



ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTABILIDADE NA AGROINDÚSTRIA: UMA REVISÃO SOBRE O USO DE CINZAS DE BIOMASSA EM MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS

CIRCULAR ECONOMY AND SUSTAINABILITY IN AGROINDUSTRY: A REVIEW ON THE USE OF BIOMASS ASH IN GEOPOLYMERIC MATERIALS

ECONOMÍA CIRCULAR Y SOSTENIBILIDAD EN LA AGROINDUSTRIA: UNA REVISIÓN SOBRE EL USO DE BIOMASA DE CENIZAS EN MATERIALES GEOPOLÍMEROS

Lisandro Simão¹; Afonso Henrique da Silva Júnior²; Patricia Viera de Oliveira³; Leandro Pellenz⁴; Carlos Rafael Silva de Oliveira⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/IIICIAGRO.0075>

RESUMO

A geração de resíduos nos diversos setores produtivos pode causar diversos impactos ambientais se não forem destinados de maneira correta. Os complexos agroindustriais, assim como os demais processos produtivos, geram diversas tipologias de resíduos. Alguns destes resíduos são materiais orgânicos/biomassa e que podem ser utilizados como combustível para produção de energia, gerando posteriormente as cinzas desta biomassa queimada. Estas cinzas de biomassa podem ser utilizadas em materiais cimentícios, tal como os geopolímeros. Os geopolímeros são materiais alternativos ao cimento Portland que tem, dentre outras características, excelentes propriedades mecânicas e menores níveis de emissão de CO₂ em sua produção. Suas matérias-primas tradicionais incluem os precursores metacaulim, cinzas de carvão, escória de alto forno, e os ativadores alcalinos silicato de sódio e hidróxido de sódio. Neste trabalho uma revisão da literatura foi realizada buscando os diversos estudos que utilizam cinzas de biomassa proveniente de diferentes complexos agroindustriais para obtenção de novos materiais geopoliméricos. Os resultados preliminares demonstram que as cinzas da casca de arroz e cinzas de biomassa proveniente do processo de obtenção de óleo de palma são amplamente estudadas para este fim, tendo inclusive melhoras significativas nas propriedades dos geopolímeros obtidos. O uso destas cinzas é normalmente para substituição do precursor metacaulim comercial, embora estudos recentes tenham sido realizados e demonstrado potencial para produção de ativadores alcalinos alternativos a partir destas cinzas. O controle de queima destas biomassas para gerar cinzas de qualidade

¹ Engenheiro Ambiental e Sanitarista (Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC), Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais (Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC), lisandrosimao@gmail.com

² Engenheiro Agroindustrial-Agroquímico (Universidade Federal do Rio Grande – FURG), Mestre em Engenharia Química, Doutorando em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), afonso.silva@posgrad.ufsc.br

³ Engenheira Química, Mestre em Nanociências (Universidade Franciscana), Doutoranda em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), p.v.oliveira@posgrad.ufsc.br

⁴ Engenheiro Ambiental e Sanitarista, Mestre em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis (Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS), Doutorando em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), leandropellenz@hotmail.com

⁵ Engenheiro Têxtil (Universidade Estadual de Maringá – UEM), Doutor em Engenharia Química (UFSC), carlos.oliveira@ufsc.br

se tornam um dos principais desafios para aplicações futuras destas fontes minerais alternativas para o processo de geopolimerização.

Palavras-Chave: Geopolímeros, Economia Circular, Sustentabilidade.

RESUMEN

La generación de residuos en los diversos sectores productivos puede ocasionar diversos impactos ambientales si no son dispuestos correctamente. Los complejos agroindustriales, así como los demás procesos productivos, generan distintos tipos de residuos. Algunos de estos residuos son materiales orgánicos/biomasa que pueden ser utilizados como combustible para la producción de energía, generando posteriormente las cenizas de esta biomasa quemada. Estas cenizas de biomasa se pueden utilizar para su uso en materiales cementosos como los geopolímeros. Los geopolímeros son materiales alternativos al cemento Portland que presentan, entre otras características, excelentes propiedades mecánicas y menores niveles de emisión de CO₂ en su producción. Sus materias primas tradicionales incluyen precursores de metacaolín, cenizas de carbón, escoria de alto horno y los activadores alcalinos silicato de sodio e hidróxido de sodio. En este trabajo se realizó una revisión bibliográfica buscando los diferentes estudios que utilizan cenizas de biomasa de diferentes complejos agroindustriales para la obtención de nuevos materiales geopoliméricos. Los resultados preliminares muestran que la ceniza de cascarilla de arroz y la ceniza de biomasa del proceso de aceite de palma son ampliamente estudiadas para este propósito, incluyendo mejoras significativas en las propiedades de los geopolímeros obtenidos. El uso de estas cenizas normalmente es para reemplazar el precursor comercial del metacaolín, aunque estudios recientes han demostrado el potencial para la producción de activadores alcalinos alternativos a partir de estas cenizas. El control de la quema de estas biomásas para generar cenizas de calidad se convierte en uno de los principales retos para futuras aplicaciones de estas fuentes alternativas de minerales para el proceso de geopolimerización.

