com partículas lavadas e não lavadas de *Corymbia citriodora* Hill & Johnson também não constataram diferenças significativas na resistência à compressão.

Em que pese a incompatibilidade dos materiais lignocelulósicos com o cimento, proveniente dos seus componentes químicos, como açúcares, hemiceluloses, extrativos, carboidratos, etc., atuando isolada ou conjuntamente, muitas pesquisas utilizam diversos procedimentos para anular ou reduzir essa incompatibilidade. A começar pelo tipo de cimento a ser utilizado (preferencialmente o CP V-ARI), tempo de armazenagem dos resíduos, lavagem em água quente ou fria, em solução aquosa com extratores químicos, tempo de imersão nas soluções, de aceleradores químicos de pega, entre outros procedimentos menos usuais. Resultado bastante significativo foi obtido por Frybort et al. (2010) na mistura cimento-madeira:

simplesmente realizando a imersão das partículas de madeira durante 10 minutos em água e adiciona-las úmidas (~ 90%) na confecção da argamassa. Os autores também concluem que a aplicação de silicato de sódio nas partículas de madeira é um método convencional e, conseqüentemente benéfico, ao melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos, tornando o emprego de aceleradores muito simples no processo industrial, apenas misturado com o pó de cimento.

Devemos observar que a totalidade dos trabalhos procura remover, inibir, neutralizar ou reduzir os efeitos dos compostos químicos da madeira na solidificação do cimento empregando metodologia ou tratamentos dos resíduos citados anteriormente (FAN et al., 2012; FRYBORT et al., 2008, 2010; SANTOS et al., 2008; LATORRACA, 2000; BERALDO e CARVALHO, 2004; LIMA, 2009).

Para evitar a ação inibidora dos constituintes do bambu na hidratação do cimento, um recurso utilizado é a lavagem das partículas de bambu em água corrente, lixiviando o amido ou a imersão em água parada, ocorrendo a precipitação dos açúcares e com uma ação mais efetiva das enzimas na degradação dos mesmos. Essas práticas reduzem consideravelmente os teores de amido no bambu, desejável para sua interação com o cimento. Outras possibilidades – combinadas ou não com as anteriores – são a extração das substâncias inibitórias em soluções aquosas (hidróxidos de sódio, de cálcio, etc.), a utilização de aceleradores de pega como cloretos de cálcio, de alumínio, de magnésio, etc., a secagem, o recobrimento das partículas (silicato de sódio, betume, polietilenoglicol, pasta diluída de cimento, etc.), mineralização das partículas, tipos de cimento, etc. (BERALDO, 2006).

Para reduzir ou bloquear essa incompatibilidade química e melhorar o processo de hidratação do cimento, Fan et al. (2012) relacionam alguns procedimentos, entre eles a época da retirada de toras, lavagem das partículas de madeira ou a utilização de aditivos a exemplo do cloreto de cálcio e silicato de sódio. Estudos também demonstram que a injeção de dióxido de carbono melhora significativamente a compatibilidade cimento-madeira. Afirmam ainda que os vários mecanismos de ligações entre a madeira e o cimento são muito complicados e estão relacionados com a espécie, idade, tempo de exposição das partículas, ambiente geológico e estações. No trabalho concluíram que a compatibilidade química foi inversamente relacionada com a solubilidade de madeiras tropicais em solução saturada de cal, água quente e álcool. Quando a solubilidade da madeira aumenta, reduz a compatibilidade.

Nesse caso, torna-se necessário a utilização de algum processo de compatibilização da madeira com a matriz de cimento, para que ocorra a menor influência possível no processo de hidratação do cimento.

Os estudos de Fan et al. (2012), demonstram que a injeção de dióxido de carbono (CO_2) pode melhorar significativamente a compatibilidade madeira-cimento, o que torna esse método bastante promissor para acelerar o processo de hidratação e proporcionar maior resistência, além de realizar o desmolde em três minutos (FRYBORT et al., 2008). No processo, o gás carbônico é neutralizado pelo silicato de cálcio no cimento, resultando em carbonato de cálcio altamente insolúvel. A carbonatação ocorre muito rapidamente nos primeiros dois minutos de reação e resulta no rápido endurecimento da mistura água-madeira-cimento, ao contrário das várias horas comuns nos processos normais de hidratação (NA et al., 2014). Soroushian et al. (2012, 2013) observaram que painéis cimento-madeira endurecidos no processo de injeção de CO_2 apresentam maior rigidez e resistência à flexão, maior longevidade e resistência ao intemperismo, pois a presença de carbonato de cálcio reduz a porosidade capilar da mistura cimento-madeira e reforça a interface da matriz de fibras de madeira.

Razumov et al. (2013), consideram praticamente esgotados os métodos tradicionais (mecânico e químico) de modificação da madeira e propõem utilizar partículas tratadas termicamente (160 a 220 °C) na ausência de oxigênio e concluíram que esse pré-tratamento reduz os açúcares solúveis, a absorção de água e o inchamento, resultando em compósitos propícios ao uso em condições de elevada umidade. Ahmad et al. (2015) utilizaram micropartículas carbonizadas (850 °C) de bambu, aperfeiçoando as resistências a compressão, flexão e tenacidade do compósito.

Subbotina et al. (2016) utilizaram soluções tampão de fosfato com pH 4,8, 7,0 e 8,5 visando melhorar as propriedades de resistência mecânica e reduzir a absorção de água do compósito cimento-madeira. Obtiveram o melhor resultado com o meio tamponado de pH = 4,8, com elevada resistência a compressão (~ 26 MPa) e baixa absorção de água (5%). Alguns dos mecanismos observados no processo foram a aceleração da hidratação do cimento, interação química dos minerais na hidratação, polimerização envolvendo compostos de fosforo e hidrólise da água.

Safin et al. (2016) ao realizarem tratamento por ultrassom de fragmentos de madeira em água, verificaram que esse processo intensifica e aumenta a extração de açúcares solúveis na água, resulta no incremento das características de resistência e

que, a adoção desse artifício, pode possibilitar a melhora do desempenho dos compósitos cimento-madeira sem a necessidade de um investimento econômico significativo.

Parchen et al. (2016) propõem um novo método para confeccionar compósitos cimento-madeira de baixa densidade através da compressão vibro-dinâmica. O procedimento consiste em preparar compósitos dentro de moldes cilíndricos e prismáticos com a aplicação de uma carga de 220 N a 3000 rpm através de um vibrador elétrico. Os autores concluem que o processo de moldagem é eficiente, melhora a compressão e a ligação das partículas de madeira com o cimento e torna as etapas de prensagem e grampeamento obsoletas. A tecnologia permite elementos com formas geométricas desejadas, comportamento estável durante a manipulação, armazenagem, transporte e uso na construção civil.

Quiroga et al. (2016), concluem que os tratamentos das partículas de madeira são estratégias tecnológicas convenientes para evitar a inibição da pega do cimento. Portanto, a escolha do processo a ser empregado está relacionado fundamentalmente ao uso final do compósito.

2.4. MÉTODOS PARA AVALIAR A COMPATIBILIDADE CIMENTO-LIGNOCELULÓSICOS

Para avaliar a compatibilidade cimento-madeira diversos pesquisadores utilizam procedimentos como o ensaio da curva de hidratação, método não destrutivo por ultrassom ou o ensaio de compressão axial, proposto por Lee et al. (1987).

Como o grau de compatibilidade cimento-madeira varia dentro e entre espécies de madeira, o nível de compatibilidade deve ser avaliado para determinar a viabilidade para a produção de compósitos (NA et al., 2014). Segundo os autores, alguns métodos de avaliação foram desenvolvidos, tais como temperatura de hidratação, resistência, condutividade elétrica, morfologia, pré-tratamentos ou aceleradores químicos.

O ensaio de compressão axial, além de ser de mais fácil execução, permite a desmoldagem dos corpos-de-prova 24 horas após a fabricação, sendo apropriado na avaliação da matéria-prima vegetal, dos tratamentos a ela aplicados e das interações entre ambos (BERALDO e CARVALHO, 2004).

A maioria dos métodos existentes para qualificar a compatibilidade cimento-madeira são baseados no $T_{máx}$ e $t_{máx}$ ou no calor desenvolvido em um determinado

período. O método mais utilizado é o do medição da temperatura de hidratação, devido a simplicidade do teste, conforme Vilela e Du Pasquier (1968). A temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) de hidratação e o tempo ($t_{m\acute{a}x}$) necessário para alcançar essa temperatura são utilizados diretamente para avaliar o índice de compatibilidade entre a madeira e o cimento (NA et al., 2014).

Conforme Azrieda et al. (2009), o indicador da compatibilidade da madeira baseia-se em alcançar a máxima temperatura em menor tempo. Essa aptidão é expressa como "taxa de hidratação". Existem três classificações para o grau de hidratação (WEI et al., 2000): I) espécies menos inibitórias, com temperatura máxima $> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e tempo $< 10\text{ h}$; II), intermediárias, temperatura máxima $> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e tempo $< 15\text{ h}$; III) altamente inibidora, com temperatura máxima $< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o tempo $> 15\text{ h}$. Se a madeira é considerada altamente inibidora, torna-se inadequada para a fabricação de compósitos, sendo necessária a remoção dos extrativos para uma fabricação prévia.

Karade et al (2003) garantem que os indicadores $T_{m\acute{a}x}$ (temperatura máxima de hidratação do cimento+água) e t_0 (temperatura máxima de hidratação do compósito cimento+lignocelulósico) possuem limitações pois são eficazes apenas quando utilizam a mesma proporção de cimento:madeira:água e condições laboratoriais ao comparar a compatibilidade de diferentes espécies de madeiras, pois não consideram a taxa de resfriamento e a capacidade térmica do sistema, que modifica em função da alteração na proporção da mistura e peso. Além disso, devido as diferentes capacidades de calor e os vários efeitos retardantes, a hidratação prossegue a diferentes temperaturas, influenciando ainda mais os valores de $T_{m\acute{a}x}$ e $t_{m\acute{a}x}$. Segundo os autores, o calor total gerado dentro de um determinado período (C_A), índice proposto por Hachmi et al. (1990) *apud*. Na et al. (2014), em alguns casos pode não ser eficaz pois representa a evolução do calor bruto ao invés da intensidade da hidratação e, portanto, não representa o comportamento real da hidratação. Propõem, por conseguinte, o índice de compatibilidade (C_I) que leva em consideração a capacidade de calor do sistema, taxa de resfriamento, a variação de temperatura durante o processo de hidratação e intensidade da reação.

Na et al. (2014) argumentam que o índice C_I pode aumentar artificialmente e propõem o índice C_X , que considera a maioria das características exotérmicas da hidratação da mistura cimento-madeira: taxa máxima de calor, o tempo para reagir a essa taxa de calor máximo e o calor total liberado durante o processo químico.

