



DANIELLA DUTRA CARNEIRO

**COMPÓSITO DE CIMENTO ALCALINO ATIVADO À BASE
DE METACULIM COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CASCA
DE CAFÉ**

**LAVRAS – MG
2024**

DANIELLA DUTRA CARNEIRO

**COMPÓSITO DE CIMENTO ALCALINO ATIVADO À BASE DE METACULIM
COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CASCA DE CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Materiais Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva
Orientador

**LAVRAS – MG
2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Carneiro, Daniella Dutra.

Compósito de cimentoalcalino ativado à base de metacaulim com
adição de resíduo de casca de café / Daniella Dutra Carneiro. - 2024.

56 p.

Orientador(a): Keoma Defáveri do Carmo e Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras,
2024.

Bibliografia.

1. Construção civil. 2. Propriedades mecânicas. 3. Materiais
alternativos. I. Silva, Keoma Defáveri do Carmo e. II. Título.

DANIELLA DUTRA CARNEIRO

**COMPÓSITO DE CIMENTO ALCALINO ATIVADO À BASE DE METACAULIM
COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CASCA DE CAFÉ**

**ALKALI-ACTIVATED CEMENT COMPOSITE BASED ON METAKAOLIN WITH
ADDED COFFEE HUSK RESIDUE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Materiais Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 18 de dezembro de 2024.

Dr. Keoma Défaveri do Carmo e Silva - Universidade Federal de Lavras (UFLA)

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Dr. Lorrان de Sousa Arantes - Universidade Federal de Lavras (UFLA)

Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva
Orientador

**LAVRAS – MG
2024**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por guiar meus passos e colocar em meu caminho pessoas tão especiais.

À Nossa Senhora Aparecida, por me acolher sempre sob seu manto sagrado, intercedendo em todos os momentos de aflição.

Aos meus pais, Maria José e Lucas; Petrina e Elmo; e à minha irmã Rafaella, por serem meus pilares em todos os momentos, por me erguerem nos momentos de fragilidade e por sempre acreditarem na minha capacidade de realizar meus sonhos.

Ao professor Keoma Defáveri do Carmo e Silva, pelos valiosos ensinamentos, sábios conselhos, paciência e dedicada orientação em todas as etapas deste trabalho.

Ao técnico Lorrان Arantes, pelo inestimável apoio, não apenas no desenvolvimento dos ensaios desta pesquisa, mas também pelo suporte prestado nos momentos desafiadores ao longo deste processo.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e a Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM), pelo suporte essencial em todas as fases deste projeto.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBIOMAT) e a todos os professores do departamento, pela formação profissional, atenção e colaboração fundamentais ao longo desta jornada.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – Processo APQ-00670-22.

RESUMO GERAL

A crescente preocupação com os impactos ambientais devido a produção de materiais convencionais tem impulsionado a busca por alternativas inovadoras na construção civil. Os cimentos álcali-ativados (CAA) surgem como uma solução promissora devido às suas propriedades mecânicas e à possibilidade de reduzir a dependência do cimento convencional. A casca de café (CC), um resíduo agroindustrial, foi incorporada ao estudo como aditivo nos CAA, com o objetivo de agregar valor a esse material explorando seu potencial reativo. Este estudo investigou o uso da CC em diferentes proporções e granulometrias, combinada com metacaulim (MK) e soluções ativadoras de duas diferentes molaridades de hidróxido de sódio (8 e 10 mol/L) em conjunto com silicato de sódio. Foram realizadas análises das propriedades físicas, mecânicas, químicas e microestruturais dos compósitos. Avaliações realizadas após 7 dias de cura demonstraram que proporções otimizadas de CC, aliadas à solução alcalina adequada, resultaram em resistências mecânicas comparáveis às do cimento convencional. Além disso, a presença de potássio na CC contribuiu como ativador alcalino adicional, intensificando as reações de polimerização. Esses achados evidenciam o potencial dos CAA baseados em MK e CC como alternativas viáveis para aplicações estruturais, promovendo o aproveitamento de resíduos agroindustriais e a inovação na formulação de materiais de construção.

Palavras-chave: Construção civil; Propriedades mecânicas; Materiais alternativos.