Palabras Clave: Geopolímeros, Economía Circular, Sostenibilidad

ABSTRACT

The waste generation in the various productive sectors can cause several environmental impacts if they are not disposed of correctly. The agro-industrial complexes, as well as the other production processes, generate different types of waste. Some of these wastes are organic/biomass materials that can be used as fuel for energy production, later generating the ashes of this burned biomass. These biomass ashes can be used in cementitious materials such as geopolymers. Geopolymers are alternative materials to Portland cement that have, among other characteristics, excellent mechanical properties and lower levels of CO₂ emission in their production. Its traditional raw materials include metakaolin precursors, coal ash, blast furnace slag, and sodium silicate and sodium hydroxide alkaline activators. A literature review was carried out in this work looking for the different studies that use biomass ash from different agro-industrial complexes to obtain new geopolymeric materials. Preliminary results show that rice husk ash and biomass ash from the palm oil process is widely studied, including significant improvements in the properties of the obtained geopolymers. The use of this ash usually replaces the commercial metakaolin precursor. However, recent studies have been carried out and have demonstrated the potential for producing alternative alkaline activators from this ash. The burning control of these biomasses to generate quality ash becomes one of the main challenges for future applications of these alternative mineral sources for the geopolymerization process.

Keywords: Geopolymers, Circular Economy, Sustainability

INTRODUÇÃO

A extração de matérias-primas para os mais diversos setores produtivos tem se tornado um grande problema para o meio ambiente, não só pelos impactos ambientais recorrentes do processo de extração, mas também pela destinação inadequada dos resíduos gerados nos seus respectivos processos produtivos. O descarte inadequado de resíduos sólidos industriais pode causar lixiviação de compostos perigosos no solo e nas águas subterrâneas, causando poluição ambiental e colocando em risco a saúde humana (REN et al., 2021). A valorização de resíduos busca reutilizar e dar um destino mais nobre a estes materiais, que dependendo das suas composições química e mineralógica podem substituir as matérias-primas tradicionais comumente comercializadas (SIMÃO et al., 2021c).

Em termos de aplicabilidade, a valorização de resíduos em materiais cimentícios tem sido bastante utilizada, pois estes materiais reúnem algumas características que inertizam/estabilizam os efeitos tóxicos de alguns elementos. Além disso, alguns tipos de resíduos possuem composições químicas e mineralógicas que as potencializam para substituir parcialmente ou totalmente as matérias-primas tradicionais, tendo ganhos inclusive nas propriedades do produto final (MARTINS et al., 2007).

O cimento Portland é um dos materiais sintéticos mais utilizados na construção atualmente e é também um importante material da civilização humana moderna. No entanto, a produção de cimento enfrenta alto consumo de energia e recursos, trazendo problemas ao meio ambiente principalmente em relação a emissão de CO_2 (REN et al., 2021; ZHAO et al., 2021).

Os materiais cimentícios feitos com cimento Portland, tais como argamassas e concretos, quando submetidos a temperaturas de 800 a 1000 °C desencadeiam uma diminuição da resistência residual para 20 a 30% do valor inicial. Este efeito acontece devido a desidratação do CSH (principal fase hidratada do cimento Portland), agregados e outros hidratos cristalinos (FAROOQ et al., 2021).

Os geopolímeros são uma nova classe de materiais inorgânicos ambientalmente mais amigáveis e que tem sido imensamente pesquisados nos últimos anos para substituir o cimento Portland e em outras aplicações como materiais porosos (NOVAIS; PULLAR; LABRINCHA, 2020). Os precursores dos geopolímeros sofrem geopolimerização na presença de um meio alcalino e formam uma estrutura amorfa a semicristalina que desenvolve resistência mecânica

similar ou até maior que o cimento convencional (FAROOQ et al., 2021). Estes materiais possuem excelente trabalhabilidade, alta resistência mecânica, resistência ao calor, resistência a ácidos, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, dentre outras (REN et al., 2021).

