

Efeito de diferentes espécies de madeira e bambu na hidratação de matrizes à base de cimento Portland

Effect of different wood and bamboo species on hydration of Portland cement-based matrices

Eduardo Hélio de Novais Miranda¹ , Geraldo Aparecido da Silva¹ , Diogo Antonio Correa Gomes¹ ,
Mariana Nayara Lima da Silveira¹ , Fabrício de Campos Vitorino² , Saulo Rocha Ferreira¹ 

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais. Avenida Bueno da Fonseca, 543, Inácio Valentim, 37200-000, Lavras, MG, Brasil.

²Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Química e de Petróleo. Rua Passo da Pátria, 156 Bloco D, Campus da Praia Vermelha, São Domingos, 24210-240, Niterói, RJ, Brasil.

e-mail: eduardohelio013@gmail.com, geraldoap.silva@ufla.br, diogo.gomes2@estudante.ufla.br, mariana.nalisi@gmail.com, fabriciovitorino@id.uff.br, saulo.ferreira@ufla.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o efeito de diferentes espécies de madeiras e de bambu (*Pinus taeda*, *Cereus jamacaru* e *Bambusa vulgaris*) na hidratação de matrizes cimentícias. Para tanto, os materiais lignocelulósicos foram moídos e caracterizados antes e depois de tratamento em água quente. Posteriormente, o efeito da adição de diferentes níveis (5, 10 e 33,3%) de madeiras, pré-tratadas ou não, em pastas de cimento foram analisados a partir dos ensaios de calorimetria isotérmica e termogravimetria. Os resultados demonstraram que as partículas de cada espécie lignocelulósica apresentaram um aumento das propriedades de umidade e absorção concomitante a diminuição de suas densidades e níveis de extrativos a partir do pré-tratamento aplicado. Os outros componentes químicos destes elementos, majoritariamente, todavia, não foram afetados. Por outro lado, foi observado que quanto maior o teor de tais materiais lignocelulósicos, pré-tratados ou não, nas matrizes de cimento, maior o impacto na hidratação do cimento, segundo o ensaio de calorimetria. Já com relação ao resultado do ensaio de termogravimetria observou-se uma tendência geral, com ou sem pré-tratamento de partículas ou adição de água de compensação, de aumento dos produtos hidratados, fato atribuído, principalmente, a presença de água livre e gases nos materiais lignocelulósicos.

Palavras-chave: Biocompósitos; Materiais lignocelulósicos; Produtos de baixo impacto ambiental.

ABSTRACT

The present work aims to analyze the effect of different species of wood and bamboo (*Pinus taeda*, *Cereus jamacaru* and *Bambusa vulgaris*) on the hydration of cementitious matrices. For this, the lignocellulosic materials were ground and characterized before and after treatment in hot water. Subsequently, the effect of adding different levels (5, 10 and 33.3%) of wood, pre-treated or not, in cement pastes were analyzed using isothermal calorimetry and thermogravimetry tests. The results showed that the particles of each lignocellulosic species showed an increase in moisture and absorption properties concomitant with a decrease in their densities and extractive levels from the pre-treatment applied. The other chemical components of these elements, however, were mostly unaffected. On the other hand, it was observed that the higher the content of such lignocellulosic materials, pre-treated or not, in the cement matrices, the greater the impact on cement hydration, according to the calorimetry test. Regarding the result of the thermogravimetry test, a general trend was observed, with or without pre-treatment of particles or addition of make-up water, of an increase in hydrated products, a fact mainly attributed to the presence of free water and gases in the lignocellulosic materials.

Keywords: Biocomposites; Lignocellulosic materials; Low environmental impact products.

1. INTRODUÇÃO

Embora seja um dos mais importantes setores para o desenvolvimento social e econômico do Brasil e do mundo, a construção civil apresenta uma série de impactos ambientais em sua cadeia produtiva, consomem muitos recursos naturais não renováveis e se enquadram como grandes geradoras de resíduos. Diante disto, torna-se necessária a busca por novas tecnologias, ambientalmente corretas, preferencialmente renováveis, como a partir do uso materiais lignocelulósicos, afim de enquadrar essa indústria na atual tendência de sustentabilidade requerida socialmente [1].

Neste contexto, compósitos de matriz de cimento com incorporação de materiais lignocelulósicos, como de espécies de paricá (*Schizolobium amazonicum*) e embaúba (*Cecropia hololeuca*) [2], maçaranduba (*Manilkara salzmanni*), angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), cedro (*Cedrela fissilis*) e cedrinho (*Erismia uncinatum Warm*) [1], coco (*Cocos nucifera*) [3], pinheiro de masson (*Pinus massoniana*) [4], sisal (*Agave sisalana*) [5], matamatá-branco (*Eschweilera coriaceae*), saboarana (*Swartzia recurva*), maçaranduba (*Manilkara amazônica*) e abiurana (*Pouteria guianensis*) [6], popularmente conhecidos como compósitos de “cimento-madeira”, vêm se destacando pois originam produtos com potencial de aplicação para suas respectivas finalidades [1–6].

Os resultados de pesquisas publicadas anteriormente demonstraram, neste contexto, que os compósitos de cimento-madeira apresentaram boas propriedades físicas e mecânicas, como resistência ao fogo, durabilidade, estabilidade dimensional, isolamento acústico e térmico, além de possuírem baixo custo de produção e alta trabalhabilidade [1–9]. Desse modo, estes produtos atenderam a diversas aplicações, como para a fabricação de materiais de preenchimento de baixa densidade na construção civil [10], produção de materiais que promovem a redução da alcalinidade da matriz cimentícia [11] e também aplicações gerais como em pisos, bancadas, forros, telhas de cobertura e componentes pré-fabricados [7]. Assim, tais compósitos podem representar significativa contribuição para o rápido crescimento da infraestrutura principalmente dos países em desenvolvimento [8, 9].

Outras espécies de materiais lignocelulósicos com propriedades como de densidade, baixo custo, adaptação a diferentes solos, rápido crescimento e grande disponibilidade, compatíveis com tal uso, *Pinus taeda*, *Bambusa vulgaris* e *Cereus jamacaru*, cultivadas em larga escala no Brasil, país com maior biodiversidade de árvores de todo o mundo, possuem estudos insipientes com relação a sua adição em compósitos cimentícios.; justifica-se, portanto, um maior estudo destes importantes materiais florestais em compósitos de cimento [12].

Além disso, o rendimento médio de processamento de madeira, como das espécies citadas anteriormente é de cerca 41%, as quais 9% são queimadas e 16% são descartadas como resíduos. O compósito madeira-cimento, portanto, além de uma solução para indústria da construção, através de um menor uso de matérias-primas não renováveis e geradoras de resíduos, é também um potencial alternativo para o problema de madeiras mal manejadas [13].

