

SUBMETIDO 09/02/2022


APROVADO 30/05/2022

PUBLICADO ON-LINE 30/06/2022

PUBLICADO 10/10/2023

EDITORES ASSOCIADOS

Hugo Plínio de Andrade Alves e
Mariana Amorim Fraga


 Felipe Augusto Santiago
Hansted ^{[1]*}

 Ana Larissa Santiago
Hansted ^[2]

 Hiroyuki Yamamoto ^[3]

 André Luis Christoforo ^[4]

 Fábio Minoru Yamaji ^[5]

 Cristiane Inácio de Campos ^[6]

[1] felipe.hansted@unesp.br

[6] cristiane.campos@unesp.br

Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Brasil

[2] ahansted@grenfell.mun.ca

Memorial University, Greenfell Campus,
Canadá

[3] hiro@agr.nagoya-u.ac.jp

Departamento de Física da Madeira,
Universidade de Nagoya, Japão

[4] christoforoal@yahoo.com.br

Departamento de Engenharia Civil,
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar),
Brasil

[5] fmyamaji@ufscar.br

Departamento de Ciências Ambientais,
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar),
Brasil

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6646>

ARTIGO ORIGINAL

Potencial de reciclagem de resíduos de madeira e cinza de caldeira de biomassa em um material compósito cimentício

RESUMO: O resíduo florestal é todo e qualquer material que resulta da colheita ou do processamento da madeira que possa permanecer sem utilização definida no processo. As cinzas advindas da queima de carvão têm sido amplamente utilizadas em pesquisas; trabalhos com o uso de cinzas de biomassa, no entanto, ainda são recentes. O objetivo desta pesquisa consistiu em verificar a viabilidade da inserção de cinzas no traço de um compósito cimento-madeira. Foram realizados testes físicos para a determinação das propriedades físicas, densidade, inchamento e absorção de água, sendo também avaliadas a inibição do cimento com os materiais adicionais e a temperatura de hidratação da mistura. Para as cinzas, foram realizados testes para a obtenção do seu teor, avaliação da composição química, análise da distribuição granulométrica e espectroscopia de infravermelho com a transformada de Fourier (FTIR). A mistura com a cinza apresentou resultado superior em relação à mistura sem a cinza, nas propriedades de densidade e inchamento, dando indícios de que a utilização da cinza de biomassa é recomendada na fabricação de materiais cimentícios compósitos com resíduo de madeira, pois pode contribuir com menor degradação do material, que será avaliado em testes de durabilidade na sequência deste estudo.

Palavras-chave: caldeira de biomassa; cinza; compósitos cimentícios; propriedades físicas; resíduos de madeira.

Recycling potential of wood and ash residues from a biomass boiler in a cementitious composite material

ABSTRACT: Forest residue is any material that results from the harvesting or processing wood that may remain without a defined use in the process. Ash from burning coal has been widely used in research, however, work with the use of biomass ash is still recent. The objective of this research was to verify the

*Autor para correspondência.

feasibility of adding ash in the trace of a cement-wood composite. Physical tests were carried out to determine the physical properties, density, swelling and water absorption, and the inhibition of the cement with the additional materials and the hydration temperature of the mixture were also evaluated. For the ash, tests were carried out in order to obtain its content, evaluate its chemical composition, analyze its particle size distribution and infrared spectroscopy with the Fourier transform (FTIR). The mixture with ash showed superior results compared to the mixture without ash in the properties of density and swelling, indicating that the use of biomass ash is recommended in the manufacture of composite cementitious materials with wood waste, as it can contribute to less degradation of the material that will be evaluated in durability tests following this study.

Keywords: *ash; biomass boiler; cement-wood composites; forest residues; physical properties.*

1 Introdução

O resíduo de madeira representa uma grande parcela dos resíduos gerados nas atividades industriais, denotando grande importância econômica e ambiental. O potencial de reciclagem desse tipo de resíduo é, no entanto, subutilizado, principalmente devido à falta de alternativas ambientalmente corretas (BERGER; GAUVIN; BROUWERS, 2020).

Ressalte-se que o resíduo florestal é todo e qualquer material que resulta da colheita ou do processamento da madeira ou de outro recurso florestal que possa permanecer sem utilização definida no processo (NOLASCO, 2000).

No relatório de 2019 da Indústria Brasileira de Árvores, relata-se que, no ano anterior a esse, o setor florestal gerou 52 milhões de toneladas de resíduos no Brasil (IBÁ, 2019).

As cinzas oriundas da queima de carvão têm sido amplamente utilizadas em pesquisas como material suplementar ao cimento, no entanto, com o intuito de se encontrar alternativas mais sustentáveis, outros materiais têm sido estudados, como, por exemplo, a cinza do processo de queima de biomassa (STOLZ; BOLUK; BINDIGANAVILE, 2019).

O uso de partículas de madeira na fabricação de materiais de estrutura leve é estudado na literatura, principalmente sua utilização em painéis cimentícios destinados à vedação de ambientes (situação de baixa solicitação mecânica). É sabido que a madeira como agregado nesse tipo de material traz leveza e propriedades acústicas e térmicas favoráveis (STOLZ; BOLUK; BINDIGANAVILE, 2019).

Entre os materiais compósitos para aplicações em engenharia civil, o concreto geopolimérico ocupa um lugar preferencial. Esse é um material composto produzido a partir de agregados inorgânicos (como areia, cascalho ou cinza volante), unidos por um aglutinante polimérico (ou cola plástica), ao invés de aglutinante desenvolvido a partir de água e cimento, tal como é normalmente empregado em concreto de cimento (MARTÍNEZ-LÓPEZ *et al.*, 2015).