Os geopolímeros apresentam baixo consumo de energia, baixo nível de emissões de CO₂ e excelentes propriedades, além de poderem incorporar em suas formulações materiais residuais. Os geopolímeros à base de resíduos sólidos podem promover a redução, reciclagem e valorização dos resíduos sólidos, tornando-os materiais ecologicamente corretos e mais sustentáveis (REN et al., 2021; ZHAO et al., 2021). Além disso, os geopolímeros exibem propriedades de resistência ao fogo em temperaturas mais altas devido à presença de nanoporos dispersos na microestrutura que permite a evaporação e migração de vapores de água sem prejudicar o material (FAROOQ et al., 2021). Esta água não faz parte da estrutura e, portanto, ajuda a entender a maior resistência térmica dos geopolímeros em comparação aos cimentos Portland.

Entre as estratégias de desenvolvimento sustentável, a tecnologia de geopolimerização oferece muitas vantagens, tais como: Estabilização de elementos perigosos na matriz geopolimérica; Valorização de um grande volume de resíduos no setor de construção e consequentemente minimização de impactos ambientais; e Redução significativa das emissões de gases de efeito estufa quando comparado ao cimento Portland comum (MABROUM et al., 2020).

A agricultura é uma indústria crítica em países como os Estados Unidos, China, Índia, África, Brasil, Paquistão e outros. Extensas quantidades de resíduos de biomassa dos subprodutos da colheita e produção de novos produtos (folhas, palha, caule, etc.) são geralmente aterrados e usados como fertilizantes ou combustível de biomassa. Durante um processo de combustão controlada (que aquece até 900 °C), a sílica amorfa dos resíduos de biomassa é convertida em sílica altamente reativa (SiO₂) e irá compor as cinzas residuais do processo (THOMAS et al., 2021).

Neste trabalho é realizado uma revisão da literatura sobre cinzas de diferentes tipologias de biomassa que são na maioria das vezes enviadas a aterros e não tem uma aplicação definida. Estes materiais podem ser utilizados para uso em materiais geopoliméricos, que por sua vez, tem diferentes aplicações possíveis.

METODOLOGIA

O artigo de revisão foi elaborado fazendo primeiramente uma pesquisa nas principais bases de dados da literatura com as palavras chaves: “Biomass ash”, “geopolymer” e “Alkali activated materials”. Os principais artigos de revisão e experimentais sobre a temática foram avaliados buscando estruturar os tópicos deste trabalho, a citar: Materiais geopoliméricos, Cinzas de biomassa gerada na agroindústria e Cinzas de biomassa usadas em geopolímeros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS

Os geopolímeros são materiais quimicamente ligados e teve sua nomenclatura criada em 1972 por um pesquisador chamado Joseph Davidovits. Sua estrutura é composta por uma rede tridimensional de tetraedros de silício e tetraedros de alumínio conectados através de pontes de oxigênio com um elemento metálico alcalino contrabalanceando a carga negativa do alumínio na quarta coordenação (DAVIDOVITS, 2008). Estes materiais geopoliméricos são produzidos a partir da mistura de precursores de aluminossilicatos comerciais (metacaulim) e ativadores alcalinos (hidróxido de sódio, silicato de sódio e hidróxidos e silicatos de potássio). Suas vantagens incluem elevados valores de propriedades mecânicas, alta durabilidade, resistências térmicas e a ácidos, baixo custo e baixa emissão de CO₂ (REN et al., 2021). Os geopolímeros têm uma redução na emissão de CO₂ que pode chegar até 80% dos valores emitidos pelo cimento Portland (SHEHATA et al., 2022). Suas aplicações incluem uso como blocos de construção, revestimentos, adesivos, encapsulamento de materiais perigosos, materiais à prova de fogo, reparos de emergência, uso como adsorventes, reguladores de pH, dentre outros (NOVAIS; PULLAR; LABRINCHA, 2020; REN et al., 2021).

Os geopolímeros têm outras vantagens como a solidificação/estabilização de metais pesados devido à eficiência de cura, resistência ao congelamento-descongelamento, resistência ao calor e durabilidade. A tecnologia de solidificação/estabilização pode imobilizar (geralmente mais de 90%) elementos tóxicos como Pb, Ba, As, Sr, Mn, Zn e Cd (REN et al., 2021; SHEHATA et al., 2022).

A estrutura e as propriedades dos geopolímeros são influenciadas por diferentes fatores de características da matéria-prima, tais como a relação Si/Al, tamanho de partícula, fases

mineralógicas e o conteúdo amorfo (MABROUM et al., 2020; REN et al., 2021). As pesquisas mostram que Si, Al e Ca têm também uma influência importante nas propriedades dos geopolímeros obtidos (LAN et al., 2022). A estrutura dos geopolímeros são semelhante ao das zeólitas, mas a diferença é que o geopolímero é amorfo ou semi cristalino e tem estruturas mesoporosas e relativamente densas, enquanto que os materiais zeolíticos naturais são geralmente cristalinos e com uma microporosidade característica de cada tipologia (ZHAO et al., 2021).