Todavia, mesmo unindo características favoráveis, algumas madeiras tendem a alterar ou até prejudicar o processo de pega do cimento Portland. Pode ocorrer, portanto, uma incompatibilidade destes materiais naturais com a matriz cimentícia e isso é explicado na literatura, principalmente, pela presença de carboidratos de baixo peso molecular, como extrativos e hemiceluloses, que agem de forma a retardar a hidratação do cimento e a diminuir produtos hidratados relacionados a boas propriedades físico e mecânicas do compósito resultante, como os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Um dos métodos para a avaliação destes impactos é através da avaliação do calor de hidratação, aferido através de calorímetros adiabáticos ou semi-adiabáticos. Nestas técnicas, como mencionado, são observados retardos ou acelerações das reações comumente conhecidas em matrizes cimentícias, indicando a velocidades das mesmas e a quantidade de produtos hidratados que foram formados [14, 15].

Algumas alternativas, neste sentido, vêm sendo utilizadas para reduzir o efeito negativo de algumas madeiras em compósitos a base de cimento, como o uso de aceleradores de pega, banho térmico, hidrólise alcalina com hidróxido de cálcio e retenção de substâncias inibidoras por revestimento das partículas com estireno acrílico [16–18].

Diante o exposto, o presente estudo objetiva a avaliação da influência das partículas “*in natura*” e pré-tratadas com lavagem de água quente de *Pinus taeda*, *Bambusa vulgaris* e *Cereus jamacaru* na hidratação de compósitos de cimento Portland.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

A madeira de cacto (*Cereus jamacaru*) utilizada, de 3 anos de idade procedente de plantação experimental em Barueri, São Paulo Brasil, foi A retirado do cerne deste material. Já os respectivos materiais obtidos das espécies

Tabela 1: Composição química e propriedades físicas do cimento utilizado.

ÓXIDOS (%)	CP V-ARI
CaO	63,80
SiO ₂	17,80
SO ₃	3,82
Al ₂ O ₃	4,98
K ₂ O	0,82
TiO ₂	0,20
MnO	0,10
Outros	8,48
DENSIDADE (g/cm³)	3,20
ÁREA SUPERFICIAL (m²/kg)	420,00

advindas de plantio no campus da Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil, bambu (*Bambusa vulgaris*), de aproximadamente 3 anos de idade, e *Pinus taeda*, de aproximadamente 28 anos de idade, foram a área basal do colmo e serragem contendo cerne e alborno.

Estas espécies foram escolhidas, pois segundo ZHOU e KAMDEM [19], sua presença é responsável pelo menor custo dos painéis. O produto final possui ainda, na maioria das vezes, maior leveza, visto que a densidade das espécies de *Pinus taeda* (0,32 g/cm³) [20], *Bambusa vulgaris* (0,73 g/cm³) [21] e *Cereus jamacaru* (0,25 g/cm³) [22], é menor que a do cimento (Tabela 1). Além disso, tais espécies possuem grande disponibilidade no território brasileiro [12].

O cimento Portland utilizado foi o CP V-ARI. A escolha foi baseada na sua boa aplicação em bioconcretos devido sua alta reatividade. A caracterização química e física do aglomerante está apresentada na Tabela 1 [23].

As espécies de *Bambusa vulgaris*, *Pinus taeda* e *Cereus jamacaru* passaram por moagem em moinho de martelos de alta rotação (1740 rpm) Lucato M32M1076 e posterior separação granulométrica a partir do uso de um peneirador da marca A Bronzinox MA656, sendo selecionadas as partículas passantes pela peneira de 40 mesh (0,425 mm) e retidas na de 60 mesh (0,250 mm). Depois da seleção granulométrica, parte das partículas foram lavadas e parte não.

A lavagem das partículas (Figura 1) ocorreu com uso de uma chapa aquecedora Solab SL-141/A, um termômetro eletrônico de contato Worner Lab TP 300 e um béquer de vidro Pyrex HX0004-00003 com capacidade de 1000 ml. Em cada ciclo de lavagem foram adicionados 1000 ml de água deionizada e 10 g de partículas a cada béquer (proporção mássica partícula:água de 1:100). Cada mistura foi mantida em temperaturas entre 80 a 100 °C durante uma hora; após esse intervalo de tempo, a coloração final era registrada e então a água descartada para início de um novo ciclo. Foram realizados três ciclos de lavagens para as partículas de cada espécie e, após lavagem, as partículas lignocelulósicas foram secas em estufa Marconi 128 MA035 até a umidade de 3%, requerida para as caracterizações químicas [1].

2.2. Caracterização dos materiais lignocelulósicos

Após a secagem, os materiais lignocelulósicos “*in natura*” e pré-tratados com lavagem foram caracterizados através dos ensaios físicos de absorção de água [24], densidade aparente e umidade higroscópica [25] e analisados quimicamente através da quantificação de teor de extrativos [26], lignina [27], holocelulose [28], celulose [29]. A hemicelulose foi ainda quantificada pela diferença entre o teor de holocelulose e o de celulose.

2.3. Moldagem dos compósitos

A moldagem das pastas de cimento e água com adição destas partículas lignocelulósicas, previamente caracterizadas e secas em estufa, foi realizada de duas formas. Na primeira (traços 1, 2 e 3 da Tabela 2) foram adicionados 5, 10 e 33,3%, em massa de partículas em relação ao cimento, 40,0% de água inicial e também uma aplicação de água de compensação, água extra adicionada a fim de aumentar a trabalhabilidade das pastas, até que a mistura adquirisse consistência. A variação na quantidade de água utilizada para cada mistura deve-se ao fato de cada partícula apresentar características físico-químicas diferentes, principalmente, em relação a absorção de água, além da maior trabalhabilidade já mencionada. Nas pastas feitas pela segunda maneira (traços 4, 5 e 6 da Tabela 2) aplicou-se o mesmo traço inicial; porém, não houve adição de água de compensação. A pasta referência para ambas amostragens seguiu o traço de 1:0,4 (cimento:água) [30].



Figura 1: Exemplo de lavagem utilizada nas partículas.

Tabela 2: Diferentes traços em massa de pastas utilizadas na pesquisa.

TRAÇO	CIMENTO	MATERIAL LIGNOCELULÓSICO	ÁGUA	ÁGUA DE COMPENSAÇÃO	ÁGUA TOTAL
1	1,00	0,05	0,40	0,80	1,20
2	1,00	0,10	0,40	0,90	1,30
3	1,00	0,33	0,40	1,30	1,70
4	1,00	0,05	0,40	–	–
5	1,00	0,10	0,40	–	–
6	1,00	0,33	0,40	–	–

A manufatura dos compósitos ocorreu da seguinte forma: primeiramente, houve a mistura da biomassa e cimento em um béquer plástico por 1 minuto, seguido de adição de água gradativamente através de uma pipeta manual de volume variável, em mistura contínua durante 1 minuto. A água de compensação foi adicionada logo após, nas pastas que as continham em um tempo de adição e mistura de 4 minutos. Ao fim da adição de água de compensação ou após a adição fixa de 40,0% de água, os compósitos foram misturados durante 1 minuto e moldados. O tempo gasto para cada moldagem foi, portanto, de 7 minutos. Após a moldagem as placas foram armazenadas em sacolas plásticas de PVC (poliuretano de vinila), vedadas de contato exterior, onde ficaram mantidas em temperatura ambiente durante a cura dos compósitos.