Dessa forma, a presente pesquisa teve como objetivo verificar a influência da inserção de cinzas de caldeira de biomassa nas propriedades físicas em um compósito cimentício cimento-madeira.

O presente trabalho conta com as seguintes seções: um breve referencial teórico é apresentado na seção 2; na seção 3, a metodologia da pesquisa desenvolvida é apresentada; na seção 4, são apresentados os resultados e discussões da pesquisa com a reciclagem de madeira das cinzas de caldeira de biomassa, em um material compósito cimentício. Por fim, na seção 5, apresentam-se as conclusões deste trabalho.

2 Referencial teórico

Nos últimos anos, tem crescido a atenção sobre os fatores ambientais, assim como sobre o próprio aquecimento global, fenômeno que acontece por conta da liberação de gases causadores do efeito estufa. Mesmo existindo incertezas sobre as mudanças climáticas, a comunidade científica entende que as mudanças são advindas da atividade humana (VILLAS-BÔAS; IWAKIRI; PARCHEN, 2020).

Entre todos os recursos naturais disponíveis, 20% a 50% desses recursos são utilizados na construção civil (DUARTE *et al.*, 2022), fato que gera preocupação, esta também profundamente associada na indústria dessa área.

A produção de cimento, por exemplo, é, muitas vezes, alvo de críticas, especialmente por conta da emissão de CO₂ em seu processo produtivo, o qual, além de ter altas emissões de gases de efeito estufa, consome uma quantidade significativa de matéria (HOSSAIN *et al.*, 2019).

Várias pesquisas têm sido exploradas no sentido de expandir a utilização de resíduos na indústria de base como siderúrgica e de cimento Portland (FEITOSA *et al.*, 2023). Isso ocorre devido ao fato de que a indústria de cimento apresenta impactos negativos no meio ambiente (GASPAR; BRITO, 2008). Além disso, com o esgotamento dos recursos naturais que são utilizados na produção de cimento, diversas pesquisas estão focadas em encontrar alternativas menos agressivas ao meio ambiente, entre elas a de incorporar resíduos em misturas de pastas cimentícias e mesmo no concreto, como se pretende expor neste trabalho.

Entende-se que existe uma mudança na forma como a sociedade encara o resíduo madeireiro. Este, até pouco tempo atrás entendido como lixo ou material sem utilidade, atualmente está sendo tratado como resíduo e visto como matéria-prima para outros processos (PARCHEN, 2012).

Uma das maneiras de se lidar com o problema do consumo exagerado de matérias-primas é diminuir a dependência na produção do cimento tradicional, fazendo surgir a demanda por produtos cimentícios alternativos (TAMANNA *et al.*, 2020).

Os concretos de estrutura leve têm sido pesquisados, principalmente, para a utilização na construção civil, já que, em sua maioria, esses apresentam uma boa relação resistência/peso, baixa condutibilidade térmica e boas características acústicas no sentido de isolamento (POSI *et al.*, 2013).

Zhuang *et al.* (2016) afirmam que as cinzas volantes podem ser originárias das usinas a carvão e que essa fonte de precursores existirá por muito mais tempo, pois há muitos países ricos em carvão cuja estrutura energética é fortemente baseada nessa tecnologia. Com o intuito, entretanto, de se encontrarem alternativas mais sustentáveis, outros materiais têm sido estudados, como, por exemplo, a cinza do processo de queima de biomassa (STOLZ; BOLUK; BINDIGANAVILE, 2019). O uso de partículas de madeira na fabricação de materiais de estrutura leve é estudado na literatura, principalmente para aplicação em painéis cimentícios.

Várias pesquisas têm sido feitas para que se possam substituir os materiais que provoquem um impacto ambiental na produção de cimento, incluindo até mesmo a mudança na produção do clínquer (material de etapa inicial de produção do cimento), melhorias tecnológicas no processo da calcinação, eficiência tecnológica e a utilização de cinzas (SHARMA; ARORA, 2018).

3 Método da pesquisa

Para este estudo, foi escolhido o cimento Portland do tipo V, de alta resistência inicial (CPV - ARI). Foram produzidos corpos de prova de cimento-madeira-cinza com resíduo de *Pinus* spp. e cinza do processo de queima de biomassa para geração de energia. As cinzas utilizadas no estudo foram geradas a partir de caldeiras de uma empresa situada no interior do estado de São Paulo, que utiliza exclusivamente a biomassa como combustível para a geração de energia térmica. Os tipos de biomassa que geraram essas cinzas podem variar ao longo do ano, conforme disponibilidade para a empresa, sendo possível destacar as seguintes: casca de eucalipto, pó de lixa, pó de serra, cavaco de eucalipto, poda urbana e resíduos da construção civil – estes últimos quando a construção envolve material lignocelulósico.

As partículas de madeira de *Pinus* spp. (resíduos gerados e coletados em serrarias localizadas na região sul do estado de São Paulo) foram classificadas como grossas (16 mesh) e finas (35 mesh). Para o delineamento experimental, a variável estabelecida foi a relação cimento-madeira-cinza, o que resultou em duas composições de traço para cada tipo de granulometria de madeira (fina e grossa), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 ►
Variações das
composições dos
traços.
Fonte: dados da
pesquisa

Variações	Traço (cimento: madeira: cinza: água)
Controle	(100: 0: 0: 45)
<i>MG</i>	(100: 30: 0: 45)
<i>MGc</i>	(80: 24: 20: 45)
<i>MF</i>	(100: 30:0 :45)
<i>MFc</i>	(80: 24: 20: 45)

Da Tabela 1, *MG* denota a variação de madeira de granulometria grossa sem adição de cinza; *MGc* indica a variação de madeira com granulometria grossa e adição de cinza; *MF* consiste na variação de madeira com granulometria fina sem adição de cinzas; e, por fim, *MFc* indica uma variação de madeira fina com adição de cinzas, e controle é o corpo de prova com apenas cimento e água.