A estrutura química dos geopolímeros na teoria de Davidovits segue a seguinte fórmula envolvendo os compostos de SiO_2 , Al_2O_3 e Na_2O (Equação 1):

$$M_n\{-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2\}_n \times w\text{H}_2\text{O} \quad (\text{Equação 1})$$

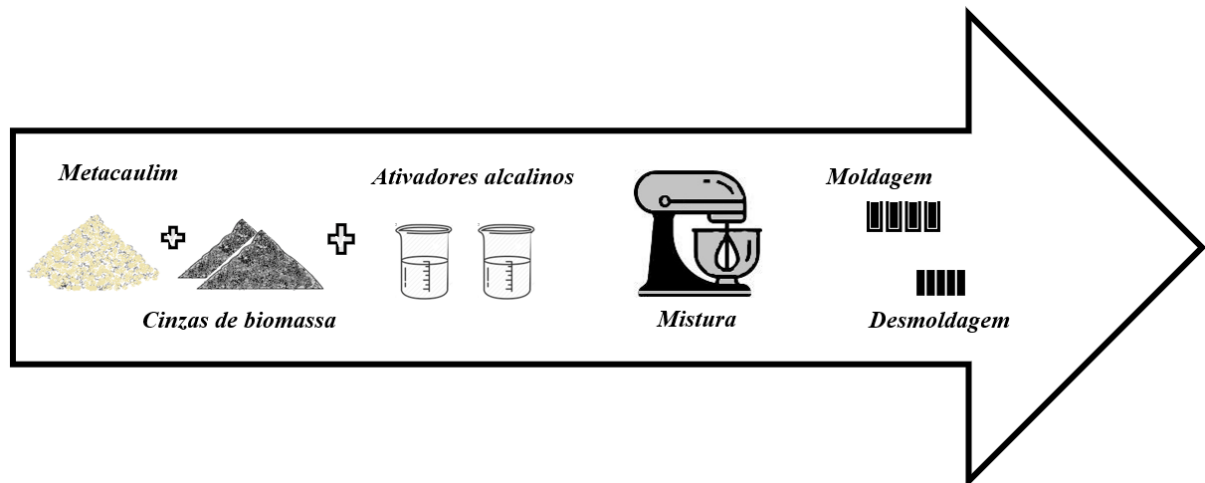
onde, M é o cation de metal alcalino (Na^+ , K^+); n é o grau de condensação; w é o número de moléculas de água quimicamente ligadas; e z é a razão de silício/alumínio (Si/Al) (DAVIDOVITS, 2008; LAN et al., 2022).

A presença de silicato solúvel na solução ativadora de um geopolímero é conhecida por produzir um material mais denso e compacto com maior resistência mecânica em comparação com geopolímeros ativados por hidróxido. No entanto, essas soluções de silicato são o componente mais caro dos cimentos geopoliméricos, bem como os que mais contribuem para seus impactos ambientais na maioria das categorias de ciclo de vida. Os processos que mais contribuem para os impactos do ciclo de vida dos geopolímeros são a cura térmica, a produção de silicato de sódio e a produção de hidróxido de sódio. O desenvolvimento de novos ativadores baratos e com menor impacto ambiental é uma das medidas importantes para promover a aplicação industrial de geopolímeros e será uma importante direção de pesquisas no futuro (PASSUELLO et al., 2017; ZHAO et al., 2021). Da mesma forma, a incorporação de resíduos com potencial de substituição do precursor metacaulim, são bem vindas ao processo de geopolimerização, sempre buscando uma maior sustentabilidade e indo em direção a circularidade econômica.

A figura 1 demonstra um processo de geopolimerização feito em escala laboratorial, onde se percebe primeiramente a mistura dos precursores metacaulim e cinzas de biomassa (material potencial discutido neste trabalho) com os ativadores alcalinos, e por fim a moldagem

e desmoldagem dos corpos de prova.

Figura 01: Processo de geopolimerização a partir das cinzas de biomassa



Fonte: Própria (2022).

CINZAS DE BIOMASSA GERADA NA AGROINDÚSTRIA

Nos últimos anos diversos países ao redor do mundo produziram grandes quantidades de resíduos sólidos agroindustriais (REN et al., 2021). Alguns destes resíduos são materiais orgânicos (biomassa) e que em muitos locais podem ser utilizados como combustível para produção de energia (Figura 2).