2.4. Caracterização dos compósitos

A caracterização dos compósitos, com idades de cura de 14 e 28 dias após mistura e moagem, foi realizada através dos ensaios de calorimetria e termogravimetria.

Durante o estado fresco foi realizado a análise de calorimetria adiabática em um calorímetro isotérmico multicanal MC-CAL da C3Prosess GmbH Company. A análise de calor isotérmico foi realizada nas pastas hidratadas a 20 °C por 7 dias. Para tanto, uma mistura manual de um minuto foi realizada com um misturador do tipo vortex manual Heidolph a 5600 rpm. Avaliou-se, neste sentido, o efeito das partículas moídas, lavadas ou não, de cada espécie, em diferentes proporções nas pastas.

Já a análise termogravimétrica (TGA) dos compósitos foi realizada em um equipamento SDT Q600 V20.9 Build 20 Universal V4.5A da TA Instruments utilizando-se aproximadamente 10 mg de cada mistura. A taxa de aquecimento deste procedimento foi de 10 °C/min até se atingir uma temperatura de 900 °C e fluxo de gás de nitrogênio adotado foi de 50 ml/min. A temperatura de degradação foi determinada ainda a partir da inflexão linha de base na curva termogravimétrica diferencial (DTGA). Os testes foram realizados em cadinho de alumina sem tampa.

As curvas TGA obtidas das pastas foram convertidas para a base de massa de cimento inicial [31–33]. Após o cálculo das perdas de massa efetivas e das correspondentes curvas derivadas, foram definidas graficamente as faixas de decomposição de temperatura dos principais compostos cimentícios [34].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização dos materiais lignocelulósicos

Os resultados das análises físicas e químicas das partículas de *Pinus taeda*, *Bambusa vulgaris* e *Cereus jama-caru*, naturais e lavadas, estão apresentados na Tabela 3.

Nota-se primeiramente que valores de densidade aparente obtidos para as espécies de pinus e bambu variaram entre 0,50 a 0,68 g/cm³ e foram condizentes aos encontrados por BALLARIN e PALMA [35] (0,58 g/cm³) para o pinus e por AZZINI e CIARAMELLO [36] (entre 0,55 e 0,70 g/cm³) para o bambu. A amostra de *Bambusa vulgaris* apresentou a maior densidade entre as espécies, correspondendo a 0,68 g/cm³ antes do tratamento de lavagem e 0,64 g/cm³ após o tratamento. Para BRITO *et al.* [37], a densidade mais elavada da espécie *Bambusa vulgaris* é relacionada a idade da touceira e parte do colmo utilizada. Já o cacto foi o único componente lignocelulósico que apresentou baixa densidade (< 0,50 g/cm³), possuindo valores máximos de 0,26 g/cm³, com ou sem tratamento. Nota-se ainda uma queda destas propriedades em função da lavagem. Segundo ARAÚJO *et al.* [38], uma baixa densidade é importante quanto ao reuso de materiais lignocelulósicos visando o incremento de partículas em um mesmo volume de compósitos e, portanto, a lavagem auxiliou nesta característica [39].

Observa-se também que absorção de água e a umidade de todos os tratamentos foram afetados pela lavagem das partículas. A absorção de água na madeira de *Pinus taeda*, neste contexto, apresentou um aumento de 350,24%, o cacto obteve um acréscimo de 143,96% e o bambu um aumento de 76,61%. Em relação a umidade, as madeiras de pinus, bambu e cacto também apresentaram acréscimos de 89,55%, 19,55% e 58,58%, respectivamente. Esta tendência é descrita na literatura como uma interferência negativa das fibras nas matrizes de cimento pois, como são materiais híbridos, apresentam uma maior tendência de absorver água e impactar nos processos de hidratação do cimento [40].

É possível observar que a amostra de *Pinus taeda*, antes do tratamento de lavagem das partículas, apresentou menores propriedades de absorção (317,61%) e umidade (14,58%) dentre os materiais lignocelulosicos em estudo. Tal fato se dá pela idade da árvore abatida [28 anos], a maior dentre as espécies pesquisadas, pois

Tabela 3: Resultados das análises físico-químicas das partículas lignocelulósicas.

MATERIAL	ABSORÇÃO (%)	UMIDADE (%)	DENSIDADE (g/cm ³)	EXTRATIVOS (%)	LIGNINA (%)	CELULOSE (%)	HEMICELULOSE (%)
PN	317,61	14,58	0,50	5,28	27,84	51,96	12,81
PL	667,85	104,13	0,60	3,35	28,18	52,89	12,96
BN	757,14	21,08	0,68	6,14	20,57	51,90	18,95
BL	833,75	40,58	0,64	4,84	20,78	51,72	19,17
CN	706,04	75,67	0,26	17,64	10,17	32,65	18,56
CL	850,00	134,25	0,19	3,16	11,69	38,18	20,95

PN = Pinus Natural; PL = Pinus Lavado; BN = Bambu Natural; BL = Bambu Lavado; CN = Cacto Natural; CL = Cacto Lavado.

segundo MAGALHÃES *et al.* [41], a madeira adulta apresenta maior permeabilidade do que a madeira jovem, e também pela sua alta quantidade de lignina. A amostra de *Cereus jamacaru* após o processo de lavagem, porém, apresentou os maiores percentuais de absorção de água (850,00%) e umidade (134,25%), decorrentes, possivelmente, da baixa idade da espécie extraída (3 anos), pelo baixo conteúdo de lignina encontrado, o menor dentre as espécies estudadas e também pela grande presença de vazios nesta espécie [22, 41].

Discute-se, portanto, que os valores gerais encontrados para a lignina obtiveram relação inversa à quantidade de absorção de água (Figura 2). Tal fato se dá, de acordo com IWAKIRI e TRIANOSKI [39], porque a lignina é uma estrutura essencialmente hidrofóbica e auxilia na diminuição da afinidade do material que a compõe.

A lignina, individualmente, entretanto, apresentou valores semelhantes, antes e depois do tratamento em água, em todos os materiais estudados. O valor de lignina obtido por SANCHEZ-ECHEVERRI *et al.* [42] para o bambu de 15,50%, porém, obteve uma grande redução após o pré-tratamento, chegando a 9,70%. De acordo HUANG *et al.* [43], as partes mais grossas das fibras de bambu e pinus apresentam uma maior lignificação (valores acima de 20,00%) e o tratamento com água quente não apresentou grande influência na variação deste componente. Já os valores de lignina encontrados para o cacto natural e lavado, 10,17% e 11,69%, respectivamente, foram os mais baixos encontrados nesta pesquisa, e também foram inferiores ao encontrado por VADIVEL e GOVINDASAMY [44], 15,85%, após pré-tratamentos.