Alguns ensaios físicos também são utilizados como indicadores da compatibilidade cimento-madeira. Tchhouali et al. (2013) constataram que a compressão de compósitos de cimento-madeira foram linearmente proporcional a fatores C_A e concluem que o teste físico pode ser um indicador real da compatibilidade cimento-madeira.

A condutividade elétrica também foi utilizada para avaliar a compatibilidade dos compósitos cimento-madeira em alguns trabalhos (JUENGER & JENNINGS, 2002; BOUSTINGORRY et al., 2005).

Ensaio não destrutivo são comumente empregados para avaliar as propriedades e qualidades dos materiais de construção, a exemplo do aço e concreto e, também, para conferir a evolução da hidratação do cimento, conforme Beraldo (2006). Esta característica específica dos materiais manifesta-se pela medida do tempo necessário da propagação da onda de ultrassom através de amostras, obtendo-se a velocidade do pulso ultrassônico (VPU). Para os compósitos a base de cimento, a magnitude da VPU depende, sobretudo, do lignocelulósico, além de outros fatores, tais como, idade da amostra, umidade, cimento, aditivos, traços e tipo de cura.

Outro método não destrutivo, de ondas de tensão, consiste na aplicação de uma onda de tensão provocada por um impacto no material e a análise do fenômeno da propagação desse estímulo. A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros analisados nesses casos, conforme descrito no trabalho de Nogueira e Ballarin (2008).

Frybort et al. (2010), comentam que testes de arrancamento (“pull-out”), em geral, é um método comum para determinar a resistência de união das fibras e cimento, mas quase nenhum trabalho estava disponível à época sobre a avaliação da resistência da união do cimento e as partículas de madeira, como também, a investigação da fragilização da interface devido aos efeitos dos aceleradores.

2.5. TRAÇOS FORMULADOS DAS MISTURAS CIMENTO-LIGNOCELULÓSICO

Karade (2005) menciona traços recomendados anteriormente de cimento-madeira-água de 1:0,1:0,5, e 1:0,075:0,45, procedimentos utilizados desde então por diversos pesquisadores para aferir a compatibilidade da madeira com o cimento.

Estudo preliminar citado por Abdullah (2006), indica que o traço cimento-madeira possui maior resistência quando aumenta de 0,75 para 1,5. Entretanto, um elevado traço cimento-madeira pode mascarar os efeitos das espécies e tratamentos nas propriedades de hidratação do cimento, principalmente quando um aditivo é adicionado à mistura.

Segundo Lee et al. (1987), a consequência da redução da proporção cimento-madeira é a diminuição da temperatura de hidratação, da resistência à compressão e o prolongamento do tempo de hidratação.

No Quadro 1 estão relacionados os materiais empregados nos compósitos e o traço adotado por alguns pesquisadores.

Quadro 1. Materiais empregados em compósitos e os respectivos traços

Cimento	Lig	Ar	Ag	Ad	Traço	Fonte
Comum	B		N	L	1:0,02-0,22:1:N	Coutts (1995)
CP	M	-		-	1:0,33:0,1-0,6	SimatupanG et al. (1995)
IND	M	-		4	1:0,5:0,5	Wolfe e Gjinolli (1999)
CP III	M	-		5	1:0,06:0,37	Blankenhorn et al. (1999)
Comum	M	-		4	1:0,075:0,45	Wei et al. (2000)
IND	M		N		1:0,1:1,43:N	Teixeira e Mosleml (2001)
CP II	M			3	1:0,15:1:0,63	Pimentel e Beraldo (2002)
ARI				1,5	1:0,15:1,25:0,65	
CP III	B	-		3	1:0,375:0,7	Beraldo et al. (2003)
ARI					1:0,125:1,5:0,62	
CP II, ARI	M	-		L	1:0,375:0,75	Beraldo e Carvalho (2004)
CP II	M	-		4	1:0,25:0,25	Okino et al. (2004)
ARI	M	-		4	1:0,36:0,40	Silva et al. (2002)
IND	*	-		-	1:?:0,35	Karade (2005)
CP III			N	1	1:0,03:8,9:N	Silva (2005)
ARI	M			5-15	1:0,15:1:0,63	Pimentel e Camarini (2005)
ARI	M	-		3	1:0,1:0,4	Bejó et al. (2005)
ARI	M	-		4	1:0,25:0,43	Matoski (2005)
CP I	M	-		L	1:3,6:0,75	Coatanlem et al. (2006)
CP II e IV	M	-		4	1:0,33-0,5:1	Verde (2008)
Comum	M	-		1-3,5	1:0,28:0,4	Azrieda et al. (2009)
ARI	M	-		3	1:0,39:0,69	Beraldo e Balzamo (2009)
CP I e II	M		N	1-3	1:0,02-0,05:1-3:N	Macedo et al. (2011)
PZ	M	-		2	1:?:0,5	Frybort et al. (2010)
Comum	M	-		IND	1:0,05:0,39	Fan et al. (2012)
Comum	B	-		-	1:0,25:0,375	Das et al. (2012)
ARI	M	-		3	1:0,37:0,4	Iwakiri et al. (2012)
ARI	M			5	1:0,05:3,95:0,6	Moreira et al. (2012)
ARI	M	-		4	1:0,36:0,4	Sá et al. (2012)
CP II	B			L	1:0,05:3:0,34	Beraldo e Silva (2013)
ARI					1:0,08:3:0,38	
CP I	M	-		-	1:0,28-0,35:0,25	Soroushian et al. (2013)
CP 40	M			L	1:0,03:2,7:0,45	Hoyos et al. (2013)

Lig – lignocelulósico; M – madeira; B – bambu; Ar – areia; Ag – água; Ad – aditivo químico (%); L – lavado (com ou sem substâncias químicas); N – informação não disponível; * casca.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS DE ESTUDO

Foram empregados na associação com o cimento e areia na pesquisa, três tipos de resíduos lignocelulósicos: partículas de Maçaranduba e de madeira mista, originários de folhosas e partículas de Bambu, monocotiledôneas.

Foram utilizados resíduos de pó de serra de Maçaranduba (*Manilkara* spp) coletados nas serrarias próximas da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE e na Serraria Manassu Ltda, por terem essa espécie florestal como um dos seus principais produtos de comercialização.

As partículas de Bambu (*Bambusa vulgaris* var. *vulgaris*) com diferentes dimensões e geometrias foram obtidas na Empresa Celulose e Papel de Pernambuco – CEPASA, do Grupo Industrial João Santos, localizada em Jaboatão dos Guararapes – PE. Utilizaram-se os rejeitos dos cavacos destinados à produção de polpa e papel, procedentes dos reflorestamentos de Bambu da Usina Santa Teresa, Goiana – PE.

As maravalhas de “madeira mista” utilizadas foram provenientes de doações da Construtora Gabriel Barcelar. Embora a origem dessas maravalhas seja diversa e bastante heterogênea quanto aos tipos de madeiras que os compõem, optamos por utilizá-los pela disponibilidade em relação aos resíduos das madeiras tradicionalmente desejáveis para construção ou móveis, cada vez mais escassas e valorizadas economicamente e, também, pela oportunidade oferecida pela Empresa.

O aglutinante utilizado foi o cimento Portland CP IV-32 em função da disponibilidade nos armazéns de construção locais, preço, uso generalizado nas edificações populares e não necessita de encomendas ou requisições antecipadas. De acordo com ABCP (2002), esse cimento é indicado para uso geral, pisos industriais, meios agressivos (água do mar e esgotos), pré-moldados, entre outras aplicações. É acrescido de pozolonas e possui características de cura mais lenta, diminuição do calor de hidratação, aumento da resistência à compressão em idades avançadas e melhor trabalhabilidade.

A areia lavada, de uso geral em construções, foi obtida de reformas realizadas no entorno do Laboratório de Tecnologia Florestal do Departamento de Ciência Florestal da UFRPE.

3.2 PREPARO DOS MATERIAIS

Após as coletas dos materiais, os mesmos foram enviados e estocados no Laboratório Tecnologia Florestal da UFRPE.

Os resíduos lignocelulósicos foram pré-tratados através da imersão durante 15 dias em água em recipientes de polietileno e posteriormente secos em lonas plásticas ao ar livre durante o dia até serem considerados secos ao ar e acondicionados em invólucros de poliestireno. Após algumas semanas, foram novamente imersos em uma solução aquosa de hidróxido de sódio a 2% durante 24 h, secos e embalados nas condições anteriores até a sua posterior utilização nos compósitos com cimento e areia.

3.3 GRANULOMETRIA DAS PARTÍCULAS LIGNOCELULÓSICAS E DA AREIA

A granulometria dos resíduos de Maçaranduba e Bambu e a da areia lavada foram determinadas em um Agitador Eletromagnético Viatest, modelo 76733, equipado com um conjunto de peneiras, no Laboratório de Manejo e Conservação do Solo do Departamento de Agronomia da UFRPE (Figura 3).

Figura 3. Agitador vibratório Viatest, modelo 76733, com bateria de peneiras.



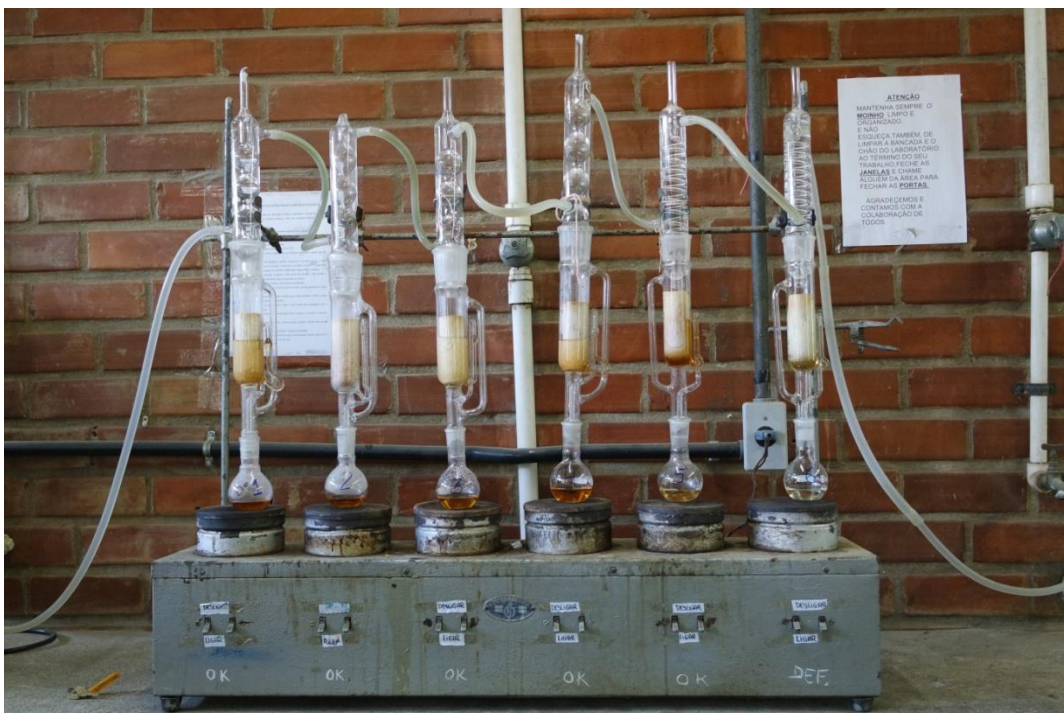
Foram coletados aleatoriamente 100 g de cada material seco ao ar e submetidos a ensaios no agitador. Conforme a NBR 7181:1988, o material deve ser peneirado até que menos de 1% passe por qualquer uma das peneiras.