O uso da biomassa como combustível produz de maneira geral dois tipos de cinzas após a combustão completa ou incompleta da matéria orgânica: 1) cinzas de fundo ou pesadas, obtidas como frações não queimadas na base do forno; e 2) cinzas volantes aglomeradas no forno de combustão superior (composto de partículas leves). Recentemente, o uso de combustível de biomassa em usinas termelétricas, fornos de cimento, ou na própria agroindústria, aumentou devido ao aumento da demanda por fontes de energia renováveis. As cinzas geradas por esses processos têm sido utilizadas na agricultura como fertilizante, principalmente devido à presença de nutrientes como fósforo, potássio e cálcio. Em termos de aplicabilidade, as cinzas leves geralmente são usadas como fertilizante na agricultura, enquanto as cinzas pesadas são normalmente depositado em aterros, devido a nenhuma aplicação prática. A quantidade de cinzas de biomassa gerada em todo o mundo é estimada em 480-500 milhões de toneladas por ano (THOMAS et al., 2021).

Dentre as diversas tipologias de cinzas de biomassa produzida nos complexos agroindustriais, podemos citar as cinzas de casca de arroz, cinzas de óleo de palma, cinzas de sabugo de milho e cinzas de serragem (REN et al., 2021).

A produção de arroz (*Oryza sativa*) é uma das maiores atividades agrícolas do mundo, ficando atrás da cana-de-açúcar e do milho. Atualmente, ~510 milhões de toneladas de arroz são beneficiados em todo o mundo em 2020-2021. A China é o maior produtor com 28,5%, seguido pela Índia com 24%, Indonésia e Bangladesh com 7%, Vietnã com 5% e Tailândia com 4%. Consequentemente, a produção de coprodutos, como cinzas e palhas/casca de arroz não aproveitadas, também aumentou (SHUKLA et al., 2022). As indústrias de beneficiamento de arroz geram valores superiores a 20 M tons anuais em todo o mundo e que dão origem a diversos problemas ambientais e de saúde pública (SHEHATA et al., 2022; TONIOLO; BOCCACCINI, 2017).

A casca de arroz é o subproduto do processamento do arroz e geralmente é descartado como resíduos ou utilizado como energia de baixo custo para substituir parcialmente o carvão na geração de energia. A combustão da casca de arroz remove a matéria orgânica e converte de 20% a 25% das cascas em cinzas. A casca de arroz é geralmente queimada a 600-700 °C por 6 h. Além disso um peneiramento (300 µm) é realizado para separar os materiais não queimados. (TONIOLO; BOCCACCINI, 2017). Estudos mostram que para cada mil quilogramas de arroz produzidos, quase 45 kg de cinzas são produzidos (FAROOQ et al., 2021).

As características desses materiais, incluem mais de 95% de sílica amorfa, alta reatividade e alta área de superfície específica (FAROOQ et al., 2021; REN et al., 2021).

Outra tipologia de biomassa importante em vários países é o bagasso de cana de açúcar. Este bagaço é um material residual que tem sido cada vez mais utilizado no aquecimento de caldeiras para geração de eletricidade e gerando, portanto, grandes volumes de cinzas. As cinzas geradas são normalmente depositadas em aterros e áreas abertas, o que confere efeitos deletérios ao meio ambiente. As cinzas de bagaço de cana, assim como outras cinzas de biomassa, tem despertado o interesse de pesquisadores como material cimentício suplementar (TRIPATHY; ACHARYA, 2022).

Figura 02: Processo de geração das cinzas de biomassa.



Fonte: Própria (2022).

O óleo de palma é um óleo vegetal comestível para diversos usos e na sua produção são obtidos outros materiais, tais como fibras e cascas. Esses subprodutos são geralmente queimados (800-1000 °C) para geração de energia na própria indústria de óleo de palma. Na queima destes subprodutos são produzidos cerca de 5% de cinzas em uma produção anual que pode chegar a 4 milhões de toneladas. Tal como outras biomassas relatadas neste trabalho, estas cinzas na maioria das vezes são depositadas em aterros sanitários. Como o óleo de palma é uma das matérias-primas mais utilizadas na produção de biodiesel, espera-se que a produção de cinzas aumente a cada ano. Isso reforça a necessidade de encontrar uma maneira de descartar esses resíduos, que até agora são principalmente depositados em aterros (FOO; HAMEED, 2009; TONIOLO; BOCCACCINI, 2017).

CINZAS DE BIOMASSA USADAS EM GEOPOLÍMEROS

A biomassa que é geralmente considerada resíduo agroindustrial, é uma fonte renovável e abundante na natureza. A utilização das cinzas de biomassa em geopolímeros não apenas diminui o impacto no meio ambiente como também traz benefícios ecológicos e econômicos (REN et al., 2021).