Com relação aos extrativos, compostos hidrofóbicos de baixo peso molecular e que estão relacionados a impactos negativos nas reações de hidratação do cimento, os dados obtidos foram afetados positivamente pela lavagem de partículas, principalmente no cacto [39, 45]. Os tratamentos realizados com pinus e bambu levaram a reduções menores que 2% de seus extrativos, enquanto que o cacto obteve uma redução de 14,18% no nível de extrativos em sua composição. O cacto possui na sua estrutura apenas ácido cinâmico e valérico, betalainas, pigmentos responsáveis pela coloração avermelhada nas plantas. Assim o *Cereus jamacaru* apresentou, diferentemente dos outros dois materiais lignocelulósicos, uma grande redução nos extrativos pois esses compostos presentes na fibra são solúveis em água [46].

Já para a holocelulose (celulose e hemicelulose), observa-se que não houve redução ou aumento geral destes componentes químicos, diferentemente do encontrado no trabalho de SANCHEZ-ECHEVERRI *et al.* [42], no qual as partículas de bambu apresentaram, após tratamento, redução de 34% da holocelulose. Todos os dados de apresentados, por outro lado, foram superiores a 12%, após os tratamentos com água quente; isso está relacionado com às regiões amorfas e a alta capacidade de absorção de água [3].

De acordo com IWAKIRI e TRIANOSKI [38] normalmente, o uso de materiais lignocelulósicos são limitantes, uma vez que tais materiais possuem altos níveis de holocelulose que podem afetar as propriedades físico-mecânicas dos compósitos que os contém visto que possuem muitos grupos de hidroxila livre grupos que podem aderir à água e impactar nas propriedades físicas das matrizes cimentícias. A lavagem, portanto, não conseguiu reagir com as hidroxilas livres e reduzir tais componentes químicos de maneira significativa.

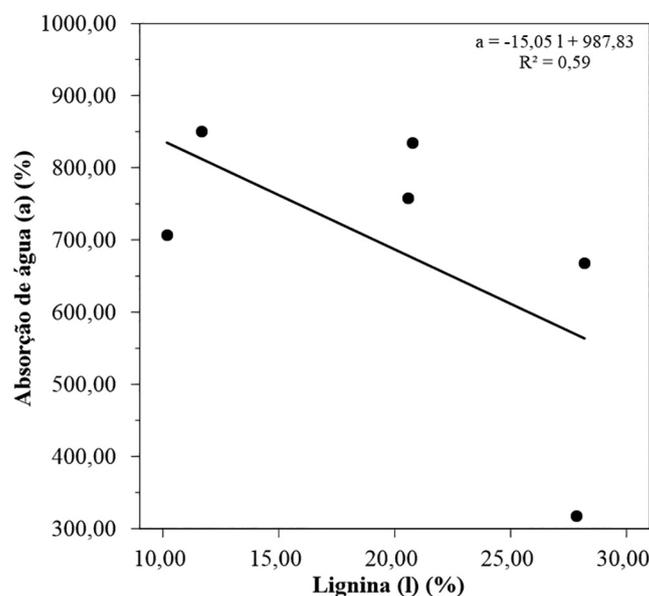


Figura 2: Relação entre a quantidade de lignina e os teores de absorção de água nas amostras.

O tratamento em água foi realizado visando, dessa forma, uma variação de constituintes químicos importantes no processo de hidratação do cimento; o principal objetivo foi reduzir o conteúdo de extrativos, os quais, de acordo SANCHEZ-ECHEVERRI *et al.* [42], podem ser variáveis devido a condições da planta (idade, local de extração, nutrientes que foram colocados durante a plantação, etc), constituintes do solo e condições climáticas do local, A lavagem foi, portanto, bem-sucedida.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

3.2.1. Estado fresco

Os resultados de um dos ensaios de calorimetria, na pasta com 5,0% de materiais lignocelulósicos, a fim de quantificação da taxa de liberação de calor podem ser encontrados graficamente na Figura 3. Já na Tabela 4 são descritos os parâmetros calculados neste teste.

A partir das curvas de fluxo de calor exemplificadas na Figura 3 e das informações demonstradas na Tabela 4, infere-se que a hidratação do cimento pode ser dividida em, primeiramente, reações iniciais até 2,5 h, período de indução entre 2,5 e 5,0 h, fase de aceleração entre 5,0 e 15,0 h e fase de desaceleração após 15,0 h [47].

Nota-se, em um primeiro momento, que o pré-tratamento não afetou a dinâmica de hidratação das pastas de cimento contendo os materiais lignocelulósicos. Em relação a pasta de referência, entretanto, observa-se um retardamento da hidratação das pastas, a partir do deslocamento dos picos no sentido de maior tempo. Essa tendência é comum na literatura e acontece, pois, alguns componentes químicos dos materiais lignocelulósicos, extrativos, celulose, hemicelulose e lignina, retardam a reação inicial da hidratação do cimento [48].

Neste sentido, até 12,5 h, têm-se os picos de desidratação dos silicatos, mais afetados pela adição de partículas lignocelulósicas através de retardamento de suas reações e diminuição de seus picos; já os picos de desidratação de C_3A (trialuminato de cálcio) e etringita e de aluminatos secundários, respectivamente, localizados entre 12,5 e 20,0 h e após 20,0 h, não foram significativamente afetados por tal adição [49].

De acordo com a Figura 3 e Tabela 4, observa-se também que a pasta referência apresentou parâmetros de período de indução e calor acumulado de, respectivamente, 1,70 h e 3,85 mW/h. Nota-se que adição de 5,0% de partículas de pinus e bambu apresentaram pouca diferença entre si (0,1 h e 0,1 mW/h no máximo, respectivamente, independente do tratamento) em relação aos estes parâmetros desta pasta referência. Tal fato pode ser atribuído à composição química similar das duas espécies (Tabela 3).

É possível notar ainda que as partículas de cacto sem tratamento, misturadas a 5,0% em relação ao cimento, apresentaram o maior período de indução (3,8 h) e menor pico de liberação de calor no estágio de aceleração (3,2 mW/h). Observa-se, neste sentido, que os extrativos solúveis da madeira de cacto afetam a hidratação do cimento, pois de acordo com os resultados da caracterização química (Tabela 3), a espécie cacto (*Cereus jamacaru*) sem aplicação de tratamento de lavagem, apresentou maior percentual de extrativos solúveis antes (17,64%) [39, 45]. Depois do tratamento, o nível de extrativos nesta madeira diminuiu para níveis de 3,16% e, por isso, os parâmetros encontrados para o cacto lavado foram semelhantes aos encontrados pelas outras espécies lignocelulósicas.