3.4 DETERMINAÇÃO DOS TEORES DE EXTRATIVOS DOS RESÍDUOS DE MAÇARANDUBA

Os resíduos de Maçaranduba foram selecionados para determinação dos teores de extrativos em função de serem constituídos originalmente por finíssimas partículas, de acordo como o que preceitua as normas pertinentes.

As determinações dos teores de extrativos solúveis foram feitas em água quente e em uma solução 1:2 de etanol-éter de petróleo; as análises foram realizadas no Laboratório de Química Vegetal do Departamento de Química da UFRPE por meio do extrator Soxhlet, observado na Figura 4.

Figura 4. Aparato de extração química Soxhlet.



As análises químicas das partículas secas de Maçaranduba foram realizadas de acordo com os procedimentos recomendados pela norma NBR 7987:2001 e pelos trabalhos de Bezerra Neto e Barreto (2011) e Bezerra Neto (2014), substituindo o benzeno pelo éter de petróleo.

As análises químicas foram empregadas em material sem tratamento e pré-tratados, definidos no item 3.2.

A amostragem dos resíduos foi realizada de acordo com a NBR 14660:2003, sendo analisados 6 amostras por tratamento, ou seja, pós de serra de Maçaranduba sem tratamento, tratadas por imersões por 15 dias em água e 24 h em hidróxido de sódio a 2%. Para cada tratamento utilizou-se 04 g de partículas, totalizando 18 amostras.

3.5 TRAÇOS PRELIMINARES

Além da consulta as proporções dos compósitos representados no Quadro 1, diversas formulações preliminares foram empregadas para obtenção de um traço definitivo a ser empregado com o cimento-lignocelulósico-areia-água.

Diversas ações preliminares envolvendo formulações, traços e atuação dos aditivos químicos foram realizados e preparados em recipientes descartáveis de polietileno para auxiliar na tomada de decisão da melhor metodologia e traço a ser adotados no trabalho, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5. Formulações preliminares das misturas cimento-lignocelulósicos.



Nessas ações, empregadas para colaborar na escolha definitiva dos compósitos confeccionados para este trabalho, os aditivos químicos hidróxido de sódio, cloreto de cálcio e silicato de sódio foram usados para acelerar a cura ou pega do cimento ou inibir a ação dos açúcares e extrativos no cimento, quando for o caso.

Para eleger o traço decisivo para este trabalho, decidiu-se utilizar, durante o teste de compatibilidade, o melhor resultado entre aqueles submetidos a ensaios de compressão simples.

Definido o traço, aquele que apresentou maior resistência à compressão simples, foi utilizado para a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.

3.6 TESTES DE COMPATIBILIDADE

3.6.1 Temperatura máxima de hidratação

A determinação de compatibilidade dos lignocelulósicos foi realizada a partir da obtenção da temperatura máxima de hidratação de amostras padrão (cimento puro+água) e as de Maçaranduba e Bambu tratadas em 2% NaOH num sistema adiabático.

Os procedimentos empregados para determinação da compatibilidade foram os mesmos adotados por Velásquez et al. (2005):

- Amostra tratada: 200 g de cimento Portland, 20g de lignocelulósico e 100 ml de água destilada.
- Amostra padrão: 200 g de cimento Portland e 100 ml de água destilada.

As temperaturas máximas das amostras de maçaranduba e bambu tratados foram comparadas com a temperatura máxima da amostra padrão.

O coeficiente de aptidão ou compatibilidade (A), foi determinado de acordo com a equação adaptada por Vilela e Du Pasquier (1968) e utilizada por Viera et al. (2004):

$$A = \frac{T_m - T_0}{T_M - T_0} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

A – coeficiente de compatibilidade (%);

T_m – Temperatura máxima da amostra (°C);

T_0 - Temperatura ambiente (°C); e

T_M - Temperatura máxima da amostra padrão (°C).

Vilela e Du Pasquier (1968) classificam as madeiras como muito boas quando a compatibilidade está acima de 80%, boas entre 60 e 79%, regulares entre 50 e 59% e ruins quando o coeficiente de aptidão está abaixo de 50%.

Não foram realizados ensaios de compatibilidade com as partículas de madeira mista. Em função das dimensões e ausência de peneiras adequadas, as maravalhas de madeira mista não foram objeto de granulometria. No entanto, eram constituídas de maravalhas com dimensões diversas nos comprimentos, variando de 1,0 a 5,0 cm e espessuras de frações a aproximadamente 1,0 mm.

3.6.2 Ensaios não destrutivos e destrutivos

Os compósitos também foram avaliados por meio do uso de ensaios não destrutivos como o ultrassom, de acordo com Beraldo e Martins (2007) e destrutivos, como o ensaio de compressão simples desenvolvido por Lee et al. (1987).

Para determinação da compatibilidade através de ensaios não destrutivos, realizou-se ensaios de ultrassom no Laboratório de Tecnologia Florestal da UFRPE com o equipamento BP-7 da Steinkamp, com transdutores exponenciais de 45 kHz de frequência de ressonância acoplados, um de emissão e outro de recepção das ondas ultrassônicas, seguindo as recomendações do fabricante (Figura 6). O traço adotado para o cimento-bambu-areia-água foi respectivamente, 1:0,3:0,3:0,55. O aditivo químico utilizado foi o cloreto de cálcio a 11%.

Figura 6. Equipamento Steinkamp BP-7 para ensaios com ultrassom.



A velocidade do pulso ultrassônico (V_{pu}) varia em função do tempo de vida dos corpos-de-prova (BERALDO e MARTINS, 2007), sendo um procedimento de avaliação das alterações produzidas na mistura enquanto ocorrem as reações de pega e endurecimento do compósito. A amplitude máxima da V_{pu} é considerada um indicador apropriado do grau de compatibilidade entre a madeira e o cimento, segundo Beraldo e Balzamo (2009).

Com os dados de densidade dos corpos-de-prova e da V_{pu} determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico (E_{d1}) por meio da Equação (2):

$$E_{d1} = \rho (V_{pu})^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

E_{d1} – Módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom (MPa).

ρ – densidade do corpo-de-prova (g/cm^3).

V_{pu} – Velocidade do pulso ultrassônico (m/s).

Para determinar a compatibilidade cimento-lignocelulósico por meio de ensaios destrutivos, confeccionou-se corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm de vários traços e formulações; em seguida foram submetidos à compressão simples no Laboratório de Materiais e Estruturas (LabME) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco para caracterização desses compósitos. As amostras foram preparadas com capeamento nos topos com enxofre derretido (Figura 7), moldado e resfriado, de forma a torná-los lisos, paralelos, íntegros e regularizar a superfície de contato com as cabeças do equipamento de ensaio e, após esse tratamento, foram imediatamente testadas em uma Prensa Hidráulica Manual Solotest, com indicador digital de força e capacidade de 20 ton (Figura 8), conforme os procedimentos descritos pela NBR 12025:2012.

Figura 07. Corpos de provas de compressão simples capeados nas extremidades.



Figura 8. Prensa hidráulica manual Solotest.



3.7 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

Em razão das formulações e traços realizados, decidiu-se adotar o traço de 1:0,05:3,0:0,4 para a confecção dos compósitos cimento-lignocelulósico-areia-água, respectivamente.

A argamassa para os compósitos foi preparada manualmente em um bandeja de polietileno e uma colher de pedreiro. Inicialmente, o cimento foi adicionado a areia até obter uma mistura homogênea. Em seguida, acrescentou-se o respectivo resíduo lignocelulósico. Uma vez homogeneizada a mistura, a água foi colocada lentamente até formar uma massa consistente.

Corpos-de-prova dos compósitos cimento-lignocelulósicos foram preparados em moldes cilíndricos de aço de 5 x 10 cm (Figura 9) e besuntados internamente com óleo diesel de baixa viscosidade para facilitar a desmoldagem após a pré-cura.

Os moldes eram preenchidos totalmente com a pasta preparada antecipadamente. Durante a operação, impactos rápidos e repetitivos com a parte metálica da colher de pedreiro por alguns minutos provocavam vibrações nos moldes de modo a eliminar ou minimizar a presença de vazios no compósito. Após 24 h, realizava-se a desmoldagem do corpo de prova. As amostras foram então, acondicionadas por 28 dias para o completo endurecimento, de acordo com as especificações da ABCP (2002). Foram preparados 10 corpos de prova de cada resíduo proposto, maçaranduba, bambu e madeira mista, respectivamente, totalizando um universo de 30 corpos de prova.

Figura 9. Moldes cilíndricos de aço para confecção dos corpos de prova.



As determinações da densidade, do módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão (E_{d2}) e dos ensaios destrutivos de compressão simples dos corpos de prova foram realizados no Laboratório de Ciência da Madeira do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES.

A densidade foi obtida pela relação entre o peso e o volume da amostra, conforme os procedimentos da NBR 7190:1997. O peso foi obtido através de balança analítica de laboratório e o volume por meio de paquímetro digital de resolução 0,01 mm.

Os ensaios não destrutivos foram realizados utilizando-se o equipamento Stress Wave Timer, modelo 239A – da Metriguard, determinando o tempo de propagação de uma onda de tensão induzida pelo impacto de um pêndulo metálico nos corpos de prova. Esses, um a um, tiveram suas extremidades dispostas entre dois sensores, de emissão e recepção da onda de tensão gerada pelo pêndulo em todo o seu comprimento.

Com os dados adquiridos, determinou-se a velocidade da propagação da onda através da relação entre a distância entre os dois sensores (vão livre do corpo de prova) e o tempo de propagação da onda na amostra. O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido pelo produto da densidade pelo quadrado da velocidade de propagação da onda no compósito, metodologia também adotada por Nogueira e Ballarin (2008).

Os ensaios destrutivos foram realizados com a máquina universal de ensaios EMIC DL 10000, capacidade de 100 kN, conforme os procedimentos da NBR 12025:2012.