Estudos tem confirmado a viabilidade do uso de cinzas de biomassa de folhas de bambu, tamareiras, folhas de elefante, folhas de bananeira e cascas de banana, palha de arroz, resíduos de azeitona, palha de trigo e sabugo de milho como materiais pozolânicos em concreto de cimento Portland e também em materiais geopoliméricos (REN et al., 2021; THOMAS et al., 2021). A aplicação de resíduos agrícolas em geopolímeros tem despertado gradativamente o interesse de novas pesquisas, principalmente as cinzas de biomassa: cinzas de casca de arroz (EMDADI et al., 2017), cinzas de óleo de palma (MALEKI et al., 2020), cinzas de sabugo de

milho (MATALKAH et al., 2016), cinzas de serragem (DUAN et al., 2016), dentre outras (REN et al., 2021).

A produção de geopolímeros pode ser uma nova abordagem para utilizar resíduos sólidos de complexos agroindustriais na busca por um desenvolvimento agrícola sustentável, principalmente em países em desenvolvimento com imensa produção agrícola e consequentemente de resíduos sólidos (REN et al., 2021).

Cinza de casca de arroz e óleo de palma são os materiais mais amplamente pesquisados como resíduos sólidos agroindustriais para pesquisa de geopolímeros. As propriedades físicas e químicas das cinzas de biomassa são diferentes de acordo com sua fonte e técnica de combustão, mas os principais elementos encontrados nesses materiais são K, Si, Ca, Mg, entre outros (REN et al., 2021). Como outras cinzas de biomassa, as cinzas do processo de óleo de palma tem uma composição que contém grande quantidade de partículas de SiO_2 (40% a 80%) e possui potencial para uso em geopolímeros (REN et al., 2021). A tabela 1 demonstra os principais óxidos de interesse para geopolymerização e as principais cinzas de biomassa utilizada para obtenção de geopolímeros.

Estudos apontaram que o uso de 30 % de cinzas de casca de arroz em substituição ao metacaulim, tem um aumento da resistência à compressão de 57,18%, além de ganhos na estabilidade térmica do material obtido (LIANG et al., 2019; REN et al., 2021). Os estudos mostram que as cinzas tem um efeito fíler, alta reatividade e podem refinar a microporosidade do gel geopolimérico (REN et al., 2021). Outros trabalhos indicam que a incorporação de 10-20% em peso de cinzas de casca de arroz melhora as propriedades de curto e longo prazo do geopolímero, tornando um caminho sustentável e amigo do ambiente para valorização destes materiais (HOSSAIN; ROY; BAE, 2021).

Os geopolímeros baseados em cinzas de casca de arroz pode minimizar a porosidade total do concreto, alterar sua composição de poros e diminuir significativamente a permeabilidade, o que reduz o efeito de íons perigosos que contribuem para a redução da resistência da matriz do concreto. Substituições parciais de cimento por cinzas minimizam a dispersão de água no concreto por capilaridade e melhoram eficientemente a resistência dos geopolímeros ao ataque de sulfato (FAROOQ et al., 2021).

Como visto anteriormente, os geopolímeros são amplamente considerados uma alternativa de baixo carbono em comparação ao Cimento Portland. No entanto, outros impactos

ambientais além do potencial de aquecimento global são importantes no ciclo de vida deste tipo de ligante (PASSUELLO et al., 2017). O interesse em valorizar os resíduos industriais, bem como a necessidade de reduzir o custo de produção de aglutinantes geopoliméricos, tem promovido o desenvolvimento de ativadores alcalinos baseados na combinação de álcalis com resíduos fontes de sílica amorfa derivadas. Estes ativadores podem apresentar eficácia similar ou ainda maior em comparação com o ativador alcalino tradicional à base de silicato solúvel. Resíduos agroindustriais como a cinza de casca de arroz têm um alto potencial de implementação como fonte de silicato para o ativadores alcalinos (PASSUELLO et al., 2017).

Tabela 01: Composição química de resíduos agroindustriais

Resíduos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Perda ao fogo	Referências
Cinzas de casca de arroz	93,1	0,3	0,2	1,5	0,8	(LIANG et al., 2019)
Cinzas de óleo de palma	64,2	4,2	3,1	10,2	1,7	(SALIH; ABANG ALI; FARZADNIA, 2014)
Cinzas de biomassa	25,3	6,0	4,1	36,7	-	(NOVAIS et al., 2018)
Cinzas de biomassa	34,0	13,5	5,0	16,5	14,3	(SIMÃO et al., 2021a, 2021b)
Cinzas de biomassa	49,6	9,9	4,1	2,1	27,0	(SIMÃO et al., 2019)
Cinza de bagaço de cana	69,7	9,2	4,7	3,8	16,7	(YADAV et al., 2020)
Cinza de bagaço de cana	86,8	2,4	1,8	3,4	0,7	(RAJASEKAR et al., 2018)
Cinza de bagaço de cana	80,2	2,6	5,6	1,8	0,8	(ALMEIDA et al., 2015)