Em proporções de 33,0% nas amostras, por outro lado, as partículas das três espécies avaliadas apresentaram elevada inibição na hidratação do cimento; porém, pode se notar que as partículas pré-tratadas em água de cacto apresentaram pouca variação em relação a níveis inferiores de adição nas pastas. Para as misturas com partículas lavadas de pinus e bambu, porém, os resultados com a proporção mais alta de substituição em massa foram superiores, quando comparados, por exemplo, com as misturas com 10,0% em massa de componentes lignocelulósicos.

A adição destas partículas vegetais a 33,0% em relação a massa do cimento, portanto, inibe severamente a hidratação do cimento, mesmo após tratamento de lavagem e, desse modo, outros métodos de tratamento precisam ser avaliados para aplicações nestas proporções. LI e LI [17] e TESSARO [50] ao trabalhar com pinus, em adições de 2,0 a 10,0% de partículas em relação a massa do cimento, também verificaram o impacto negativo na hidratação à medida que as proporções das partículas se aproximavam de 10,0% na mistura, ocasionando diminuição na resistência mecânica e aumento da afinidade com água das amostras.

3.2.2. Estado endurecido

Os resultados ilustrativos referentes as etapas da hidratação das misturas com 33,0% de partículas “*in natura*” ou tratadas de cada material juntamente com a pastas referência com e sem adição de água de compensação estão expostos na Figura 4.

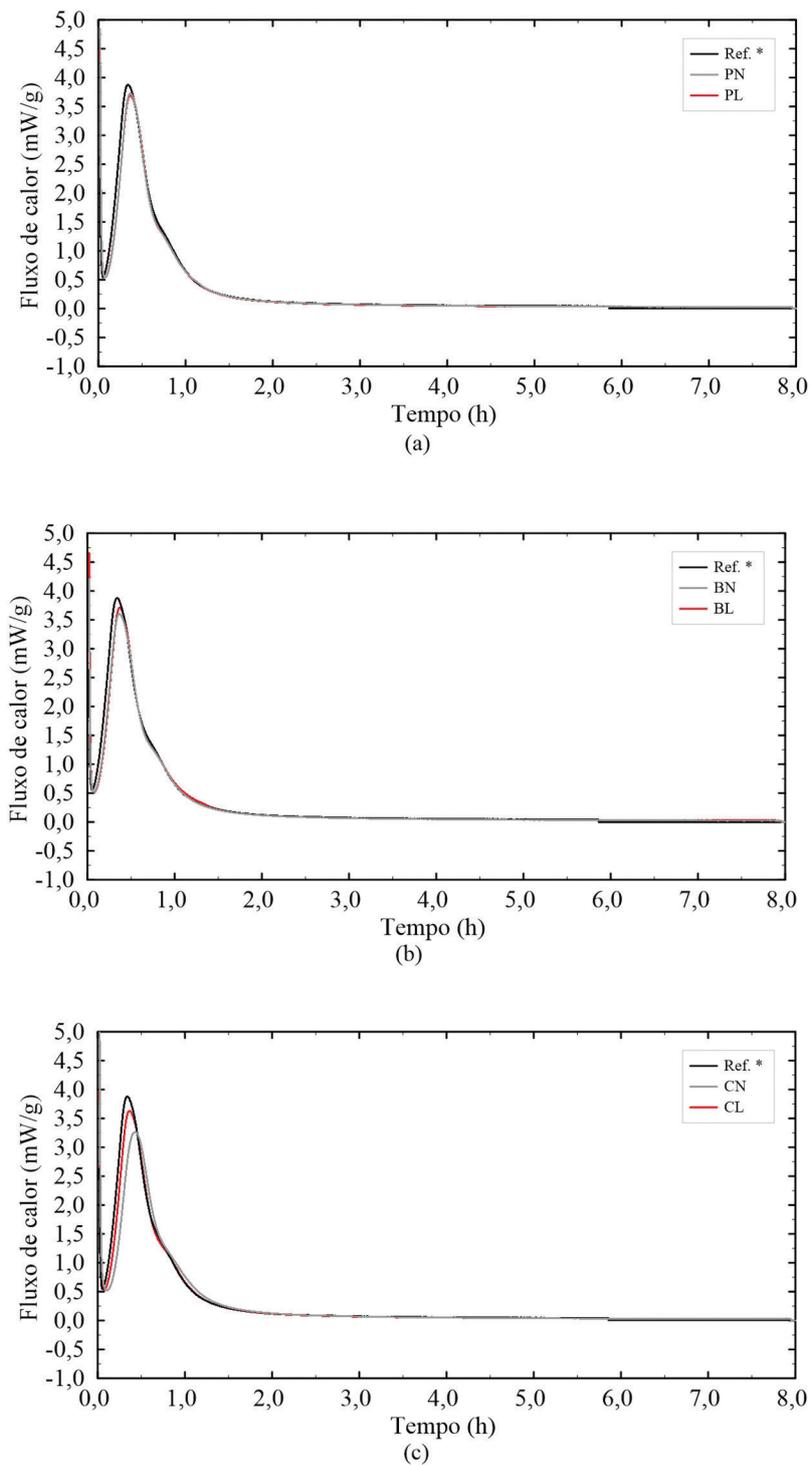


Figura 3: Fluxo de calor da pasta referência e de pinus (a), bambu (b) ou cacto (c), com e sem tratamento, em proporção de 5,0%, em relação a massa do cimento Portland.

BN = Bambu Natural; BL = Bambu Lavado; CN = Cacto Natural; CL = Cacto Lavado; PN = Pinus Natural; PL = Pinus Lavado; Ref* = Referência.

Já a Tabela 5 demonstra o resumo da quantificação dos principais produtos formados em cada momento respectivo da hidratação destas e das pastas com adição de água de compensação.

De acordo com a Figura 4 e a Tabela 5 as misturas contendo partículas dos materiais lignocelulósicos apresentaram maiores teores de decomposição entre 40 e 200° C maiores que o pico apresentado pela referência (Pasta CPV-ARI). LEE e CHOI [48] e SCRIVENER *et al.* [15] explicam que estes picos endotérmicos antes de

Tabela 4: Valores referentes ao período de indução e calor total liberado para a pasta de cimento referência e mistura com adição das partículas lignocelulósicas nas proporções de 5,0%, 10,0% e 33,0% em relação a massa de cimento.