Um tratamento no qual o resíduo de madeira foi imerso em água durante 24 horas para a remoção de extrativos inibidores da cura do cimento foi realizado, assim como proposto por Iwakiri e Prata (2008); após esse período, o resíduo foi seco em estufa laboratorial por 24 horas em uma temperatura de 60 °C.

O material compósito foi homogeneizado manualmente, misturando-se, inicialmente, o cimento, a cinza e a madeira e, por último, a água. A massa foi misturada por um período de, no máximo, três minutos (OKINO *et al.*, 2005). Para a manufatura dos corpos de prova, foram utilizados moldes quadrados de 75 mm de largura e 150 mm de altura. A cura ocorreu em temperatura média de 28,42 °C e umidade média de 64,42%, ambas

controladas, uma vez que os moldes foram colocados dentro de invólucros de material isolante.

A densidade (D) dos compósitos foi determinada com base na Equação 1, assim como determina a norma ABNT NBR 14810 (ABNT, 2018a), em que M é a massa e V é o volume das amostras.

$$D = \frac{M}{V} \quad (1)$$

O inchamento, I , e a absorção de água, A , utilizando as Equações 2 e 3, respectivamente, foram medidos pela imersão dos corpos de prova em água por 24 horas \pm 3 min, aplicando-se as normas NBR 14810 (ABNT, 2018a) e NBR NM 30 (ABNT, 2018b).

$$I = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$A = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (3)$$

Das Equações 2 e 3, E_1 e M_1 consistem na espessura e na massa das amostras medidas após a imersão em água, respectivamente, sendo E_0 e M_0 a espessura e a massa das amostras determinadas antes da imersão. Cabe destacar que foram fabricados três corpos de prova por tratamento para a determinação da densidade, do inchamento e da absorção de água após 24 horas de imersão.

O teor de cinzas foi avaliado com base na norma americana ASTM D1102-84 (ASTM, 2021). Esse material com teor de umidade próxima de 0% foi inserido em uma mufla à temperatura de 600 °C por um período de seis horas. Posteriormente, o material foi pesado e então calculado seu teor de cinzas em triplicata.

Para se realizar a análise química em microscópio eletrônico de varredura, com acoplamento de espectroscopia, por energia dispersiva, os componentes químicos tiveram de ser pré-estabelecidos, sendo esses: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), sódio (Na), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), carbono (C) total (HANSTED *et al.*, 2016).

O pH foi estabelecido em base de CaCl_2 , de acordo com a norma ASTM D4972 (ASTM, 2019). A caracterização espectroscópica das cinzas foi realizada no aparelho de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Amostras dos quatro tratamentos foram analisadas em um espectrofotômetro Nicolet IR 200 FT-IR.

As análises foram feitas considerando-se três réplicas – cinzas 1, 2 e 3. Para a leitura, foram confeccionados corpos de prova com cinzas e brometo de potássio (KBr), na proporção de 1:100 em massa, por recomendação do fabricante do aparelho.

Com relação à análise da inibição (II), a Equação 4 leva em conta não somente o tempo de hidratação e o tempo de endurecimento do cimento como também a variação máxima do tempo e da temperatura. Essa variação foi escolhida, especialmente, por levar em conta esses índices, o que não era considerado em estudos anteriores. As características físicas

e mecânicas dos materiais compósitos de cimento e madeira podem ser prejudicadas em virtude da incompatibilidade química do cimento com alguns materiais lignocelulósicos (HOFSTRAND; MOSLEMI; GARCIA, 1984).

$$II = \left[\left(\frac{t - t'}{t'} \right) \times \left(\frac{T' - T}{T'} \right) \times \left(\frac{S' - S}{S'} \right) \right] \times 100\% \quad (4)$$

com:

$$S' = \frac{\Delta T'}{\Delta t'} \quad e \quad S = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (5)$$

Da Equação 4, t é o tempo requerido para que a temperatura máxima da mistura madeira-cimento-água seja atingida; t' é o tempo requerido para que a temperatura máxima da mistura cimento-água seja atingida; T é a temperatura máxima atingida pela mistura água-cimento-madeira; T' é a temperatura máxima atingida pela mistura água-cimento; S é a variação máxima de temperatura, por hora, para a mistura cimento-água; e S' é a variação máxima de temperatura, por hora, para a mistura cimento-madeira-água. Vê-se, portanto, que a temperatura dos compósitos foi mensurada a cada hora, durante um período de 25 horas.

4 Resultados da pesquisa

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, ao se analisar o teor de cinzas das cinzas (material inorgânico remanescente da queima) em triplicata, notaram-se resultados estatisticamente equivalentes entre si (letras iguais) pelo teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) com um coeficiente de variação de 1,89%.

Tabela 2 ►

Resultados dos teores de cinzas.

Fonte: dados da pesquisa

Amostras cinzas	Médias (%)
Cinza 1	94,87 A
Cinza 2	98,46 A
Cinza 3	96,09 A

A literatura ressalta ainda que a umidade da biomassa inserida na caldeira aumenta também o teor de impurezas que fica aderido na caldeira. Isso pode resultar em maiores quantidades de geração de cinzas e, conseqüentemente, menor geração de calor em função da diminuição do material orgânico que participa da queima (HANSTED *et al.*, 2016).