As cinzas de casca de arroz são uma fonte biogênica de Si muito boa para sintetizar silicato de sódio/potássio de baixo custo que geralmente é usado como ativador em geopolímeros. A eficiência de dissolução do Si depende da concentração da solução de NaOH, da temperatura (80–100 °C) e da cristalinidade da sílica presente nas cinzas. Além disso, a sílica amorfa presente nas cinzas pode reduzir o custo de processamento de silicato de sódio quando comparado aos processos convencionais que usam autoclaves. Portanto, as cinzas de casca de arroz podem ser usadas de maneira eficientemente para derivar uma solução ativada por álcali de baixo custo. Ainda assim, sua utilidade está em escala de laboratório, e estudos mais

aprofundados são essenciais para aumentar a aplicação desta prática (HOSSAIN; ROY; BAE, 2021).

Alguns obstáculos para a aplicação das cinzas de casca de arroz como material cimentício complementar em geopolímeros podem ser comentadas: O cultivo de arroz está centralizado em algumas áreas de alguns países, o que pode levar a um aumento nos custos de transporte. As condições de controle de combustão das cinzas de casca de arroz pode provocar a poluição do ar, e produzir cinzas de má qualidade quando feito da maneira incorreta (REN et al., 2021). Estes problemas referentes as cinzas da casca de arroz, podem ser também relatado para as demais cinzas de biomassa discutidas neste trabalho.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim como os diversos processos produtivos em todo o mundo, os complexos agroindustriais produzem diversos resíduos de biomassa que muitas vezes são utilizados como fontes energéticas através da sua queima e geram outros materiais residuais como cinzas leves e pesadas.

Os geopolímeros são materiais que apresentam baixo consumo de energia, baixo nível de emissões de CO₂ e excelentes propriedades quando comparados ao cimento Portland tradicionalmente usado em construções.

A utilização das cinzas de biomassa em geopolímeros não apenas diminui o impacto no meio ambiente como também traz benefícios ecológicos e econômicos em busca de uma economia mais circular e sustentável. Dentre as cinzas de biomassa mais pesquisadas para uso em geopolímeros, podemos citar as cinza de casca de arroz e da biomassa oriunda do processo de obtenção de óleo de palma.

A utilização de cinzas de biomassa na geopolimerização estão relacionadas principalmente a substituições dos precursores aluminosilicatos. Estudos recentes demonstram potencialidade para produzir ativadores alcalinos a partir destes materiais ricos em sílica amorfa. Estas considerações ratificam as potencialidades destes resíduos para geopolimerização, substituindo tanto precursores quanto ativadores alcalinos no processamento.

O cultivo de algumas plantas centralizados em algumas regiões e as condições de controle de queima da biomassa para gerar cinzas de qualidade para o processo de

geopolimerização são citados como alguns dos desafios a serem estudados mais profundamente em trabalhos futuros desta temática.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; MENDES, P. C. D. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31–38, maio 2015.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer: Chemistry & Applications**. [s.l.: s.n.].
DUAN, P.; YAN, C.; ZHOU, W.; LUO, W. Fresh properties, mechanical strength and microstructure of fly ash geopolymer paste reinforced with sawdust. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 600–610, maio 2016.

EMDADI, Z.; ASIM, N.; AMIN, M.; AMBAR YARMO, M.; MALEKI, A.; AZIZI, M.; SOPIAN, K. Development of Green Geopolymer Using Agricultural and Industrial Waste Materials with High Water Absorbency. **Applied Sciences**, v. 7, n. 5, p. 514, 16 maio 2017.

FAROOQ, F.; JIN, X.; FAISAL JAVED, M.; AKBAR, A.; IZHAR SHAH, M.; ASLAM, F.; ALYOUSEF, R. Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 124762, 1 nov. 2021.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Value-added utilization of oil palm ash: A superior recycling of the industrial agricultural waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 172, n. 2–3, p. 523–531, dez. 2009.

HOSSAIN, S. S.; ROY, P. K.; BAE, C.-J. Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: A review. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125218, dez. 2021.

LAN, T.; MENG, Y.; JU, T.; CHEN, Z.; DU, Y.; DENG, Y.; SONG, M.; HAN, S.; JIANG, J. Synthesis and application of geopolymers from municipal waste incineration fly ash (MSWI FA) as raw ingredient - A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 182, p. 106308, jul. 2022.

LIANG, G.; ZHU, H.; ZHANG, Z.; WU, Q.; DU, J. Investigation of the waterproof property of alkali-activated metakaolin geopolymer added with rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 603–612, set. 2019.