PASTA	PERÍODO DE INDUÇÃO	VARIAÇÃO DO PERÍODO DE INDUÇÃO EM RELAÇÃO A REFERÊNCIA	CALOR ACUMULADO	VARIAÇÃO DO CALOR ACUMULADO EM RELAÇÃO A REFERÊNCIA
	(h)	(h)	(mW/h)	(mW/h)
Referência	1,70	–	3,85	–
PL 5%	2,20	0,50	3,70	– 0,15
PN 5%	2,20	0,50	3,70	– 0,15
BL 5%	2,30	0,60	3,70	– 0,15
BN 5%	2,30	0,60	3,60	– 0,25
CL 5%	2,50	0,80	3,60	– 0,25
CN 5%	3,80	2,10	3,20	– 0,65
PL 10%	2,60	0,90	3,30	– 0,55
PN 10%	2,80	1,10	3,30	– 0,55
BL 10%	2,70	1,00	3,40	– 0,45
BN 10%	2,90	1,20	3,40	– 0,45
CL 10%	2,70	1,00	3,30	– 0,55
CN 10%	4,80	3,10	2,40	– 1,45
PL 33%	6,90	5,20	0,96	– 2,89
PN 33%	7,90	6,20	0,96	– 2,89
BL 33%	6,90	5,20	0,96	– 2,89
BN 33%	7,20	5,50	0,70	– 3,15
CL 33%	2,90	1,20	2,50	– 1,35
CN 33%	5,10	3,40	2,30	– 1,55

PL = Pinus Lavado; PN = Pinus Natural; BL = Bambu Lavado; BN = Bambu Natural; CL = Cacto Lavado; CN = Cacto Natural.

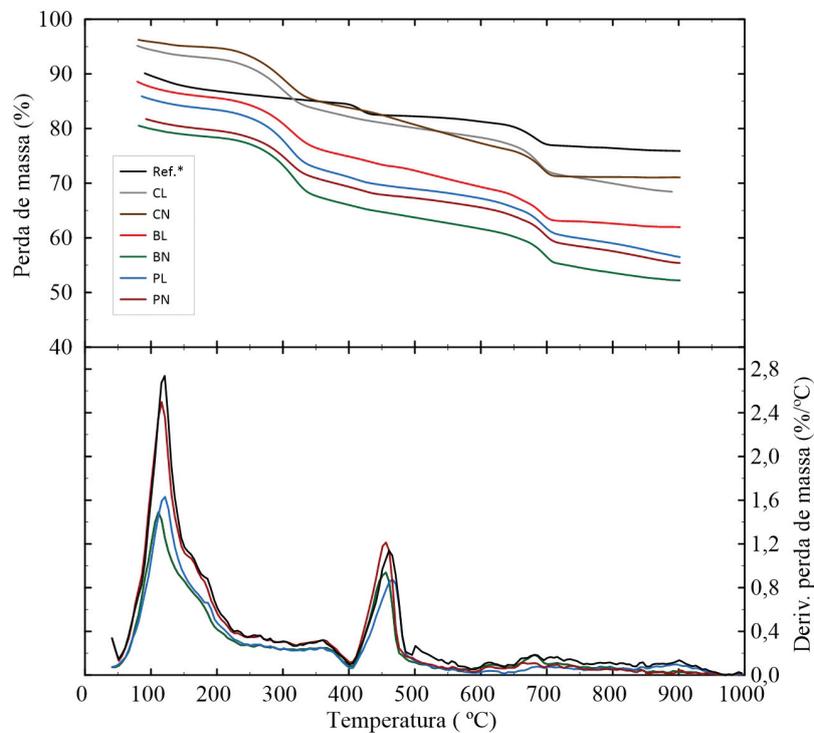


Figura 4: Curvas de TG e DTG de pastas referência e com adição de 33,0% de pinus, bambu ou cacto com e sem pré-tratamento aos 28 dias de cura.

BN = Bambu Natural; BL = Bambu Lavado; CN = Cacto Natural; CL = Cacto Lavado; PN = Pinus Natural; PL = Pinus Lavado; Ref* = Referência.

Tabela 5: Decomposição em massa dos produtos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) + etringita + monossulfatos e dos carbonatos.

PRODUTO HIDRATADO	CORPOS DE PROVA	DECOMPOSIÇÃO EM MASSA DOS PRODUTOS (%)			
		AMOSTRAS SEM ÁGUA DE COMPENSAÇÃO		AMOSTRAS COM ÁGUA DE COMPENSAÇÃO	
		CURA (DIAS)		CURA (DIAS)	
		14	28	14	28
C-S-H + Etringita + Monossulfato	Referência	4,77	4,72	4,77	4,72
	PN 33%	6,35	7,40	12,90	14,14
	PL 33%	7,88	6,42	16,21	16,86
	BN 33%	6,94	5,21	14,35	11,84
	BL 33%	7,83	6,51	13,15	15,26
	CN 33%	9,97	7,06	5,84	8,55
	CL 33%	9,27	4,37	8,65	12,82
Carbonatos	Referência	6,81	4,77	6,81	4,77
	PN 33%	9,10	11,81	15,43	19,32
	PL 33%	9,83	10,98	13,64	24,94
	BN 33%	7,35	9,98	10,10	14,09
	BL 33%	9,75	8,18	21,32	19,33
	CN 33%	12,47	8,90	9,14	11,61
	CL 33%	14,55	12,35	11,43	12,70

PN = Pinus Natural; PL = Pinus Lavado; BN = Bambu Natural; BL = Bambu Lavado; CN = Cacto Natural; CL = Cacto Lavado.

200°C, correspondem a evaporação de água livre que, se tratando apenas da mistura de cimento e água, indicam a degradação da etringita, C-S-H e monossulfatos. Devido a inibição causada na hidratação do cimento por partículas lignocelulósicas, esta tendência apresentada nas misturas pode se relacionar a decomposição da água livre presente na mistura e também a maior liberação de extrativos em consequência da maior saturação das partículas [48, 51].

Dessa forma, é possível correlacionar a presença de água livre na mistura, com os resultados obtidos na análise física das partículas lignocelulósicas descritos na Tabela 3, pois as partículas de pinus apresentaram elevada absorção de água e baixos teores de lignina. Esta maior água livre pode auxiliar a explicar também os resultados maiores encontrados nas pastas com adição de água de compensação. Entre os tratamentos realizados nas partículas não foi observado, entretanto, tendência de queda ou aumento na formação destes produtos hidratados. Além disso, com relação ao tempo de cura há, na maioria das amostras, uma tendência de redução, indicando que estes produtos são formados nos dias iniciais de cura [48].

As misturas contendo partículas de pinus, bambu e cactos (Figura 4 e Tabela 5) apresentaram também maior degradação de carbonatos, que segundo SCRIVENER *et al.* [15] se decompõe entre 600 e 800 °C, que as pastas de referência. De acordo com NEVILLE [52], a presença de CO₂, favorece a carbonatação e, por isso, os gases presentes na estrutura das partículas lignocelulósicas podem influenciar na maior carbonatação. Outra relação provável se deve ao fato da utilização de água de compensação na mistura ter interferido na difusão do CO₂ [17]. A água pode se apresentar de duas formas distintas em relação a carbonatação do cimento, podendo favorecer a formação de CO₂ e em quantidade mais elevada pode também obstruir os poros, impedindo a difusão do CO₂. De 14 para 28 dias, por outro lado, há uma tendência, na maioria das pastas, de aumento da decomposição de carbonatos, indicando que estes produtos são formados de forma mais tardia [53].