A variabilidade de componentes químicos da cinza pode ocorrer em função da origem do material da queima, da temperatura da caldeira ou da adição de outros combustíveis ao processo (VINET; ZHEDANOV, 2011). Na Tabela 3, os resultados das análises dos componentes químicos são apresentados, sendo o parâmetro COT o carbono orgânico total.

Tabela 3 ►

Resultados dos componentes químicos das amostras coletadas de cinzas.

Fonte: dados da pesquisa

	Componentes (%)								Componentes (mg/kg)				
	N	P ₂ O ₃	K ₂ O	Ca	Mg	S	COT*	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	pH
Cinza 1	0,11	0,34	1,07	4,71	0,95	0,12	1	3213	68	11435	1355	93	12
Cinza 2	0,58	0,55	0,94	4,26	1,01	0,21	1	3598	74	19890	913	162	12
Cinza 3	0,12	0,24	0,64	3,63	0,72	0,06	1	4195	116	13485	747	192	12

* COT = carbono orgânico total.

A partir dos dados apresentados na Tabela 3, fica evidente que, ao analisar os constituintes das cinzas, encontramos elementos previamente mencionados na literatura, tais como óxidos e metais. Materiais reconhecidos como álcalis cáusticos, juntamente com Ca, Mg, K e P, demonstram uma correlação direta com o aumento do pH, conforme discutido por Wons *et al.* (2018).

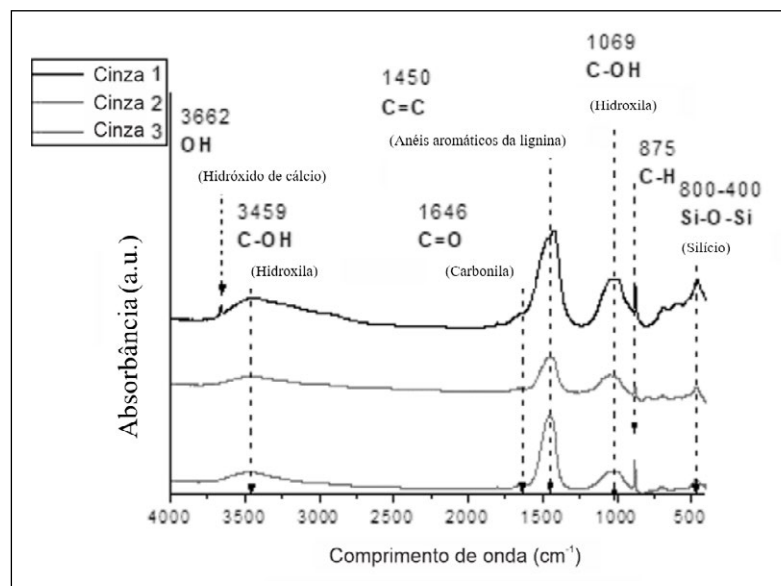
A granulometria para um material cimentício é um fator importante para que o material tenha um desempenho físico e mecânico. Quando se analisa a integração de materiais ao cimento, por exemplo, é necessário verificar que esse aspecto influencia na área superficial e na passagem de água para as camadas interiores do cimento (CORONA *et al.*, 2020). No caso em questão, as cinzas foram separadas em peneira de 20 mesh de abertura.

As bandas observadas na análise espectroscópica (Figura 1) nos comprimentos de 400 cm⁻¹ a 800 cm⁻¹ estão relacionadas à sílica presente na amostra (MARTIN *et al.*, 2007). A banda aproximada de 1450 cm⁻¹ pode indicar a deformação correspondente ao anel aromático de lignina (SOUZA JUNIOR *et al.*, 2010). Com relação ao grupo carbonila, foram observados, na região de 1646 cm⁻¹, picos levemente acentuados, isso provavelmente devido a sua proximidade com o anel aromático, o que pode ter causado uma sobreposição (LIMA; DIAS; MATENCIO, 2010). As bandas que se apresentam a 3662 cm⁻¹ podem indicar hidróxido de cálcio (PANZERA *et al.*, 2010).

Dessa forma, foi possível verificar que, embora a quantidade de compostos contaminantes possa variar, sua composição permanece a mesma.

Figura 1 ►

Caracterização espectroscópica da cinza coletada. C1 (> 2 mm), C2 (< 2 mm e > 0,84 mm) e C3 (< 0,85 mm).
Fonte: dados da pesquisa



Com relação ao tempo e temperatura de hidratação, a diferença entre as Figuras 2 e 3 indica que o tratamento da matéria-prima resultou em melhora no desempenho de hidratação, em termos de temperatura, porém redução em relação ao tempo desse processo. Ao mesmo tempo, a adição de cinzas nos compósitos apresentou uma pequena redução na temperatura de hidratação, podendo indicar que a cinza influencia diretamente no compósito, podendo ajudar na relação madeira-cimento.

Figura 2 ►

Temperatura de hidratação da mistura ARI (cimento de alta resistência inicial) sem tratamento.