MABROUM, S.; MOUKANNAA, S.; EL MACHI, A.; TAHA, Y.; BENZAAZOUA, M.; HAKKOU, R. Mine wastes based geopolymers: A critical review. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 1, p. 100014, 1 dez. 2020.

MALEKI, A.; MOHAMMAD, M.; EMDADI, Z.; ASIM, N.; AZIZI, M.; SAFAEI, J. Adsorbent materials based on a geopolymer paste for dye removal from aqueous solutions. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 3017–3025, jan. 2020.

MARTINS, F.; MARTINS, J.; FERRACIN, L.; DACUNHA, C. Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a Kraft pulp and paper mill. **Journal of Hazardous Materials**, v. 147, n. 1–2, p. 610–617, 17 ago. 2007.

MATALKAH, F.; SOROUSHAN, P.; UL ABIDEEN, S.; PEYVANDI, A. Use of non-wood biomass combustion ash in development of alkali-activated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 491–500, set. 2016.

NOVAIS, R. M.; GAMEIRO, T.; CARVALHEIRAS, J.; SEABRA, M. P.; TARELHO, L. A. C.; LABRINCHA, J. A.; CAPELA, I. High pH buffer capacity biomass fly ash-based geopolymer spheres to boost methane yield in anaerobic digestion. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 258–267, mar. 2018.

NOVAIS, R. M.; PULLAR, R. C.; LABRINCHA, J. A. Geopolymer foams: An overview of recent advancements. **Progress in Materials Science**, v. 109, p. 100621, abr. 2020.

PASSUELLO, A.; RODRÍGUEZ, E. D.; HIRT, E.; LONGHI, M.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; KIRCHHEIM, A. P. Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 680–689, nov. 2017.

RAJASEKAR, A.; ARUNACHALAM, K.; KOTTAISAMY, M.; SARASWATHY, V. Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 350–356, maio 2018.

REN, B.; ZHAO, Y.; BAI, H.; KANG, S.; ZHANG, T.; SONG, S. Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review. **Chemosphere**, v. 267, p. 128900, 1 mar. 2021.

SALIH, M. A.; ABANG ALI, A. A.; FARZADNIA, N. Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 592–603, ago. 2014.

SHEHATA, N.; MOHAMED, O. A.; SAYED, E. T.; ABDELKAREEM, M. A.; OLABI, A. G. Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. **Science of The Total Environment**, v. 836, p. 155577, ago. 2022.

SHUKLA, S. S.; CHAVA, R.; APPARI, S.; A, B.; KUNCHARAM, B. V. R. Sustainable use of rice husk for the cleaner production of value-added products. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 106899, fev. 2022.

SIMÃO, L.; DE ROSSI, A.; HOTZA, D.; RIBEIRO, M. J.; NOVAIS, R. M.; KLEGUES MONTEDO, O. R.; RAUPP-PEREIRA, F. Zeolites-containing geopolymers obtained from biomass fly ash: Influence of temperature, composition, and porosity. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 104, n. 2, p. 803–815, fev. 2021a.

SIMÃO, L.; FERNANDES, E.; HOTZA, D.; RIBEIRO, M. J.; MONTEDO, O. R. K.; RAUPP-PEREIRA, F. Controlling efflorescence in geopolymers: A new approach. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00740, 13 dez. 2021b.

SIMÃO, L.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; MONTEDO, O. R. K. Characterization of pulp and paper mill waste for the production of waste-based cement. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 35, n. 1, p. 237–246, 1 fev. 2019.

SIMÃO, L.; SOUZA, M. T.; RIBEIRO, M. J.; KLEGUES MONTEDO, O. R.; HOTZA, D.; NOVAIS, R. M.; RAUPP-PEREIRA, F. Assessment of the recycling potential of stone processing plant wastes based on physicochemical features and market opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, p. 128678, out. 2021c.

THOMAS, B. S.; YANG, J.; MO, K. H.; ABDALLA, J. A.; HAWILEH, R. A.; ARIYACHANDRA, E. Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review. **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102332, ago. 2021.

TONIOLO, N.; BOCCACCINI, A. R. Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste . A review. **Ceramics International**, v. 43, n. 17, p. 14545–14551, 2017.

TRIPATHY, A.; ACHARYA, P. K. Characterization of bagasse ash and its sustainable use in concrete as a supplementary binder – A review. **Construction and Building Materials**, v. 322, p. 126391, mar. 2022.

YADAV, A. L.; SAIRAM, V.; SRINIVASAN, K.; MURUGANANDAM, L. Synthesis and characterization of geopolymer from metakaolin and sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 119231, out. 2020.

ZHAO, J.; TONG, L.; LI, B.; CHEN, T.; WANG, C.; YANG, G.; ZHENG, Y. Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 307, p. 127085, jul. 2021.