3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para verificar o efeito dos tratamentos sobre as propriedades químicas, físicas e mecânicas dos compósitos cimento-lignocelulosico-areia, realizou-se análise descritiva e posteriormente de variância (ANOVA) com o software Assistat 7.0 e, na existência de diferenças estatísticas entre médias, aplicou-se o teste de Tukey, ao nível de probabilidade de 95% de confiança.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

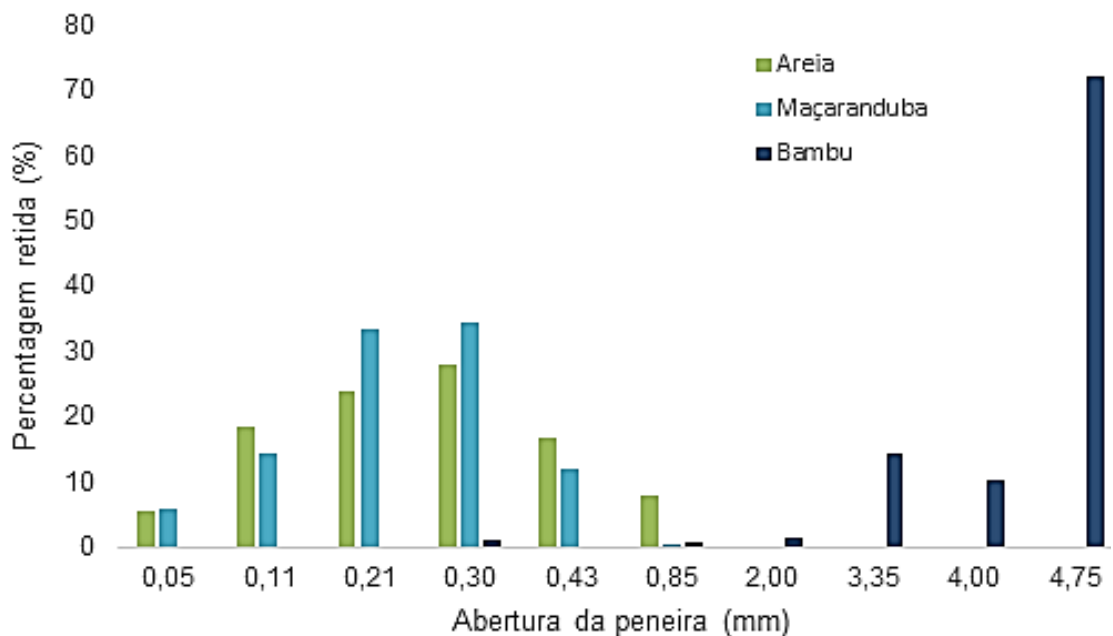
4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS

Os resultados granulométricos de Maçaranduba, do Bambu e da areia lavada estão na Figura 11.

A análise granulométrica da Maçaranduba indica que as partículas finas passantes na peneira de 0,425 mm compõem 87,97% do pó investigado, indicando grande área superficial disponível para o contato com o meio alcalino.

A granulometria dos resíduos de bambu indica desde frações de pó fino, partículas médias e ásperas até resíduos grosseiros sólidos, conforme pode ser visto na Figura 11. Os cavacos retidos acima da peneira de 4,00 mm são de grandes dimensões e compõem 82,52% dos resíduos de Bambu, apresentando menor área superficial de contato com o meio alcalino.

Figura 11. Histograma das percentagens retidas nas peneiras para a areia, Maçaranduba e Bambu.



Observa-se no Histograma que a areia lavada apresenta dimensões médias a finas, compondo cerca de 75,71% dos grãos com diâmetros abaixo de 0,6 mm, conforme a NBR 6502:1995 citada por Bastos. Para o Bambu, é evidente a presença quase total dos fragmentos retidos nas peneiras acima de 3,35 mm.

A determinação da granulometria é um procedimento habitual nesse tipo de pesquisa – para seleção, padronização, fins comparativos, entre outros objetivos. Mas não neste trabalho, pois as partículas foram empregadas integralmente, sem seleção ou padronização das dimensões na associação com o cimento e a areia, de forma a simular o uso sem restrições em uma possível produção em pequena escala.

Os resultados da granulometria aqui apresentados são apenas para estudos comparativos, porém não como controle na confecção dos compósitos de cimento e resíduos lignocelulósicos confeccionados.

4.2 TEORES DE EXTRATIVOS DE MAÇARANDUBA

Os teores de extrativos dos resíduos de Maçaranduba determinados sem tratamento e com pré-tratamentos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 2. Teores médios de extrativos dos resíduos de Maçaranduba

Maçaranduba	Água Quente	Etanol-Éter 1:2	Extrativos Totais
		(%)	
Sem tratamento	3,93 ^b (15,49)	1,92 ^b (20,15)	5,85 ^b (12,03)
Lavada	1,14 ^c (21,82)	2,17 ^b (14,39)	3,31 ^c (11,10)
2% NaOH	7,94 ^a (13,74)	3,29 ^a (27,97)	11,22 ^a (9,67)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Dados entre parêntesis referem-se ao coeficiente de variação (%).

Observa-se a presença de extrativos remanescentes mesmo após os pré-tratamentos realizados no pó de serra de Maçaranduba.

As partículas de Maçaranduba imersas por 15 dias em água, de acordo com a Tabela 2, ainda possui considerável teor de extrativos em comparação aos resíduos sem tratamento, ou seja, em estado natural. Considerando os extrativos totais, as partículas imersas ainda contêm 56,58% dos componentes químicos extraíveis dos resíduos não tratados. Por outro lado, o pré-tratamento com imersão em água retirou quase a metade (43,42%) das possíveis substâncias químicas inibidoras da pega do cimento Portland. Nazerian et al. (2011) concluem em suas pesquisas que os extrativos são os responsáveis por retardar a hidratação do cimento Portland.

As partículas de Maçaranduba pré-tratadas a 2% NaOH apresentaram elevada concentração de extrativos (11,22%) em comparação com os resíduos da Maçaranduba não tratada.

Trabalho conduzido por Lima et al. (2015) com partículas de *Pinus* submetidas a 12 diferentes pré-tratamentos também apresentaram teores de extrativos remanescentes, particularmente os submetidos a pré-extração com 5% NaOH.

Castro (2015), ao utilizar diferentes solventes para determinar os teores de extrativos de oito espécies tropicais da Amazônia, obteve para *Manilkara amazônica* conteúdos de 6,98% (água quente) e 13,52% (1% NaOH), quantidades superiores aos encontrados neste trabalho, cujo teor de extrativos totais para a Maçaranduba sem tratamento foi da ordem de 5,85%. No caso da extração com 1% NaOH de *M. amazônica* do trabalho de Castro (2015), os teores de extrativos foram 131,11% maiores do que a Maçaranduba analisada neste trabalho. Há de considerar, entretanto, que os resíduos de Maçaranduba foram provenientes de serragens de procedências distintas e as metodologias das análises químicas também são diferentes.

Araújo et al. (2014), determinaram para *M. huberi* teores de extrativos de 6,78% em água quente e de 8,19% de extrativos totais, também superiores aos dessa pesquisa.

Marzuki et al. (2011), ao trabalharem com *Leucaena leucocephala* de 16 anos, obtiveram 15,33% de extrativos com 1% NaOH como solvente. Abdalla e Abdelrahman (2013), por outro lado, obtiveram teor de 31,07% com a mesma solução e 20,19% em água fria para *Prosopis chilensis*. Mohammed (1999) *apud* Abdalla e Abdelrahman (2013), obteve teores de até 39,60% com 1% NaOH e 25,65% em água quente ao analisar quatro madeiras sudanesas. Fan et al. (2012), utilizaram como solvente NaOH 1% em dez madeiras tropicais de Camarões e obtiveram entre 14,80 e 29,06% de teores de extrativos.

A razão desses altos teores de extrativos com o emprego de NaOH como solvente está na provável remoção de hemiceluloses (LIMA et al., 2015) ou carboidratos de baixo peso molecular originários de hemiceluloses e celulose degradada, segundo Tappi (2002) *apud* Castro (2015).

Alguns pesquisadores como Sedan et al. (2008), para retirar o NaOH das fibras vegetais pré-tratadas a 6% NaOH, realizaram diversas lavagens em uma

solução de água destilada a 1% ác. acético para neutralizar o excesso de hidróxido de sódio. Em seguida, sucessivas lavagens com água destilada foram efetuadas até as fibras apresentarem pH neutro, removendo o NaOH,

Procedimento semelhante foi efetuado por Lima et al. (2015) com resíduos de *Pinus* pré-tratados em soluções de 1%, 3% e 5% NaOH, contudo, apenas com lavagem em água.

Segundo Bezerra Neto (2014), não existe um solvente universal que remova todos os extrativos, cada um atua em uma ou mais classes de substâncias, o que é importante quando se necessita um isolamento seletivo. Entretanto, Yang e Jaakkola (2011) informam que a acetona possui a capacidade de dissolver todos os tipos de extrativos, tornando-se indicada para determinar a quantidade total de extrativos.

Segundo NBR 7987:2001, Yang e Jaakkola (2011), Bezerra Neto (2014) e Castro (2015), os extrativos solúveis em água incluem sais, taninos, compostos voláteis, açúcares, gomas, polissacarídeos, amido, cicloses, ciclitois, corantes e várias substâncias fenólicas. O éter extrai graxas, ceras e expressiva quantidade de resinas. O álcool retira os ácidos resinosos, ácidos graxos, esteróides, terpenos, produtos de oxidação de resinas e produtos de degradação da celulose e lignina.

É evidente, pelos resultados obtidos neste trabalho, que mesmo com os métodos empregados para reduzir ou remover os extrativos das partículas de Maçaranduba, quantidades consideráveis dessas substâncias continuam presentes, conforme a Tabela 2. Permanecem 3,31% de extrativos totais nas partículas tratadas por imersão em água e 11,22% nas tratadas com 2% NaOH.

As partículas imersas em NaOH a 2% foram utilizadas para a confecção dos compósitos cimento-lignocelulósico-areia-água, com resultados consistentes.

4.3 COMPATIBILIDADE DO CIMENTO COM RESÍDUOS DE BAMBU E MAÇARANDUBA

4.3.1 Temperatura máxima de hidratação

Na Tabela 3, constam os dados da temperatura de hidratação das amostras estudadas.

Tabela 3. Avaliação dos coeficientes de compatibilidade (A) das misturas cimento-maçaranduba e cimento-bambu.