Fonte: dados da pesquisa

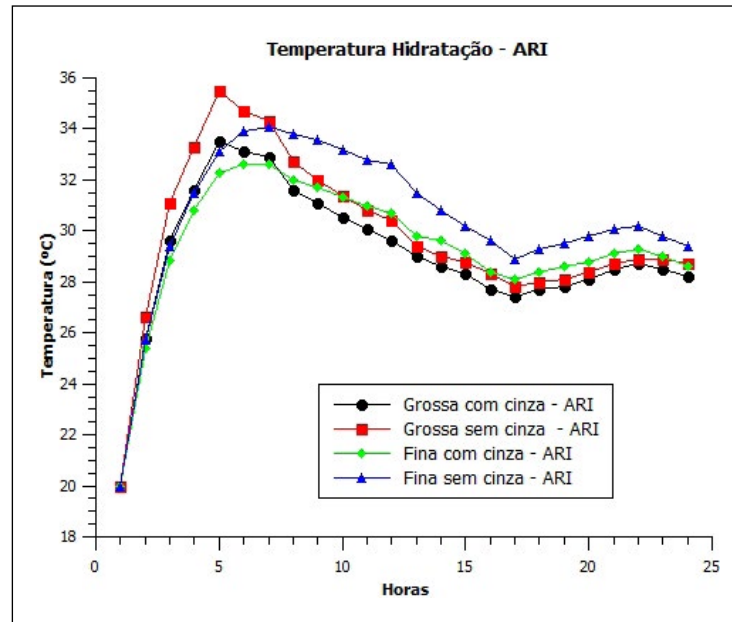
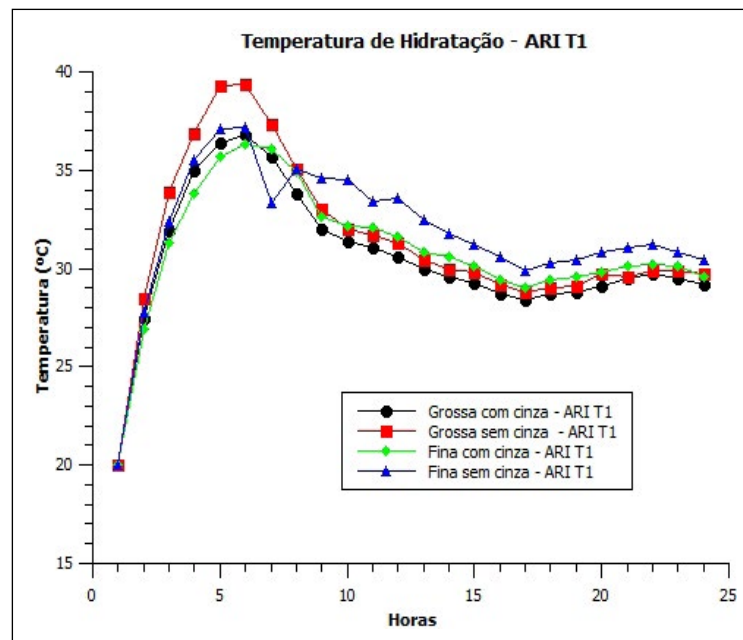


Figura 3 ►

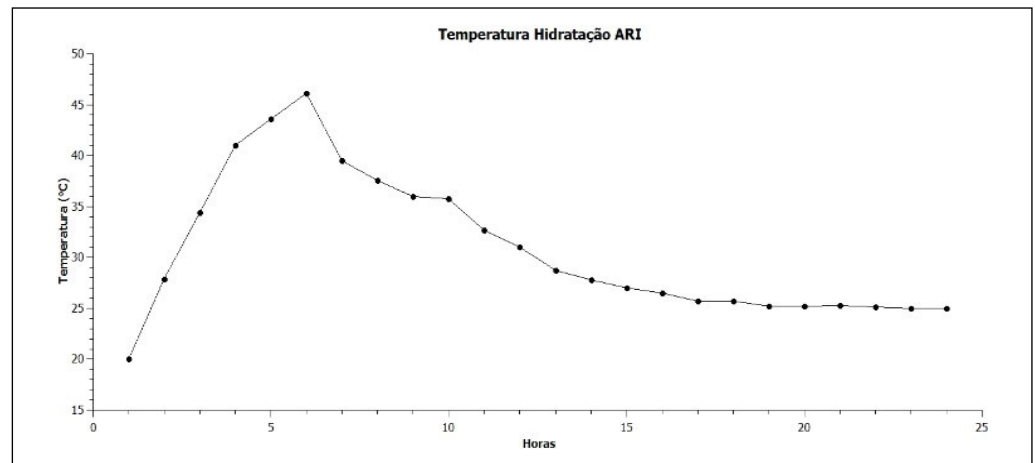
Temperatura de hidratação da mistura ARI com tratamento.

Fonte: dados da pesquisa



Ao se comparar a curva de hidratação da amostra com adição de madeira e cinza com a curva de hidratação do corpo de prova composto somente por cimento e água (Figura 4), fica evidente que a mistura realmente teve sua temperatura de hidratação reduzida, porém com o tempo de hidratação aumentado. A comparação, no entanto, deve ser realizada com amostras que já possuam madeira, uma vez que a dificuldade está nessa compatibilidade.

Figura 4 ►
Temperatura de hidratação dos materiais fabricados sem resíduos de madeira e de cinzas.
Fonte: dados da pesquisa



Para se avaliar a compatibilidade da madeira com o cimento, um dos testes mais difundidos e usados consiste em mensurar a elevação da temperatura de hidratação durante o processo de endurecimento da mistura cimento-madeira-água. Hofstrand, Moslemi e Garcia (1984) desenvolveram um índice baseados no índice clássico de Weatherwax e Tarkow (1964). Em seu novo índice, além do tempo de hidratação e da temperatura máxima da mistura cimento-madeira-água, Hofstrand, Moslemi e Garcia (1984) incorporaram a variação máxima do tempo e da temperatura (Equação 4).