ABSTRACT

Growing concern about the environmental impact of the production of conventional materials has driven the search for innovative alternatives in the construction industry. Alkali-activated cements (AAC) have emerged as a promising solution due to their mechanical properties and the possibility of reducing dependence on conventional cement. Coffee husk (CC), an agro-industrial waste, has been incorporated into the study as an additive in AACs, with the aim of adding value to this material by exploiting its reactive potential. This study investigated the use of SC in different proportions and grain sizes, combined with metakaolin (MK) and activating solutions of two different molarities of sodium hydroxide (8 and 10 mol/L) in conjunction with sodium silicate. The physical, mechanical, chemical and microstructural properties of the composites were analyzed. Evaluations carried out after 7 days of curing showed that optimized proportions of SC, combined with the appropriate alkaline solution, resulted in mechanical strengths comparable to those of conventional cement. In addition, the presence of potassium in the CC contributed as an additional alkaline activator, intensifying the polymerization reactions. These findings show the potential of FACs based on MK and CC as viable alternatives for structural applications, promoting the use of agro-industrial waste and innovation in the formulation of construction materials.

Keywords: Civil engineering; Mechanical properties; Alternative materials.

INDICADORES DE IMPACTO

A pesquisa sobre cimentos álcali-ativados (CAA) com incorporação de casca de café (CC) apresenta impactos tecnológicos e ambientais relevantes, contribuindo para a inovação na construção civil e para práticas mais sustentáveis. A substituição parcial de materiais convencionais por resíduos agroindustriais resultou em compósitos cimentícios de desempenho mecânico satisfatório, com resistências comparáveis às do cimento Portland, reduzindo potencialmente a demanda por esse material e mitigando as emissões de CO₂ associadas à sua produção. No âmbito tecnológico, o estudo demonstra a viabilidade do uso da CC como matéria-prima alternativa, fomentando pesquisas voltadas para novos materiais sustentáveis. Além disso, a valorização desse resíduo pode beneficiar produtores agrícolas, criando oportunidades no mercado de subprodutos do café e reduzindo custos na cadeia produtiva da construção civil. Socialmente, o desenvolvimento de materiais sustentáveis incentiva políticas públicas focadas na economia circular e no reaproveitamento de resíduos, promovendo impactos positivos em comunidades produtoras de café. O estudo está alinhado com as áreas temáticas de meio ambiente e tecnologia e produção, conforme a Política Nacional de Extensão, e contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente os ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). A possibilidade de aplicação dos CAA à base de CC em larga escala pode gerar benefícios diretos para territórios produtores de café, proporcionando alternativas ambientalmente responsáveis para a construção civil e incentivando a transição para uma indústria mais sustentável.

IMPACT INDICATORS

The research on alkali-activated cements (AAC) incorporating coffee husk (CH) presents relevant technological and environmental impacts, contributing to innovation in the construction industry and promoting more sustainable practices. The partial replacement of conventional materials with agro-industrial waste resulted in cementitious composites with satisfactory mechanical performance, exhibiting strengths comparable to those of Portland cement, potentially reducing the demand for this material and mitigating CO₂ emissions associated with its production. From a technological perspective, the study demonstrates the feasibility of using CH as an alternative raw material, fostering research focused on new sustainable materials. Additionally, the valorization of this waste can benefit agricultural producers by creating opportunities in the coffee by-product market and reducing costs within the construction industry's supply chain. Socially, the development of sustainable materials encourages public policies focused on the circular economy and waste reutilization, generating positive impacts on coffee-producing communities. The study aligns with the thematic areas of environment and technology and production, as outlined in the National Extension Policy, and contributes to the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). The potential large-scale application of CH-based AAC could bring direct benefits to coffee-producing regions, offering environmentally responsible alternatives for the construction sector and promoting the transition to a more sustainable industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de reação de ativação alcalina do MK em hidróxido de sódio.	19
Figura 2: Desenho esquemático da estrutura do fruto do café.	22
Figura 3: Resíduos da CC.	23
Figura 4: Amostra de MK HP ULTRA.	38
Figura 5: (a) CC <i>in natura</i> ; (b) CC moída uma vez; (c) CC moída duas vezes.	39
Figura 6: Granulometria do MK e da CC moída uma e duas vezes.	44
Figura 7: Análise termogravimétrica da CC.	45
Figura 8: Análise termogravimétrica do MK.	46
Figura 9: FTIR da CC e do MK.	47
Figura 10: Micrografias MEV do MK com ampliação de (a) 1000x e (b) 250x.	49
Figura 11: Micrografias MEV da CC moída duas vezes com ampliação de (a) 750x e (b) 250x.	49
Figura 12: DRX da CC <i>in natura</i> e do MK.	50
Figura 13: Tempo de pega dos compósitos.	52
Figura 14: FTIR dos compósitos em hidróxido de sódio 8 mol/L.	54
Figura 15: FTIR dos compósitos em hidróxido de sódio 10 mol/L.	54
Figura 16: Resistência à tração na flexão dos compósitos	56
Figura 17: Resistência à compressão dos compósitos	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporção da mistura de amostras ativadas por álcali.....	41
Tabela 2: Análise de nutrientes da CC.	48