Tempo (h)	Temperatura (°C)		
	Padrão	Maçaranduba	Bambu
1	26,80	28,20	29,00
2	27,20	28,60	30,20
3	30,80	29,20	31,50
4	32,80	30,20	32,20
5	39,50	32,40	33,00
6	40,60	32,70	34,40
7	42,50	33,10	35,80
8	41,40	34,70	37,30
9	40,80	35,40	36,00
10	39,60	35,80	35,20
11	37,80	35,10	33,20
12	35,40	34,80	32,10
13	33,80	33,20	31,50
14	32,10	31,40	30,10
15	32,00	30,00	29,90
16	30,50	29,40	29,50
17	29,10	28,70	28,90
18	28,60	28,40	28,70
A (%)		53,79	64,14

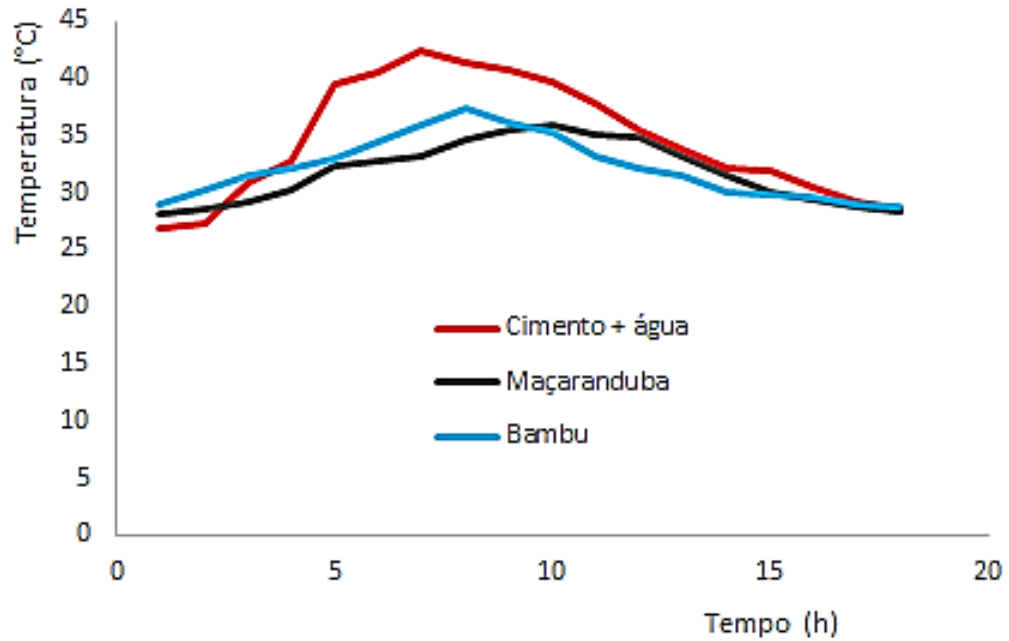
A temperatura máxima de hidratação da amostra padrão (cimento puro+água), 42,50 °C, ocorreu 7 h após o início do processo. Observa-se um maior desprendimento de calor na amostra de cimento-bambu às 8 h (37,30 °C) e na amostra cimento-maçaranduba (35,80 °C) às 10 h, o que diminui a ação das substâncias retardadoras da pasta que provocam o prolongamento do tempo de endurecimento. A temperatura ambiente no Laboratório de Tecnologia Florestal foi de 28 °C.

Os coeficientes de compatibilidade obtidos para o Bambu (64,14%) e a Maçaranduba (53,79%) qualificam positivamente o uso desses resíduos no emprego como matérias primas para a produção de tijolos ou elementos cimento-madeira ou cimento-bambu. No caso do Bambu o índice de compatibilidade é considerado bom e o da Maçaranduba, regular.

Na Figura 12, observam-se as curvas de hidratação para cada amostra em que as máximas temperaturas dos compósitos cimento-maçaranduba e cimento-bambu foram obtidas entre 1 - 3 h após a temperatura máxima da amostra padrão (cimento+água), concordando com os resultados obtidos por Sanderman e Köler

(1964); Moslemi e Lim (1984); Vilela e Du Pasquier (1968); Ayala et al. (1991) e Viera et al. (2004).

Figura. 12. Curvas de hidratação do cimento, da Maçaranduba e do Bambu.



4.3.2 Ensaios não destrutivos

Na Tabela 3 encontram-se os dados de V_{pu} e E_{d1} para o compósito cimento-bambu-areia e 11 % de cloreto de cálcio para avaliar o grau de compatibilidade através do ensaio não destrutivo do ultrassom.

Tabela 3. Resultados da velocidade do pulso ultrassônico (V_{pu}) e do módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom (E_{d1}) do compósito cimento-bambu.

Propriedade	Máximo	Médio	Mínimo	Desvio padrão
V_{pu} (m/s)	2190	1820	1200	280
E_{d1} (MPa)	1130	790	320	230

Observa-se que no processamento obtido durante a aplicação do método não destrutivo de ultrassom obteve-se um resultado da V_{pu} de 1820 m/s, demonstrando compatibilidade satisfatória entre o cimento e o bambu tratado, considerando que velocidades obtidas entre 1500 a 2000 m/s denotam qualidade aceitável para essa característica (BERALDO e BALZAMO, 2009). Os autores, ao analisar compósitos

de cimento Portland ARI 50 e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, obtiveram uma V_{pu} de 1480 m/s.

Em concordância com Teixeira e Moslemi (2001), através da densidade do compósito e da V_{pu} foi possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom (E_{d1}) em 790 MPa. O resultado obtido do E_{d1} é muito inferior quando comparado com o concreto comum (BERALDO e BALZAMO, 2009). Apesar desse tipo de compósito indicar um desempenho não estrutural, pode apresentar condições satisfatórias quanto a sua capacidade de tornar a construção mais leve, além de sugerir usos em isolamento térmico e absorção acústica.

4.3.3 Ensaios destrutivos

No Tabela 4 são apresentados os resultados preliminares de traços consultados em vários trabalhos e ou na adequação as condições exigidas no momento do preparo dos corpos de prova com o objetivo de determinar a compatibilidade do cimento-lignocelulósico-areia através de ensaios de compressão simples realizados na UFPE e contribuir na escolha do traço definitivo adotado nesse trabalho.

Tabela 4. Formulações preliminares para subsidiar a adoção de traço definitivo por meio de ensaios de compressão simples.

C	Mm	B	P	Ar	Ag	Aq	Traço C:(M-B-P):Ar:Ag	f_c (MPa)	Dias	CP
200	-	60	-	60	130	11,5	1:0,3:0,3:0,65	2,5	136	01
200	-	70	-	70	150	11,5	1:0,35:0,35:0,75	0,75	93	01
200	-	70	-	70	150	11,5	1:0,35:0,35:0,75	2,62	80	03
200	-	70	-	70	110	11,5	1:0,35:0,35:0,55	4,03	68	05
240	145	-	-	260	200	11,8	1:0,6:1,08:0,83	3,39	58	05
100	5	-	-	300	40	-	1:0,05:3:0,4	6,12	40	05
100	-	5	-	300	40	-	1:0,05:3:0,4	7,76	33	05
100	-	-	5	300	40	-	1:0,05:3:0,4	7,39	28	05

C - cimento; Mm – mad. mista; B – bambu; P – pó maçanduba; Ar – areia; Ag – água; Aq – aditivos químicos. f_c – resistência a compressão simples (média); Dias – tempo decorrido desde a confecção do cp até o ensaio. CP – quantidades de amostras testadas. A serragem de madeira mista, o bambu e o pó de serra foram imersos em solução de água + hidróxido de sódio a 2% durante 24 h e secos ao ar livre.

Verifica-se que os resultados obtidos com os traços são bastante díspares, porém o traço empregado nos três últimos tratamentos foi considerado o mais promissor pela elevada resistência a compressão e adotado para avaliação final dos

compósitos. O traço adotado foi 1:0,05:3:0,4, respectivamente, cimento-lignocelulósico-areia-água.

A resistência a compressão (f_c) foi de 7,76 MPa para o Bambu, 7,39 MPa para a Maçaranduba e 6,12 MPa para a madeira mista.

Na Tabela 4 observa-se uma relação inversa entre a resistência a compressão e o teor de lignocelulósicos, comportamento verificado também por Mahzabin et al. (2013) e Stevulova e Hospodarova (2015).

Beraldo e Sampaio (2002) *apud*. Beraldo e Carvalho (2004) obtiveram resistência a compressão axial média de 3,80 MPa para *Bambusa vulgaris* em compósitos a base de cimento CP II E-32 e CP V ARI.

Os tratamentos empregados para reduzir o efeito das substâncias inibidoras do Bambu e da Maçaranduba obtiveram resultados satisfatórios, considerando que nas curvas de hidratação as máximas temperaturas nos compósitos cimento-areia foram obtidas 1 a 3 horas após a temperatura máxima da amostra padrão de cimento.

Segundo os resultados obtidos, com um índice de compatibilidade de 64.14 % e V_{pu} acima de 1820 m/s, os resíduos de Bambu tratados podem ser empregados na elaboração de elementos não estruturais para a construção civil, a exemplo de paredes divisórias e isolamentos acústicos e térmicos, considerando o seu módulo de elasticidade dinâmico entre 320 – 1130 MPa.

Da mesma forma, o uso da resistência à compressão simples como índice da compatibilidade do cimento com a madeira proposto por Lee et al. (1987), mostrou-se adequado como ferramenta de decisão para avaliar os compósitos cimento-lignocelulósicos. Beraldo e Carvalho (2004) comentam que ocorre incompatibilidade quando a resistência é menor que 1,0 MPa. Deve-se buscar uma compressão axial superior a 4,0 MPa. Por esse critério, as formulações e traço adotados nessa pesquisa superam esse atributo, conforme a Tabela 4. O Bambu obteve 7,76 MPa, a Maçaranduba 7,39 MPa e a madeira mista 6,12 MPa.

4.4 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

Após a definição do traço, obteve-se os dados tecnológicos dos compósitos com ensaios de densidade, compressão simples e ondas de tensão, como mostra a Tabela 5.

De acordo com os dados, não houve diferença significativa entre as densidades dos compósitos cimento-lignocelulósicos.

Em relação a resistência a compressão simples e o módulo de elasticidade dinâmico, os compósitos cimento-bambu e cimento-maçaranduba se equivalem estatisticamente. A madeira mista, para ambas características tecnológicas, apresentou diferença significativa a nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Tabela 5. Valores médios de densidade (D), compressão simples (f_c), módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão (E_{d2}) dos compósitos cimento, lignocelulósicos e areia.

	D (g/cm ³)	f_c (MPa)	E_{d2} (MPa)
Bambu	1,88 ^a (2,41)	10,08 ^a (14,74)	8920 ^a (10,15)
Maçaranduba	1,85 ^a (3,07)	9,76 ^a (14,83)	8327 ^a (10,80)
Madeira mista	1,85 ^a (2,63)	7,26 ^b (23,95)	7264 ^b (5,65)

D –densidade; f_c – resistência a compressão simples; E_{d2} – módulo de elasticidade dinâmico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Dados entre parêntesis referem-se ao coeficiente de variação (%).