Na Tabela 4, são apresentados os resultados do índice de compatibilidade (IC) dos compósitos fabricados, em que a letra *t* acrescentada sobre as siglas das quatro composições apresentadas na Tabela 1 indica que tais composições passaram por um tratamento.

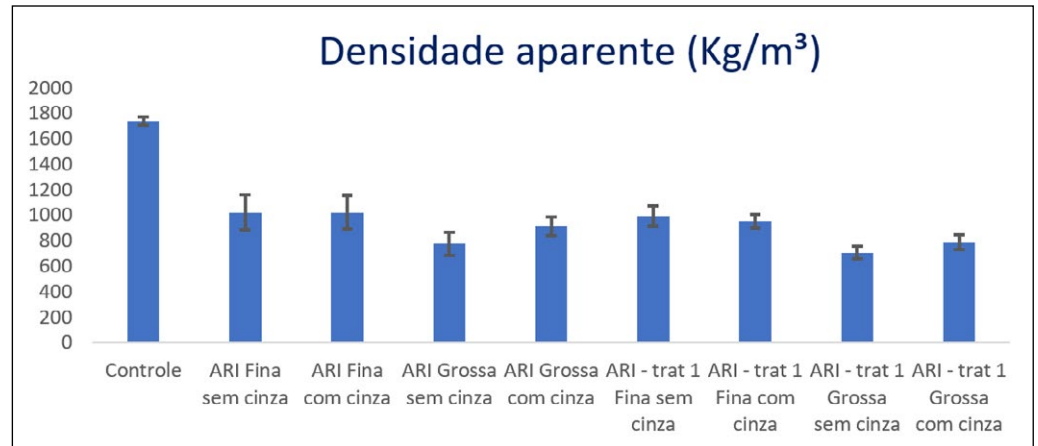
Tabela 4 ►
Compatibilidade cimento-madeira.
Fonte: dados da pesquisa

Variações	Índice de compatibilidade (%)
<i>MG</i>	3
<i>MGc</i>	83
<i>MF</i>	-17
<i>MFc</i>	128
<i>MG-t</i>	70
<i>MGc-t</i>	76
<i>MF-t</i>	249
<i>MFc-t</i>	340

Pode-se classificar a compatibilidade da composição madeira-cimento, ou a inibição da madeira ao cimento, em quatro categorias: baixa (*IC* < 10%); moderada (*IC* entre 10% e 50%); alta (*IC* entre 50% e 100%); e extrema (*IC* > 100%) (OKINO *et al.*, 2005).

A densidade dos compostos cimentícios sofreu alterações significativas quando comparada com a densidade dos materiais fabricados apenas com água e cimento, como ilustrado na Figura 5, cabendo destacar que o valor do coeficiente de variação (*CV*) variou de 1,91% a 13,25%.

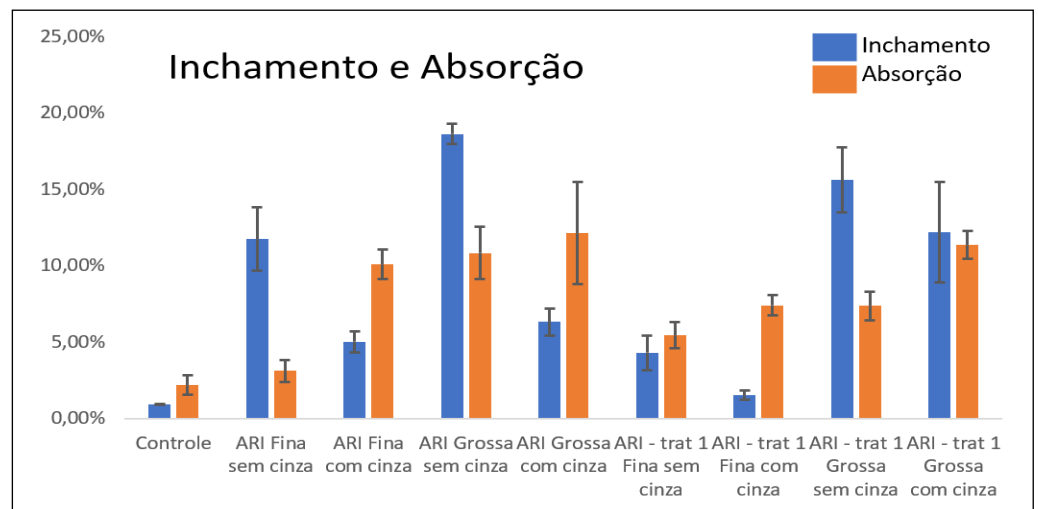
Figura 5 ►
Valores médios da densidade das composições experimentais avaliadas.
Fonte: dados da pesquisa



É possível perceber que todas as misturas tiveram uma redução significativa na densidade quando comparadas com o cimento sem mistura. Mesmo que não apresentem diferença estatisticamente significativa entre si pelo teste de Tukey (5% de significância), nota-se uma tendência de aumento na densidade quando o composto contém cinzas.

Os valores médios do inchamento e da absorção de água dos compósitos, após 24 horas de imersão em água, são apresentados na Figura 6, cabendo destacar que o valor do coeficiente de variação (*CV*) para o inchamento variou de 1% a 25%, enquanto para a absorção o *CV* variou de 9% a 26%.