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1 INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1 Estrutura do trabalho.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Cimentos álcali-ativados	15
2.2 Síntese do cimento álcali-ativado	15
2.3 Materiais precursores.....	17
2.4 Relação molar sílica/alumina.....	19
2.5 Ativadores	19
2.6 A Indústria do café no brasil	20
2.7 Resíduos da produção cafeeira.....	21
2.8 Utilização de resíduos de casca de café em cimentos álcali-ativados.....	24
REFERÊNCIAS	27
SEGUNDA PARTE – ARTIGO.....	35
1 INTRODUÇÃO	36
2 MATERIAIS E MÉTODOS	38
2.1 Materiais.....	38
2.2 Caracterizações da casca de café e metacaulim.....	39
2.3 Métodos	40
2.3.1 Produção dos compósitos	40
2.3.2 Propriedades dos compósitos.....	42
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
3.1 Caracterizações da CC e MK	43
3.2 Caracterização do compósito em estado fresco	50
3.3 Caracterização do compósito em estado endurecido.....	52
4 CONCLUSÃO.....	59
TERCEIRA PARTE - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS	62

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, os métodos e materiais empregados pela construção civil têm sido associados a grandes problemas ambientais devido ao aumento constante na geração de resíduos, emissões de dióxido de carbono (CO₂), ao considerável consumo de energia e à extração extensiva de matéria-prima durante os processos (VAN OSS; PADOVANI, 2003).

O cimento Portland é um material básico de construção, sendo ele predominantemente usado na produção do concreto (FERREIRA et. al., 2021). No entanto, o seu processo de fabricação demanda um alto consumo de matéria-prima e energia, sendo responsável por 5-7% do total das emissões globais de CO₂ (ALI; SAIDUR; HOSSAIN, 2011; FRANCO DE CARVALHO et al., 2019; IACOBESCU et al., 2011; KAJASTE; HURME, 2016). Diante da crescente preocupação com os impactos ambientais, econômicos e sociais gerados pela indústria da construção civil, torna-se essencial explorar novos métodos e materiais por meio de estudos e pesquisas que possam reduzir os efeitos adversos do uso predominante do cimento Portland nas práticas de construção tradicionais (MASUERO, 2011).

Os cimentos álcali-ativados (CAA) vêm sendo estudados como uma alternativa promissora para substituir o cimento Portland, apresentando vantagens consideráveis quando se comparado ao ligante convencional (ZHANG et al., 2016). Em comparação com o concreto de cimento Portland, ele pode atingir resistências mecânicas equivalentes, consumir menos energia durante a produção e, ao reduzir o uso de cimento, contribui significativamente para a mitigação das emissões de dióxido de carbono, diminuindo a liberação de gases nocivos que intensificam o efeito estufa (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019). Esse ligante de CAA é um material inorgânico produzido pela ativação alcalina de aluminossilicatos que, por meio da reação de policondensação, resulta na formação de uma matriz estável composta por estruturas amorfas ou semicristalinas com ligações Si-O-Al-O-Si (DAVIDOVITS, 1991; DUXSON et al., 2007; MAJIDI, 2009).