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi a avaliação da influência das partículas “*in natura*” e pré-tratadas com lavagem de água quente de *Pinus taeda*, *Bambusa vulgaris* e *Cereus jamacaru* na hidratação de compósitos de cimento Portland.

De forma geral, os resultados indicaram que as partículas de bambu e cacto apresentaram alta umidade e absorção de água após os tratamentos. Em relação a densidade, porém, as partículas de bambu e pinus foram classificadas como de média densidade e das de cacto como de baixa densidade. Essas variações de densidade tem uma grande relação também com a absorção de água nos poros das partículas.

Já nas propriedades químicas dos materiais lignocelulósicos, os extrativos presentes obtiveram o melhor resultado nas partículas cacto, pois os baixos valores demonstrados principalmente após pré-tratamento podem significar uma boa afinidade com a matriz cimentícia. Os outros componentes não sofreram variações significativas após a lavagem.

No ensaio de calorimetria, por outro lado, em maiores quantidades, tais partículas inibiram a hidratação do cimento em seu estado fresco, indicando assim que quanto maior a proporção utilizada, maiores serão as influências negativas na hidratação do cimento. *Pinus taeda* e *Bambusa vulgaris*, neste contexto, obtiveram boa compatibilidade na proporção de 5,0% em relação a massa do cimento, independente do processo de lavagem; fato oposto à espécie *Cereus jamacaru* que só apresentou boa compatibilidade após o tratamento com água. À 10,0% e à 33,0% de adição, os impactos foram de moderada e ruim compatibilidade, respectivamente, independentemente ou não de serem lavadas.

Com relação ao impacto da hidratação das pastas no estado endurecido, porém, observou-se uma tendência geral com ou sem pré-tratamento de partículas e adição de água de compensação de aumento dos produtos hidratados, fatos atribuídos, principalmente, a presença de água livre nas e gases nos materiais lignocelulósicos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fapemig (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] GLÓRIA, M.Y.R., “Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- [2] LATORRACA, J.V.F., IWAKIRI, S., LELIS, R.C.C., “Efeito inibidor de cinco espécies florestais sobre a cura do compósito cimento-madeira”, *Floresta e Ambiente*, v. 6, pp. 75-82, Dez. 2012.
- [3] ALI, M., LI, X., CHOUW, N., “Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete”, *Materials & Design*, v. 44, pp. 596-605, Fev. 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.038>.
- [4] LONG, W., WANG, Y., “Effect of pine needle fibre reinforcement on the mechanical properties of concrete”, *Construction & Building Materials*, v. 278, pp. 122333, Abr. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122333>.
- [5] REN, G., YAO, B., REN, M., *et al.*, “Utilization of natural sisal fibers to manufacture eco-friendly ultra-high performance concrete with low autogenous shrinkage”, *Journal of Cleaner Production*, v. 332, pp. 130105, Jan. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130105>.
- [6] CASTRO, V.G., AZAMBUJA, R.R., PARCHEN, C.F.A., *et al.*, “Alternative vibro-dynamic compression processing of wood-cement composites using Amazonian wood”, *Acta Amazonica*, v. 49, n. 1, pp. 75-80, Jan. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201800192>.
- [7] ARDANUY, M., CLARAMUNT, J., TOLEDO FILHO, R.D., “Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research”, *Construction & Building Materials*, v. 79, pp. 115-128, Mar. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>.
- [8] TICHI, A.H., BAZYAR, B., KHADEMIESLAN, H., *et al.*, “The effect of nano-wollastonite on biological, mechanical, physical and microstructural properties of the composite made of wood-cement fiber”, *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, v. 8, n. 3, pp. 1466-1479, Dez. 2016.
- [9] HAMOUDA, T., SEYAM, A.F.M., PETERS, K., “Evaluation of the integrity of 3D orthogonal woven composites with embedded polymer optical fibers”, *Composites. Part B, Engineering*, v. 78, pp. 79-85, Set. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.092>.
- [10] CASTRO, V.G.P., PARCHEN, C.F.A., IWAKIRI, S., “Produção de compósitos madeira-cimento de baixa densidade pelo método vibro-dinâmico de compactação”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 2, pp. 12351, Jun. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0666>.

- [11] LIMA, A.J.M., IWAKIRI, S., “Análise da redução da alcalinidade de compósitos cimento-madeira em função da substituição parcial do cimento Portland por pozolanas”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 4, pp. 12514, Nov. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0839>.
- [12] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Statistics* [Internet]. <http://www.fao.org/statistics/en/>, acessado em abril de 2022.
- [13] PEREIRA, D., SANTOS, D., VEDOVETO, M., *et al.*, *Fatos florestais da Amazônia*, 1 ed., Belém, IMAZON, 2010.
- [14] FAN, M., NDIKONTAR, M.K., ZHOU, X., *et al.*, “Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement”, *Construction & Building Materials*, v. 36, pp. 135-140, Nov. 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.089>.
- [15] SCRIVENER, K., SNELLINGS, R., LOTHENBACH, B., *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*, 1 ed., Boca Raton, CRC Press, 2016.
- [16] QUIROGA, A., MARZOCCHI, V., RINTOUL, I., “Influence of wood treatments on mechanical properties of wood-cement composites and of Populus Euroamericana wood fibers”, *Composites. Part B, Engineering*, v. 84, pp. 25-32, Jan. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.069>.
- [17] LI, F., LIU, J., “An experimental investigation of hydration mechanism of cement with silicane”, *Construction & Building Materials*, v. 166, pp. 684-693, Mar. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.164>.
- [18] FERREIRA, S.R., LIMA, P.R.L., SILVA, F.A., *et al.*, “Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 17, n. 2, pp. 1024-1034, Dez. 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>.
- [19] ZHOU, Y., KAMDEM, D.P., “Effect of cement/wood ratio on the properties of cement-bonded particle-board using CCA-treated wood removed from service”, *Forest Products Journal*, v. 52, n. 3, pp. 73-81, Mar. 2002.
- [20] SÁ, V.A., BUFALINO, L., ALBINO, V.C.S., *et al.*, “Mixture of three reforestation species on the cement-wood panels production”, *Revista Árvore*, v. 36, n. 3, pp. 549-557, Jun. 2012.
- [21] SULAIMAN, M.S., FATIMAH, S., RAMLE, S.F.M., *et al.*, “The classical mechanics engineered of *Bambusa vulgaris* and *Schizostachyum brachycladum*”, *Journal of Tropical Resources and Sustainable Science*, v. 6, n. 2, pp. 57-61, Dez. 2018.
- [22] SILVEIRA, M., MENALI, L., GLÓRIA, M., *et al.*, “Use of alternative aggregate for lightweight concrete production”, *Academic Journal of Civil Engineering*, v. 37, n. 2, pp. 576-582, Jun. 2019.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 16697 Cimento Portland – Requisitos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 11941 Madeira – Determinação da densidade básica*. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *14810-2 Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 14853 Madeira – Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona*. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7978 Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido*. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.
- [28] BROWNING, B.L., *The chemistry of wood*, 1 ed., New York, Interscience, 1963.
- [29] KENNEDY, F., PHILLIPS, G.O., WILLIAMS, E.P.A., *Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, ellis horwood*, 1 ed., Chichester, Ellis Horwood Ltd, 1987.
- [30] MESQUITA JÚNIOR, L., FARIA, D.L., GUIMARÃES JÚNIOR, J.B., *et al.*, “Compósitos à base de cimento e gesso reforçados com partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*”, *Ciência da Madeira*, v. 9, n. 3, pp. 191-198, Out. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n3p191-198x>.
- [31] DWECK, J., CUNHA, A.L.C., PINTO, C.A., *et al.*, “Thermogravimetry on calcined mass basis – Hydrated cement phases and pozzolanic activity quantitative analysis”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 97, n. 1, pp. 85-89, Jul. 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-008-9761-0>.