Figura 6 ►
Inchamento e absorção dos compósitos com e sem tratamento.
Fonte: dados da pesquisa



A adição de cinzas indicou redução do inchamento em espessura, o que é favorável e pode ser justificado pelo fato de a granulometria reduzida apresentar melhor interação com o cimento, reduzindo vazios nos compósitos. No entanto, por ser um material composto de uma quantidade significativa de cálcio, a adição de cinzas apresentou tendência de aumento da absorção de água, o que seria diferente se a presença de sílica nas cinzas fosse maior (GHEWA *et al.*, 2020).

O tratamento de imersão em água, apesar de interferir de maneira negativa na temperatura de hidratação, diminuindo a temperatura máxima, nos quesitos inchamento e absorção de água apresentou resultados significativamente menores pela análise de variância (5% de significância), possivelmente porque o tratamento remove da madeira compostos que podem incompatibilizar a cura do cimento.

Na literatura, encontram-se alguns motivos para essa possível incompatibilidade, ou inibição, entre a madeira e o cimento. O primeiro e mais comum motivo é, como citado, que os extrativos da madeira podem influenciar diretamente na cura do cimento, pois a madeira possui vários extrativos orgânicos que, quando em contato com íons metálicos da solução de cimento, diminuem a concentração de Ca^{2+} , o que possivelmente atrapalha o equilíbrio da reação natural do cimento, fazendo com que o começo da nucleação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ seja atrasado, assim como a formação de gel de CSH. Outro possível motivo para tal é a formação, por parte desses compostos orgânicos, de uma fina camada de absorção nas superfícies dos grãos de cimento, o que, por sua vez, atrapalha diretamente a hidratação do material (HACHMI; MOSLEMI; CAMPBELL, 1990; NA *et al.*, 2014).

No trabalho de Yasuda, Ima e Matsushita (2002), os autores mencionam que a glicose e a sacarose são os principais inibidores do endurecimento do cimento quando misturados com a madeira japonesa *Hannoki* (*Alnus japonica*), uma vez que esses compostos são metabolizados mesmo após o corte.

Também é observado que mesmo pequenas quantidades de hemicelulose podem influenciar diretamente no processo de endurecimento e cura do compósito cimentício, assim como na hidratação da pasta no geral (GOVIN *et al.*, 2005).

5 Conclusões

O processo de inserção de cinza de caldeira no material cimentício se mostrou vantajoso nas análises quando comparado com a mistura sem a adição de cinza, pois indicou redução do inchamento em espessura do compósito, o que é favorável, especialmente pensando-se na degradação do material lignocelulósico quando em constante contato com água, resultado que pode ser comprovado na sequência do estudo, com a realização de testes de durabilidade.

A adição de madeira à pasta cimentícia apresenta redução na temperatura de hidratação; no entanto, a proposta do compósito cimento-madeira-cinza visa a uma aplicação diferente da pasta cimentícia. As diferentes variações para os compósitos estudados visam a aplicações na construção civil para forros e revestimentos sem desempenho estrutural.

A temperatura de hidratação diminuiu significativamente, fosse pela incorporação do resíduo de madeira, por ser um material higroscópico, fosse por sua área superficial, devido à granulometria muito fina alterar a reação cimento-água. Outro fator relacionado à diminuição da hidratação se deve à redução da compatibilidade dos compostos, devido à quantidade de açúcares presente na madeira. Destaca-se, entretanto, que um tratamento simples na madeira pode melhorar essa compatibilidade.

Estudos futuros para analisar as propriedades mecânicas e de lixiviação do compósito se mostram necessários, assim como uma análise mais longa relacionada ao ciclo de vida de produto também se mostra importante.

Financiamento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810**: Chapas de madeira aglomerada. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1102-84**. Standard test method for ash in wood. West Conshohocken: ASTM, 2021.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4972**. Standard test method for ph of soils. West Conshohocken: ASTM, 2019.

BERGER, F.; GAUVIN, F.; BROUWERS, H. J. H. The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite. **Construction and Building Materials**, v. 260, 119786, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119786>.

CORONA, B.; SHEN, L.; SOMMERSACHER, P.; JUNGINGER, M. Consequential Life Cycle Assessment of energy generation from waste wood and forest residues: the effect of resource-efficient additives. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, 120948, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120948>.

DUARTE, J. B.; RAMOS FILHO, R. E. B.; FONSÊCA, N. J. M.; DIAS, L. N.; SILVA, V. M.; ACCHAR, W. Adição conjunta do resíduo de cerâmica vermelha e da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de tijolos ecológicos. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 59, n. 4, p. 1118-1136, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5528>.

FEITOSA, C. J. D.; LIMA, V. M. E.; SILVA, J. K. F.; MATIAS, A. V.; ESTOLANO, A. M. L.; MELO NETO, A. A. Caracterização e aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em misturas de concreto seco. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 60, n. 3, p. 1-15, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6535>.

GASPAR, P. L.; BRITO, J. Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: a comparison between different degradation indicators. **Building and Environment**, v. 43, n. 11, p. 1818-1828, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.022>.

GHEWA, G. J. P.; SUPROBO, P.; IRAWAN, D.; WAHYUNIARSIH, S.; ASDAM, T. Investigation of water absorption for concrete using supplementary materials. **IPTEK – The Journal for Technology and Science**, v. 31, n. 3, p. 309-317, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.12962/j20882033.v31i3.5596>.

GOVIN, A.; PESCHARD, A.; FREDON, E.; GUYONNET, R. New insights into wood and cement interaction. **Holzforschung**, v. 59, n. 3, p. 330-335, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1515/HF.2005.054>.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A.; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**, v. 24, n. 4, p. 345-354, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00227055>.