Frente ao desafio de promover o uso consciente dos recursos naturais, a construção civil busca aproveitar materiais descartados no meio ambiente, que ainda não são explorados de forma lucrativa, como alternativa em diversas aplicações. Entre esses, destacam-se os resíduos agrícolas e industriais, como os gerados pelo processamento do café, que representam cerca de 30 a 50% do peso total do grão (HUANG et al., 2016;

OLIVEIRA; FRANCA, 2015). A casca de café (CC) é rica em fibras celulósicas, possui baixa densidade, bom isolamento térmico e excelentes propriedades mecânicas. No entanto, essas características não têm sido exploradas com o objetivo de agregar valor a esse material em aplicações na construção civil, levando ao seu descarte inadequado e contribuindo para o aumento da geração de resíduos (FARUK et al., 2012).

Portanto este trabalho inova ao propor o uso CAA como alternativa sustentável ao cimento Portland. Além disso, a incorporação da CC potencializa o aproveitamento de materiais descartados, agregando valor ao resíduo e explorando suas propriedades reativas, físicas e mecânicas. A combinação da CC com CAA pode contribuir para o desenvolvimento de compósitos com boas propriedades mecânicas, oferecendo uma solução tecnicamente viável para a substituição de materiais convencionais na construção civil.

O objetivo desta pesquisa é avaliar os efeitos da adição de diferentes proporções de CC, previamente submetida a um processo de moagem para obtenção de duas granulometrias distintas, em CAA à base de MK, ativados por uma mistura de hidróxido de sódio nas concentrações de 8 e 10 mol/L e silicato de sódio.

1.1 Estrutura do trabalho

O presente trabalho será exposto como artigo, sendo dividido em quatro capítulos. O Capítulo 1, denominado de Considerações Iniciais, é composto por:

- i. Uma introdução que define o tema e os objetivos da pesquisa, apresentando o contexto do uso de resíduos da CC em CCA à base de MK.
- ii. Um tópico que descreve a organização, estrutura e apresentação do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico necessário para a compreensão do estudo, abordando os principais conceitos relacionados aos CCA e sua composição. Além disso, discute, por meio da análise dos resíduos gerados pela indústria do café no Brasil, as possibilidades de incorporar a CC na formulação dos CCA, destacando as potenciais melhorias nas propriedades dos compósitos resultantes, com base em uma revisão de estudos anteriores que investigam o comportamento de compósitos similares.

O Capítulo 3 consiste em um artigo elaborado inicialmente de acordo com as normas do Manual de Normalização e Estrutura de Trabalhos Acadêmicos da UFLA, o qual será posteriormente adaptado para publicação na *Revista Construction & Building Materials*,

detalhando a produção e caracterização de compósitos de CAA à base de MK com a adição de CC.

No Capítulo 4, serão apresentadas as considerações finais da pesquisa. Por fim, as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste estudo serão listadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cimentos álcali-ativados

O termo cimento álcali-ativados (CAA) foi desenvolvido na década de 1970 e foi apresentado à comunidade científica pelo Professor Joseph Davidovits, sendo um material sintetizado pela reação de uma solução alcalina com um pó de aluminossilicato (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019). Uma das primeiras aplicações dos geopolímeros, realizadas entre 1973 e 1976, envolveu a fabricação de placas resistentes ao fogo, compostas por um núcleo de madeira revestido por camadas de nanocompósitos. Nesse trabalho foi observado que o endurecimento do material orgânico ocorreu devido a cura do material aluminossilicato (DAVIDOVITS, 2020). Em 1982, foram fabricados compósitos de matrizes CAA com o objetivo de criar ferramentas e padrões de moldagem, para substituir os materiais de metal na indústria de processamento de plástico e de fundição. Portanto, desde o desenvolvimento do conceito, o estudo de compósitos de matrizes CAA sempre foi pautado na criação de novos materiais para fins de aplicações industriais. Por apresentarem propriedades como superfícies duras e lisas, estabilidade térmica e fácil moldagem, esses ligantes foram incorporados com sucesso na indústria (DAVIDOVITS, 1991).

Os CAA têm se destacado como uma opção promissora e sustentável para substituir o cimento Portland. Adicionalmente, os concretos CAA podem utilizar de vários subprodutos industriais como matéria-prima em sua produção (ZHANG et al., 2016). Esses concretos apresentam propriedades notáveis, como resistência elevada ao fogo e desempenho superior na resistência contra ataques de sulfato e cloreto, tornando-os potencialmente úteis a longo prazo na contenção de resíduos tóxicos e perigosos. Assim, o concreto de matriz CAA está ganhando aceitação na indústria da construção devido à sua garantia de um menor impacto ambiental e maior durabilidade em comparação com o concreto cimentício convencional (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019).