Macêdo et al. (2012) obtiveram em compósitos confeccionados com uma mistura dos resíduos de seis espécies amazônicas, resistência a compressão axial entre 3,25 MPa para os lavados em água quente por 2 h e 8,06 MPa para os da condição anterior com a adição de 5% de cloreto de cálcio.

Lima (2005), obteve em compósitos preparados com a mistura de resíduos de nove espécies amazônicas com teor de 0,485% de aditivo sem cloreto, resistência a compressão axial de 25,63 MPa para as partículas lavadas em água quente e 27,67 MPa para as mineralizadas com sulfato de alumínio, não havendo diferença estatística entre os tratamentos.

Santos (2009), utilizou cimento Portland CP II E-32, solo, 5% de resíduos de madeira provenientes da construção civil, obtendo resistência a compressão simples de 1,82 MPa e módulo de elasticidade dinâmico de 120 MPa. O autor informa que de acordo com NBR 8491 (1984), a resistência a compressão simples de tijolos maciços de solo-cimento após sete dias de cura não deve ser inferior a 2,0 MPa. Também não deve ser inferior a essa tensão, os blocos vazados de solo-cimento após vinte e oito dias de cura, pela NBR 10834 (1984).

Considerando esse limite mínimo de resistência a compressão, os compósitos cimento-bambu-areia (10,08 MPa), cimento-maçaranduba-areia (9,76 MPa) e cimento-madeira mista-areia (7,26 MPa) satisfazem plenamente esse requisito especificado pelas normas citadas por Santos (2009), sendo indicados à execução de alvenaria sem função estrutural.

O método não destrutivo de ondas de tensão constitui uma ótima ferramenta para a determinação do Módulo de elasticidade dinâmico dos compostos de cimento-lignocelulósico-areia. As médias do Bambu com 8920 MPa e as da Maçaranduba com 8327 MPa não apresentaram diferença estatística ao nível de 5% pelo teste de Tukey. Houve diferença estatística das médias da madeira mista, com 7264 MPa, com os demais compósitos.

As propriedades químicas dos lignocelulósicos são os fatores determinantes para o sucesso do presente trabalho. A concentração dos químicos nos resíduos de maçaranduba, “madeira mista” e bambu são suficientes para impedir a hidratação e, conseqüentemente, a cura (pega, endurecimento) do cimento, o que inviabilizaria o trabalho. Para tanto, foi necessário utilizar os meios disponíveis para tornar esses materiais lenhosos compatíveis com o cimento.

Nazerian et al. (2011) concluem que os extrativos aumentam o tempo de hidratação da pasta de cimento e decrescem a resistência a compressão.

Verificou-se a presença residual de extrativos nos pós de serra pré-tratados de Maçaranduba por imersão em água e imersão a 2% NaOH, como observado na Tabela 2. Embora o pré-tratamento do pó de Maçaranduba com 2% NaOH tenha apresentado teores totais de extrativos residuais na ordem de 11,22%, essas substâncias não foram suficientes para impedir a pega e hidratação do cimento nos compósitos, oferecendo resultados satisfatórios nos ensaios de compressão simples e módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão.

É possível o uso de fragmentos lenhosos de dimensões e geometrias variadas, alguns acima de 5,0 cm, na associação com o cimento Portland CP IV - 32, como demonstrou esse trabalho. A iniciativa de utilizar partículas lenhosas nas condições em que são geradas durante o processamento nas serrarias, construtoras ou como rejeitos da atividade industrial, contribui para reduzir os custos de produção dos compósitos a base de cimento, pois suprime etapas desnecessárias ao preparo dos compósitos.

O acúmulo atual de pesquisas com resultados favoráveis ao uso de compósitos madeira-cimento é um incentivo para que esse trabalho possa contribuir com mais informações para o conhecimento dos fenômenos envolvidos nessa interação entre os lignocelulósicos e o meio alcalino.

Neste trabalho os dados das características tecnológicas dos compósitos não são determinados para fins estruturais, apenas nas condições onde as exigências de solicitações forem moderadas.

Com a grande variedade de trabalhos sobre o assunto e o crescente interesse de aproveitar os resíduos gerados a partir de material lenhoso, há necessidade de padronizar uma metodologia para melhor avaliar a compatibilidade destes com o cimento. Os dados gerados nos trabalhos são comparados entre si independente dos procedimentos adotados, condições laboratoriais, nível tecnológico, uso de um traço similar, origem, condições e dimensões da matéria-prima, entre outros, de forma que podem induzir a erros ou acertos equivocados.

Entretanto, a comparação dos resultados continua sendo referência entre as pesquisas.

A grande divergência entre os dados obtidos por inúmeros pesquisadores torna complexa a comparação dos resultados entre os compósitos de cimento Portland com resíduos de origem vegetal. O tipo de resíduo lignocelulósico, procedências, dimensões, geometrias, seleção granulométrica, pré-tratamentos, metodologia, cimento, confecção das amostras, traços, água, agregados, aditivos químicos, entre outros fatores, interferem decididamente no comportamento do compósito. Todos esses fatores interagem entre si, de forma que a alteração de um deles pode afetar positiva ou negativamente o comportamento do compósito. Dessa forma, uma análise dos dados entre as pesquisas deve considerar, rigorosamente, os mesmos parâmetros envolvidos. No entanto, é prática corrente avaliar os resultados entre os diversos trabalhos, independente das ações mencionadas acima.

Para isso, a normatização dos procedimentos do cimento Portland com a biomassa lignocelulósica deve ser levada em consideração pelas instituições e pesquisadores envolvidos, de forma a aprimorar os compósitos e torna-los mais eficazes para o uso a que se destinam. Malasia, Índia, Tailândia, Filipinas, Myanmar, Nova Zelândia e Grã Bretanha, são alguns dos países que adotam normas sobre o assunto.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- Dentre as três metodologias empregadas para determinar o grau de compatibilidade do cimento, o da resistência a compressão simples apresentou resultados mais evidentes e de melhor compreensão.
- Os pré-tratamentos utilizados reduziram a inibição do cimento pelas partículas lignocelulósicas.
- As dimensões das partículas não influenciaram significativamente a densidade dos compósitos.
- As dimensões das partículas não tiveram efeitos significativos na resistência a compressão simples e no módulo de elasticidade dinâmico (E_{d2}) dos compósitos cimento-maçaranduba e cimento-bambu.
- Os métodos não destrutivos de ultrassom e ondas de tensão constituem ferramentas eficazes para a determinação dos módulos de elasticidade dinâmicos dos compósitos de cimento-lignocelulósico-areia.
- As resistências a compressão simples assinalam para uma utilização não estrutural dos compósitos cimento-lignocelulósicos.
- Em que pese a baixa temperatura de hidratação, o cimento Portland CP IV - 32 apresentou uso adequado com os resíduos lignocelulósicos tratados.
- É necessário criar as condições que inicie o processo de normatização dos procedimentos que envolvam especificações, requisitos, ensaios e classificação dos compósitos cimento-lignocelulósicos.

6. REFERÊNCIAS

ABDALLA, A.M.A.; ABDELRAHMAN, H.A. Suitability of *Prosopis chilensis* (mesquite) wood for cement bonded aggregates. **Journal of Forest Products & Industries**, Silicon Valley, USA, v. 2, n. 4, p. 16-21, 2013.

ABDALLAH, A.M.A. **Effect of some technological factors on the physical and mechanical properties of *Ailanthus excelsa* wood-cement aggregate**. 2006. 76 f. Thesis (Master of Science in Forestry) - University of Khartoum, Khartoum.

ADAMS, S.H. **The extractive content of scottish roundwood**. Edinburgh: Edinburgh Napier University. 48p. 2015. Disponível em: <<http://researchrepository.napier.ac.uk/9296/1/The%20Extractive%20Content%20of%20Scottish%20Roundwood%20-%20October%202015.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

AHMAD, S. et al. High performance self-consolidating cementitious composites by using micro carbonized bamboo particles. **Materials and Design**, Surrey, England, v. 76, p. 223-229, 2015.

ALBERTO, M.M.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A. Compatibility of some tropical hardwoods species with Portland cement using isothermal calorimetry. **Forest Products Journal**, Madison, USA, v. 50, n. 9, p. 83-88, 2000.

ARAUJO, A. J. C.; FERREIRA, V. R. S.; MOUTINHO, V. H. P. Determinação do teor de extrativos presentes em resíduos madeiros de muiracatiara (*Astronium lecontei* Ducke) e maçaranduba (*Manilkara huberi* Ducke) com diferentes métodos de extração. In: II SEMINÁRIO DE PESQUISAS CIENTÍFICAS DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, 2., 2014, Santarém, Pará. **Anais...** Santarém, Pará: ICMBio-MMA, 2014. p. 133-137.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28 p. (BT-106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**. Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Brasília, DF: ABNT, 2012. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14660**. Madeira – Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7987**. Madeira - Preparação para análise química. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 13 p.

AYALA, K.M. et al. Aptitud del material de raleo de tres especies forestales para formar aglomerados con cemento. **Revista Forestal Baracoa**, La Habana, Cuba, v. 21, n. 1, p. 59-73, 1991.

AZRIEDA, A.R.N. et al. Hydration performance of cement-bonded wood composites - compatibility assessment of six pioneer forest species. **Borneo Science**, Sabah, Malaysia, v. 25, p. 47-57, 2009.

BARACHO Jr, E. **Anatomia da madeira - Notas de aula**. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2012. 62 p.

BASHER, A.B.A. **Effect of some technological factors on some properties of *Acacia seyal* (Talh) wood-cement aggregates**. 2005. 101 f. Thesis (Master of Science in Forestry) - University of Khartoum, Khartoum.

BASTOS, C. Textura e granulometria dos solos. 2016. DMC/FURG. Disponível em: <<ftp://ftp.ifes.edu.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Apostila%20FURG%20Solos/05.3-%20TEXTURA.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2016.

BEJÓ, L.; TAKÁTS, P.; VASS, N. Development of cement bonded composite beams. **Acta Silvatica & Lignaria Hungarica**, Sopron, Hungary, v. 1, p. 111-119, 2005.

BERALDO, A.L.; CARVALHO, J.V. Compósito *Eucalyptus grandis*-cimento Portland. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 150-161, 2004.

BERALDO, A.L. Compósitos biomassa vegetal e cimento - cbvc- Textos didáticos. Universidade Estadual de Campinas, 2006. Disponível em: <<http://apuama.org/wp-content/uploads/2012/06/CBVC-Beraldo.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2013.

BERALDO, A. L.; MARTINS, S. C. F. Destructive and non-destructive evaluation of bamboo chips-Portland cement composites. **Journal of Bamboo and Rattan**, Kerala, India, v. 6, n. 6, p. 61-70, 2007.