- [32] DWECK, J., MELCHERT, M.B.M., VIANA, M.M., *et al.*, “Importance of quantitative thermogravimetry on initial cement mass basis to evaluate the hydration of cement pastes and mortars”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 113, n. 3, pp. 1481-1490, Mar. 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-013-3112-5>.
- [33] DWECK, J., MELCHERT, M.B.M., CARTLEDGE, F.K., *et al.*, “A comparative study of hydration kinetics of different cements by thermogravimetry on calcined mass basis”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 128, n. 3, pp. 1335-1342, Jan. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-016-6080-8>.
- [34] GONÇALVES, J.P., TOLEDO FILHO, R.D., FAIRBAIRN, E.M.R., “Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica”, *Ambiente Construído*, v. 6, n. 4, pp. 83-94, Dez. 2006.
- [35] BALLARIN, A.W., PALMA, H.A.L., “Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L.”, *Revista Árvore*, v. 27, n. 3, pp. 371-380, Jun. 2003. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622003000300014>.
- [36] AZZINI, A., CIARAMELLO, D., “Bambu como matéria-prima para papel: IV. Estudos sobre o emprego de cinco espécies de Bambusa, na produção de celulose sulfato”, *Bragantia*, v. 30, n. 23, pp. 305-319, Maio. 1971. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87051971000200015>.
- [37] BRITO, J.O., TOMAZELLO FILHO, M., SALGADO, A.L.B., “Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu”, *IPEF*, n. 36, pp. 13-17, Ago. 1987.
- [38] ARAÚJO, F.F., FARIAS, D.P., NERI-NUMA, I.A., *et al.*, “Underutilized plants of the Cactaceae family: Nutritional aspects and technological applications”, *Food Chemistry*, v. 362, pp. 130196, Nov. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130196>. PubMed PMID: 34091165.
- [39] IWAKIRI, S., TRIANOSKI, R., *Painéis de madeira reconstituída*, 1 ed., Curitiba, Ajir Gráfica e Editora Ltd., 2020.
- [40] SUPIAN, A.B.M., JAWAID, M., RASHID, B., *et al.*, “Mechanical and physical performance of date palm/bamboo fibre reinforced epoxy hybrid composites”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 15, pp. 1330-1341, Dez. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.115>.
- [41] MAGALHÃES, W.L.E., BOLZON DE MUNIZ, G.I., MAZZA, R.A., “Tratamento mecânico visando o aumento da permeabilidade em madeira de *Pinus elliotti* Engelm VAR. *elliotti*”, In: *9º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*, v. 9, pp. 1-9, Cuiabá, Jul. 2004.
- [42] SANCHEZ-ECHEVERRI, L.A., GANJIAN, E., MEDINA-PERILLA, J.A., *et al.*, “Mechanical refining combined with chemical treatment for the processing of Bamboo fibres to produce efficient cement composites”, *Construction & Building Materials*, v. 269, pp. 121232, Fev. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121232>.
- [43] HUANG, Y., FEI, B., WEI, P., *et al.*, “Mechanical properties of bamboo fiber cell walls during the culm development by nanoindentation”, *Industrial Crops and Products*, v. 92, pp. 102-108, Dez. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.07.037>.
- [44] VADIVEL, K.S., GOVINDASAMY, P., “Characterization of natural cellulosic fiber from treated acacia arabica and pencil cactus fiber”, *Materials Today: Proceedings*, v. 46, pp. 3392-3397, Jan. 2021.
- [45] SHESHMANI, S., ASHORI, A., FARHANI, F., “Effect of extractives on the performance properties of wood flour-polypropylene composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, v. 123, n. 3, pp. 1563-1567, Ago. 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/app.34745>.
- [46] GARCÍA-CAYUELA, T., GÓMEZ-MAQUEO, A., GUAJARDO-FLORES, D., *et al.*, “Characterization and quantification of individual betalain and phenolic compounds in Mexican and Spanish prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill) tissues: a comparative study”, *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 76, pp. 1-13, Mar. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2018.11.002>.
- [47] TAYLOR, H.F., *Cement chemistry*, 1 ed., Londres, Academic Press, 1990.
- [48] LEE, G., CHOI, Y.C., “Effect of abaca natural fiber on the setting behavior and autogenous shrinkage of cement composite”, *Journal of Building Engineering*, v. 56, pp. 104719, Set. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104719>.
- [49] JANSEN, D., GOETZ-NEUNHOEFFER, F., LOTHENBACH, B., *et al.*, “The early hydration of ordinary Portland cement (OPC): An he early hydration of ordinary Portland cement (OPC): an approach comparing measured heat flow with calculated heat flow from QXRD”, *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 1, pp. 134-138, Jan. 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.001>.

- [50] TESSARO, A.B., “*Reforço de compósitos cimentícios aditivados com fibras de eucalipto e de pinus, puras e com teos*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, 2013.
- [51] TYDLITÁT, V., ZÁKOUTSKÝ, J., SCHMIEDER, M., *et al.*, “Application of large-volume calorimetry for monitoring the early-stage hydration heat development in cement-based composites as a function of W/C”, *Thermochimica Acta*, v. 546, pp. 44-48, Out. 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2012.07.028>.
- [52] NEVILLE, A.M., *Properties of concrete*, 5 ed., Harlow, Pearson Education Limited, 2012.
- [53] XIE, M., ZHONG, Y., LI, Z., *et al.*, “Study on alkylsilane-incorporated cement composites: hydration mechanism and mechanical properties effects”, *Cement and Concrete Composites*, v. 122, pp. 104161, Set. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104161>.