HANSTED, A. L. S.; NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; YAMAJI, F. M. Caracterização físico-química da biomassa de *Leucaena leucocephala* para produção de combustível sólido. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, p. 1449-1460, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20160102>.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky mountain species mixed with Portland cement. **Forest Products Journal**, v. 34, n. 2, p. 57-61, 1984. Disponível em: <https://www.scienceopen.com/document?vid=e4f4c0c0-84a7-45d3-a4e4-2bd47cfea04>. Acesso em: 10 ago. 2019.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; WONG, M. Y. K.; KHINE, A. Techno-environmental feasibility of wood waste derived fuel for cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 663-671, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.132>.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**: Report 2019. São Paulo: IBÁ, 2019. p. 1-80. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2020.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis de cimento-madeira. **CERNE**, v. 14, n. 1, p. 68-74, 2008. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/744/74414109.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2019.

LIMA, J. S.; DIAS, M. C.; MATENCIO, T. Aplicação da espectroscopia no infravermelho e difração de raio-x na determinação de sacarina em adoçantes líquidos artificiais pelo método volumétrico com Ag⁺. **Eclética Química**, v. 35, n. 4, p. 25-32, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-46702010000400003>.

MARTIN, C. S.; TEIXEIRA, S. R.; LANFREDI, S.; NOBRE, M. A. L. Análise via espectroscopia no infravermelho da sílica proveniente da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 30., 2007, Águas de Lindóia. **Anais [...]**. Águas de Lindóia: SBQ, 2007. p. 1-2. Disponível em: <http://sec.s bq.org.br/cdrom/30ra/resumos/T1951-1.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2022.

MARTÍNEZ-LÓPEZ, M.; MARTÍNEZ-BARRERA, G.; BARRERA-DÍAZ, C.; UREÑA-NÚÑEZ, F.; BROSTOW, W. Waste materials from tetra pak packages as reinforcement of polymer concrete. **International Journal of Polymer Science**, v. 2015, p. 1-8, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/763917>.

NA, B.; WANG, Z.; WANG, H.; LU, X. Wood-cement compatibility review. **Wood Research**, v. 59, n. 5, p. 813-826, 2014. Disponível em: <http://www.woodresearch.sk/wr/201405/10.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2022.

NOLASCO, A. M. **Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta - *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.**: caracterização e perspectivas. 2000. Tese (Doutorado em Ciências

da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001098472>. Acesso em: 23 jul. 2021.

OKINO, E. Y. A.; SOUZA, M. R.; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. S.; SOUSA, M. E.; TEIXEIRA, D. E. Physico-mechanical properties and decay resistance of *Cupressus* spp. cement-bonded particleboards. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 3, p. 333-338, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.046>.

PANZERA, T. H.; SABARIZ, A. L. R.; STRECKER, K.; BORGES, P. H. R.; VASCONCELOS, D. C. L.; WASCONCELOS, W. L. Propriedades mecânicas de materiais compósitos à base de cimento Portland e resina epoxi. **Cerâmica**, v. 56, n. 337, p. 77-82, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000100013>.

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com compactação vibro dinâmica**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/28935>. Acesso em: 4 jun. 2022.

POSI, P.; LERTNIMOOLCHAI, S.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 896-901, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.094>.

SOUZA JUNIOR, F. G.; PICCIANI, P. H. S.; ROCHA, E. V.; OLIVEIRA, G. E. Estudo das propriedades mecânicas e elétricas de fibras de curauá modificada com polianilina. **Polímeros**, v. 20, n. 5, p. 377-382, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000058>.

SHARMA, S.; ARORA, S. Economical graphene reinforced fly ash cement composite made with recycled aggregates for improved sulphate resistance and mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 608-612, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.027>.

STOLZ, J.; BOLUK, Y.; BINDIGANAVILE, V. Wood ash as a supplementary cementing material in foams for thermal and acoustic insulation. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 104-113, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.174>.

TAMANNA, K.; RAMAN, S. N.; JAMIL, M.; HAMID, R. Utilization of wood waste ash in construction technology: a review. **Construction and Building Materials**, v. 237, 117654, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117654>.

VILLAS-BÔAS, B. T.; IWAKIRI, S.; PARCHEN, C. F. A. Produção e caracterização de blocos vazados de cimento-madeira de baixa densidade para construção civil. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, e3177, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.22>.

VINET, L.; ZHEDANOV, A. A ‘missing’ family of classical orthogonal polynomials. **Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical**, v. 44, n. 8, 085201, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>.

WEATHERWAX, R. C.; TARKOW, H. Effect of wood on setting of Portland cement. **Forest Products Journal**, v. 14, p. 567-568, 1964. Disponível em: <https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1292613>. Acesso em: 15 mar. 2021.

WONS, W.; RZEPA, K.; REBEN, M.; MURZYN, P.; SITARZ, M.; OLEJNICZAK, Z. Effect of thermal processing on the structural characteristics of fly ashes. **Journal of Molecular Structure**, v. 1165, p. 299-304, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.008>.

YASUDA, S.; IMA, K.; MATSUSHITA, Y. Manufacture of wood-cement boards VII: cement-hardening inhibitory compounds of hannoki (Japanese alder, *Alnus japonica* Steud.). **Journal of Wood Science**, v. 48, p. 242-244, 2002. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/BF00771375>.

ZHUANG, X. Y.; CHEN, L.; KOMARNENI, S.; ZHOU, C. H.; TONG, D. S.; YANG, H. M.; YU, W. H.; WANG, H. Fly ash-based geopolymers: clean production, properties and applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 125, p. 253-267, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>.