BERALDO, A.L.; BALZAMO, H. Compuestos no-estructurales de cementos comerciales y aserrín de maderas argentinas. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, Chile, v. 11, n. 3, p. 233-250, 2009.

BERALDO, A.L.; CHEN, F.K.C.H.; AZZINI, A. Telhas onduladas de bambu-cimento. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 3., **Anais...** São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://apuama.org/index.php/2012/08/06/telhas-onduladas-de-bambu-ciemnto/>>. Acesso em: 06 jun. 2013.

BERALDO, A.L.; SILVA, L.E. Mortero de cemento Portland y arena, modificado por la adición de partículas de bambú. 2009. Disponível em: <<http://www.apuama.org/mortero-de-cemento-portland-y-arena-modificado-por-la-adicion-de-particulas-de-bambu/>>. Acesso em: 06 jun. 2013.

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L.P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife, universidade Federal Rural de Pernambuco. 2011. 261 p.

BEZERRA NETO, E. **Introdução à química da madeira**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2012.

BLANKENHORN, P.R. et al. Temperature and moisture effects on selected properties of wood fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, USA, v. 29, n. 5, p. 737- 741, 1999.

BOUSTINGORRY, P. et al. The influence of wood aqueous extractives on the hydration kinetics of plaster. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, USA, v. 35, n. 11, p. 2081-2086, 2005.

CABANGON, R.J. et al. Effect of post-harvest storage on the suitability of *Acacia mangium* for the manufacture of wood-wool cement boards. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Canberra. **Proceedings...** Canberra, Australia: ACIAR, 2000. p. 97-104.

CARVALHO, J. V. **Aproveitamento de resíduos particulados da madeira de Eucalipto Grandis na fabricação de compósitos a base de cimento Portland**. 2000. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CASTRO, V.G. **Espécies da amazônia na produção de compósitos madeira-cimento por vibro-compactação**. 2015. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

COATANLEM, P.; JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F. Lightweight wood chipping concrete durability. **Construction and Building Materials**, Guildford, England, v. 20, n. 9, p. 776–781, 2006.

COUTTS, R.S.P. Autoclaved bamboo pulp fibre reinforced cement. **Cement and Concrete Composites**, Barking, England, v. 17, n. 2, p. 99-106, 1995.

DANTAS FILHO, F. P. **Contribuição ao estudo para aplicação do pó de serra da madeira em elementos de alvenaria de concreto não estrutural**. 2004. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DAS, A.K. et al. Physical and mechanical properties of bamboo wastage cement bonded board. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, Bangalore, India, v. 9, n. 2, p. 170–175, 2012.

DEL MENEZZI, C.H.S.; CASTRO, V.G.; SOUZA, M.R. Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepcion, Chile, v. 9, n. 2, p. 105-115, 2007.

DOUDART de la GRÉE, G.C.H.; YU, Q.L.; BROUWERS, H.J.H. Wood-wool cement board: potential and challenges. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON-TRADITIONAL CEMENT AND CONCRETE, 5., 2014, Brno. **Proceedings...** Brno, Czech Republic: NOV PRESS, 2014. p. 279-282.

EVANS, P.D. Summary: An introduction to wood-cement composites. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Canberra. **Proceedings...** Canberra, Australia: ACIAR, 2000. p. 07-10.

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

FERNANDEZ, E.C.; TAJA-ON, V. The use and processing of rice straw in the manufacture of cement-bonded fibreboard. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Canberra. **Proceedings...** Canberra, Australia: ACIAR, 2000. p. 49-54.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook** - Wood as an engineering material. Centennial edition. Madison, USDA, 2010. 508 p.

FRYBORT, S. et al. Cement bonded composites - a mechanical review. **BioResources**, Raleigh, USA, v. 3, n. 2, p. 602-626, 2008.

FRYBORT, S. et al. Determination of the bond strength of treated wood strands embedded in a cement matrix by means of a pull-out test. **European Journal of Wood and wood Products**, Berlin, v. 68, n. 14, p. 407-414, 2010.

FRYBORT, S. et al. Investigations of the mechanical interactions at the interface of wood-cement composites by means of electronic speckle pattern interferometry. **BioResources**, Raleigh, USA, v. 7, n. 2, p. 2483-2495, 2012.

GAZOLA, A.P. **Argamassas de assentamento e revestimento fabricadas com compósito de cimento-madeira: serragem da madeira de *Pinus taeda***. 2007. 110 f. Monografia (Engenharia Civil) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão.

HERMAWAN, D. et al. Manufacturing oil palm fronds cement-bonded board cured by gaseous or supercritical carbon dioxide. **Journal of Wood Science**, Berlin, v. 48, n. 1, p. 20-24, 2002.

HOYOS, C.G.; CRISTIA, E.; VÁZQUEZ, A. Effect of cellulose microcrystalline particles on properties of cement based composites. **Materials and Design**, Surrey, England, v. 51, p. 810-818, 2013.

ISHIKURA, Y.; ABE, K.; YANO, H. Bending properties and cell wall structure of alkali-treated wood. **Cellulose**, Berlin, v. 17, n. 1, p. 47-55, 2010.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação do potencial de utilização da madeira *Schizolobium amazonicum* "Paricá" e *Cecropia hololeuca* "Embaúba" para produção de painéis cimento-madeira. Lavras, **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 303-308, 2012.

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

JUENGER, M.C.G.; JENNINGS, H.M. New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, USA, v. 32, n. 3, p. 393–399, 2002.

KARADE, S.R.; IRLE, M; MAHER, K. Assessment of wood-cement compatibility: a new approach. **Holzforschung**, Berlin, v. 57, n. 6, p. 672-680, 2003.

KARADE, S.R. Optimisation of water-cement ratio for determination of wood-cement compatibility. In: NCB INTERNATIONAL SEMINAR ON CEMENT AND BUILDING MATERIALS, 9., 2005, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: CSIR, 2005. v. 2, p. 353-360.

KNILL, C.J.; KENNEDY, J.F. Degradation of cellulose under alkaline conditions. **Carbohydrate Polymers**, Barking, England, v. 51, n. 3, p. 281-300, 2003.

KOLLMANN, F.P.P.; COTÉ JR, W.J. **Principles of wood science and technology - Solid wood**. New York: Springer-Verlag, 1968. 592 p.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus* spp na produção de painéis de cimento-madeira**. 2000. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LEE, A.W.C. et al. Effect of cement/wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time, and compressive strength of wood-cement mixtures. **Wood and Fiber Science**, Monona, USA, v. 19, n. 3, p. 262-268, 1987.

LI, Y. Wood-polymer composites. In: TESINOVA, P. (Ed.). **Advances in composite materials: analysis of natural and man-made materials**. 2011. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/advances-in-composite-materials-analysis-of-natural-and-man-made-materials/wood-polymer-composites/>>. Acesso em 19 out. 2015.

LIMA, A.M. **Avaliação de tratamentos físicos na resistência à compressão de compósito cimento-madeira à base de resíduos de serraria da Zona Metropolitana de Belém**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém.

LIMA, A.J.M. **Utilização de resíduo de *pinus* spp e materiais cimentícios alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural**. 2009. 282 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LIMA, A.J.M.; IWAKIRI, S.; LOMELÍ-RAMÍREZ, M.G. Study of the interaction of portland cement and *Pinus* wood for composites using bragg sensors in optical fibers. **BioResources**, Raleigh, USA, v. 10, n. 2, p. 6690-6704, 2015.

MACÊDO, A.N. et al. Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento-madeira. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, p. 658-667, 2011.

MACÊDO, A.N.; SOUZA, A.A.C.; POMPEU NETO, B.B. Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da Região Amazônica. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 131-150, 2012.

MALTESE, C. et al. Effects of setting regulators on the efficiency of an inorganic acid based alkali-free accelerator reacting with a Portland cement. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, USA, v. 37, n. 4, p. 528-536, 2007.

MARZUKI, A.R. et al. Effects of wood:cement ratio on mechanical and physical properties of three-layered cement-bonded particleboards from *Leucaena leucocephala*. **Journal of Tropical Forest Science**, Kuala Lumpur, Malaysia, v. 23, n. 1, p. 67-72, 2011.

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

MATOSKI, A.; IWAKARI, S. 2007. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de cimento-madeira utilizando farinha de madeira com granulometria controlada. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 2, p. 149-158, 2007.

MAHZABIN, S.; HAMID, R.; BADARUZZAMAN, W.H.W. Evaluation of chemicals incorporated wood fibre cement matrix properties. **Journal of Engineering Science and Technology**, Selangor, Malaysia v. 6, n. 4, p. 385-398, 2013.

MIYATAKE, A. et al. Manufacture of wood strand-cement composite for structural use. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Canberra. **Proceedings...** Canberra, Australia: ACIAR, 2000. p. 148-152.

MOREIRA, A.B.S.; MACÊDO, A.N.; SOUZA, P.S.L. Masonry concrete block strength compound with sawdust according to residue treatment. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 34, n. 3, p. 269-276, 2012.

MOSLENI, A. A.; LIM, Y. T. Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, USA, v. 34, n. 7-8, p. 22-26, 1984.

MÜLLER, I. **Influence of Cellulose Ethers on the Kinetics of Early Portland Cement Hydration**. 2006. 114 f. (PhD thesis) - Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

NA, B.; WANG, Z.; WANG, H.; LU, X. Wood-cement compatibility review. **Wood Research**, Bratislava, Slovak Republic, v. 59, n. 5, p. 813-826, 2014.

NAZERIAN, M.; GOZALI, E.; GHALEHNO, M.D. The influence of wood extractives and additives on the hydration kinetics of cement paste and cement-bonded particleboard. **Journal of Applied Sciences**, Pakistan, v. 11, n. 12, p. 2186-2192, 2011.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A.W. efeito da idade na qualificação mecânica da madeira serrada de *eucalyptus* sp. com uso de ensaios não-destrutivos. Botucatu, **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 23, n. 3, p. 74-94, 2008.

OKINO, E.Y.A. et al. Chapa aglomerada de cimento-madeira de *Hevea brasiliensis* Mull. Arg. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 451-457, 2004.

PAPADOPOULOS, A.N.; NTALOS, G.A.; KAKARAS, I. Mechanical and physical properties of cement-bonded OSB. **Holz als Roh - und Werkstoff**, Berlin, v. 64, n. 6, p. 517-518, 2006.

PARCHEN, C.F.A. **Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com compactação vibro dinâmica**. 2012. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PARCHEN, C.F.A. et al. Vibro-dynamic compression processing of low-density wood-cement composites. **European Journal of Wood and wood Products**, Berlin, v. 74, n. 1, p. 75–81, 2016.

PEHANICH J.L.; BLANKENHORN P.R.; SILSBEE, M.R. Wood fiber surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, USA, v. 34, n. 1, p. 59–65, 2004.

PEREIRA, H.; GRAÇA, J.; RODRIGUES, J.C. Wood chemistry in relation to quality. In: BARNETT, J. R.; JERONIMIDIS, G. (Ed.) **Wood quality and its biological basis**. Boca Raton: Blackwell Publishing; CRC Press, 2003. p. 53-86.

PESCHARD, A. et al. Effect of polysaccharides on the hydration of cement suspension. **Journal of the European Ceramic Society**. Oxford, England, v. 26, n. 8, p. 1439-1445, 2006.

PFEIL, W.; PFEIL, M. S. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2009. 296 p.

PIMENTEL, L.L.; BERALDO, A.L. Efeito de tratamentos sobre a resistência à compressão de compósito pinus-cimento. 2000. Disponível em: <<http://apuama.org/index.php/2012/08/04/efeito-de-tratamentos-sobre-a-resistencia-a-compressao-de-compositos-pinus-cimento-2/>>. Acesso em: 20 mai. 2013.

PIMENTEL, L.L.; CAMARINI, G. Avaliação de compósitos biomassa vegetal-cimento modificados por polímero. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n. 1, p. 26-33, 2005.

POWELL, M.A.; WEBBER, J.F.; EATON, R.A. Changes in moisture, soluble carbohydrate and bacterial numbers during water storage of pine. **Forest products Journal**, Madinson, USA, v. 50, n. 3, p. 74-80, 2000.

PRINCE, W.; ESPAGNE M.; AITCIN, P.C. Ettringite formation: A crucial step in cement superplasticizer compatibility. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, USA, v. 33, n. 5, p. 635–641, 2003.

QUIROGA, A.; RINTOUL, I. Mechanical properties of hierarchically structured wood–cement composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, England, v. 84, p. 253-260, 2015.

QUIROGA, A.; MARZOCCHI, V.; RINTOUL, I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and of populus euroamericana wood fibers. **Composite Part B - Engineering**, Oxford, England, v. 84, p. 25-32, 2016.

RAZUMOV, E.Y. et al. Studies on mechanical properties of composite materials based on thermo modified timber. **Drvna Industrija**, Zagreb, Croatia, v. 64, n. 1, p. 3-8, 2013.

RONQUIM, R.M. et al. Physical and mechanical properties of wood-cement composite with lignocellulosic grading waste variation. **International Journal of Composite Materials**, Rosemead, USA, v. 4, n. 2, p. 69-72, 2014.

ROWELL, R.M.; PETTERSEN, R.; TSHABALALA, M.A. Cell wall chemistry. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 33-72.

SÁ, V.A. et al. Mistura de três espécies de reflorestamento na produção de painéis cimento-madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 3, p. 549-557, 2012.

SAFIN, R.R. et al. Extraction of soluble sugars from the wood filler on the strength properties of the composite based on mineral binder. **Key Engineering Materials**, Pfaffikon, Switzerland, v. 688, p. 138-144, 2016.

SANDERMAN, W.; R. KÖLER. Studies on mineral bounded wood material. IV. A short test of aptitudes of wood forestal cement bounded materials. **Holzforshung**, Berlin, v. 18, n. 12, p. 53-59, 1964.

SANTOS, M.P. **Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira provenientes da construção civil**. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTOS, R.C. et al. Aproveitamento de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus*) para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 241-250, 2008.

SAVASTANO JR, H. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: Caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas dos compósitos**. 1992. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

SAVASTANO JR, H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: Reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. 144 f. Tese (Livre Docência em Engenharia de Construção Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

SAVASTANO JR, H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, England, v. 22, n. 5, p. 379-384, 2000.

SEDAN, D. et al. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. **Journal of the European Ceramic Society**, Oxford, England, v. 28, n. 1, p. 183-192, 2008.

SEMPLE, K.E.; CUNNINGHAM, R.B.; EVANS, P.D. Compatibility of eight temperate australian *Eucalyptus* species with Portland cement. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Canberra. **Proceedings...** Canberra, Australia: ACIAR, 2000. p. 40-46.

SEMPLE, K.E.; EVANS, P.D. **Wood cement composites** - suitability of western australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas. Barton: RIRDC, 2004. 65 p.

SHMULSKY, R.; JONES, P.D. **Forest products and wood science** - an introduction. 6. ed. Ames: Wiley-Blackwell, 2011. 477 p.

SILVA, A.N. et al. Biomassa vegetal para uso em chapas cimento-madeira. **Revista Universidade Rural - Série Ciências da Vida**, Itaguaí, v. 22, n. 2, p. 199-203, 2002.

SILVA, G.C. et al. Produção do compósito madeira e casca de *Eucalyptus urophylla* e cimento Portland. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 59-67, 2005.

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

SILVA, A.J.C. et al. Influência da temperatura na evolução da resistência à compressão do cimento Portland. In: 51º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, Curitiba. **Anais...**Curitiba: IBRACON. p. 1-10.

SIMATUPANG M. H. et al. Influence of wood species on the setting of cement and gypsum. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF FIBER AND PARTICLEBOARD BONDED WITH INORGANIC BINDER, 1988, Spokane. **Proceedings...** Moscow, USA: Idaho University, 1988. p. 33-42.

SIMATUPANG, M.H. et al. Investigations on the Influence of the addition of carbon dioxide on the production and properties of rapidly set wood-cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, England, v. 17, n. 3, p. 187- 197, 1995.

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

SOROUSHIAN, P.; WON, J-P.; HASSAN, M. Durability and microstructure analysis of CO₂-cured cement-bonded wood particleboard. **Cement and Concrete Composites**, Barking, England, v. 41, p. 34-44, 2013

SOUZA, A.L.C. **Utilização de resíduos da indústria madeireira para fabricação de chapas cimento-madeira**. 2006. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém.

STEVULOVA, N.; HOSPODAROVA, V. Cellulose fibres used in building materials. In: REHVA ANNUAL CONFERENCE, 2015, Riga. **Proceedings...** Riga, Latvia: REHVA, 2015. p. 211-216.

STOKKE, D.D.; WU, Q.; HAN, G. **Introduction to wood and natural fiber composites**. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. 297 p.

SUBBOTINA, N. et al. Control of structurization processes in wood-cement systems at fixed pH. 1698. **Proceedings...** Tomsk, Russia, 2016. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/docserver/fulltext/aip/proceeding/aipcp/1698/10.1063/1.4937858/1.4937858.pdf?expires=1455565433&id=id&accname=guest&checksum=B00033825EC2CA539C8996F98C96B78F/>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

SULASTININGSIH, I.M. et al. The effects of bamboo: Cement ratio and magnesium chloride (MgCl₂) content on the properties of bamboo-cement boards. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Canberra. **Proceedings...** Canberra, Australia: ACIAR, 2000. p. 66-71.

SUTIGNO, P. Effect of Aqueous extraction of wood-wool on the properties of wood-wool cement board manufactured from teak (*Tectona grandis*). In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000, Canberra. **Proceedings...** Canberra, Australia: ACIAR, 2000. p. 24-28.

TAYLOR, A.M. et al. Radial patterns of carbon isotopes in the xylem extractives and cellulose of Douglas-fir. **Tree Physiology**, Oxford, England, v. 27, n. 6, p. 921-927, 2007

TAYLOR, A.M.; GARTNER, B.L.; MORRELL, J.J. Heartwood formation and natural durability – a review. **Wood and Fiber Science**, Monona, USA, v. 34, n. 4, p. 587-611, 2002.

TCHÉHOUALI, D.A. et al. The most suitable species of six west african hardwood species for wood-cement composites. **Research Journal of Recent Sciences**, Indore, India, v. 2, n. 2, p. 59-65, 2013.

TEIXEIRA, D.E.; MOSLEMI, A. Assessing modulus of elasticity of wood-fiber cement (WFC) sheets using nondestructive evaluation (NDE). **Bioresource Technology**, Essex, England, v. 79, n. 2, p. 193-198, 2001.

THOMAS, N.L.; BIRCHALL, J.D. The retarding action of sugars on cement hydration. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, USA, v. 13, n. 6, p. 830-842, 1983.

VAICKELIONIS, G.; VAICKELIONIENE, R. The influence of organic and mineral additives on hydration of cement. **Materials Science - Medziagotyra**, Kaunas, Lithuania v. 9, n. 3. p. 218-223, 2003

VAICKELIONIS, G.; VAICKELIONIENE, R. Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Ceramics - Silikáty**, Prague, Czech Republic, v. 50, n. 2, p. 115-122, 2006.

VERDE, F.H.S. **Compósitos cimento-madeira: determinação de parâmetros de processamento**. 2008. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, São Luís.

VIERA, D.V.; AYALA, K.M.; DUPUY, M.A.G. Compatibilidad de especies maderables de la empresa La Palma para formar aglomerados con cemento. **Revista Forestal Baracoa**, La Habana, Cuba, v .24, n. 1, p. 79-86, 2004.

VILELA, E.; B. DU PASQUIER. Determinación del coeficiente de aptitud de un grupo de maderas para su posible aplicación en la fabricación de tableros de papilla de madera-cemento. **Revista Forestal Venezolana**, Mérida, Venezuela, v. 11, n. 16, p. 75-84, 1968.

WIEDENHOEFT, A.C. Structure and Function of Wood. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 9-32.

WEI, Y.M.; TOMITA, B.; HIRAMATSU, Y.; MIYATAKE, A.; FUJII, T. Study of hydration behaviors of wood-cement mixtures: compatibility of cement mixed with wood fiber strand obtained by the water-vapor explosion process. **Journal of Wood Science**, Berlin, v. 48, n. 5, p. 365-373, 2002.

WEI, Y.M.; ZHOU, Y.G.; TOMITA, B. Hydration behavior of wood cement-based composite. I: Evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary Portland cement. **Journal of Wood Science**, Berlin, v. 46, n. 4, p. 296-302, 2000.

WOLFE, R.W.; GJINOLLI, A. Cement-bonded wood composites as an engineering material. In: USE OF RECYCLED WOOD AND PAPER IN BUILDING APPLICATIONS, 1996, Madison. **Proceedings...** Madison, USA: Forest Products Society, 1996. p. 84-91.

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

YANG, G.; JAAKKOLA, P. **Wood chemistry and isolation of extractives from wood**. 2011. Disponível em: <http://www.biotuli-hanke.fi/files/download/Biotuli_YangJaakkola2011.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2016.

ZHENG TIAN, L.; MOSLEMI, A.A. Effect of western larch extractives on cement setting. **Forest Products Journal**, Madison, USA, v. 36, n. 1, p. 53-54, 1986.

ZHOU, M.; LI, Z.J. Light-weight wood-magnesium oxychloride cement composite building products made by extrusion. **Construction and Building Materials**, Guildford, England, v. 27, n. 1, p. 382--389, 2012.