Embora o CAA seja uma alternativa como um material menos agressivo ao meio ambiente, atualmente sua aplicação na construção civil como componente estrutural é limitada devido à falta de padrões e códigos de projeto estrutural (KUMAR et al., 2018).

2.2 Síntese do cimento álcali-ativado

O ligante CAA é um material inorgânico, formado pela interação do precursor e o ativador alcalino, que ao entrarem em contato promovem a dissolução dos componentes amorfos (aluminatos e silicatos) do precursor pelo alto pH da solução alcalina. Então, a reação de ativação alcalina, promove a dissolução e hidrólise do óxido de alumínio (Al_2O_3)

e dióxido de silício (SiO_2) em uma solução de silicato com alta alcalinidade, que resulta na policondensação dos monômeros em ânions de aluminossilicatos, formando portanto, um gel de aluminossilicato (DAVIDOVITS, 1991; HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019). O endurecimento através da ativação de um sólido em meio alcalino e o ganho da resistência de um CAA acontecem por meio das reações de policondensação que formam redes tridimensionais de aluminossilicatos inorgânicos amorfos (SCHNEIDER et al., 2011).

A síntese do CAA é um processo complexo e alguns parâmetros afetam a resistência mecânica e a trabalhabilidade do material, como a origem do precursor, tamanho de suas partículas e presença de estruturas cristalinas ou fases amorfas, tipo de ativador alcalino e sua molaridade, temperatura de cura, quantidade de sílica e alumina presente no gel de CAA, entre outros (CANFIELD et al., 2014; LEMOUGNA et al., 2013).

Os CAA geralmente são curados à temperatura ambiente, o que é suficiente para desenvolver suas propriedades básicas. No entanto, temperaturas mais altas podem acelerar as reações de ativação alcalina, melhorando significativamente suas propriedades mecânicas. Por outro lado, temperaturas excessivamente elevadas podem reduzir a disponibilidade de água necessária para as reações de hidratação e formação da estrutura interna, comprometendo a resistência final do material (SEVERO et al., 2013). Inadequadas condições de cura podem intensificar a carbonatação, diminuindo os níveis de pH, atribuído à perda de água e alto teor de alumínio nos géis criados. Portanto, nessas condições o produto final formado é granular, poroso e consequentemente pode apresentar uma baixa resistência mecânica (CRIADO et al., 2012).

Já em relação ao parâmetro umidade durante a síntese, é notório que quando as amostras são curadas em ambientes com elevado teor de umidade relativa maiores valores de resistência mecânica são atingidos. A umidade relativa presente na cura inicial desempenha grande valor na ativação alcalina em estudos com cinzas volantes, por exemplo, e isso ocorre independentemente do ativador alcalino utilizado na síntese. Os valores de umidade relativa por volta de 40-50% contribuem para a formação de bicarbonatos alcalinos e gera a perda de umidade do sistema (CRIADO et al., 2012).

Um estudo utilizando MK, ativados com silicato de sódio, como precursor, de razões molares Si/Al e Na/Al de 2 e 1, respectivamente, em que foi avaliado a influência do controle da umidade relativa em amostras curadas a temperatura ambiente e aquecidas posteriormente entre 40 a 60°C, foi observado que a cura dessas amostras quando realizada na ausência de uma selagem rigorosa dos recipientes, e utilizando um forno no qual a umidade relativa foi mantida entre 30 a 70% não apresenta nenhuma vantagem

quando se comparado a cura em temperatura ambiente seguida de um leve aquecimento entre 40 a 60°C (PERERA et al., 2006).

Portanto, é possível perceber que a obtenção de uma cura adequada na síntese do CAA varia conforme o precursor e as condições utilizadas. Para alcançar sucesso nas características de durabilidade e desempenho mecânico dos produtos formados, são necessárias mais pesquisas sobre os parâmetros envolvidos. Como observado em estudos anteriores, temperaturas médias de cura em torno de 60°C parecem ser as mais viáveis; no entanto, é essencial controlar também o tempo de cura. Além disso, a cura em temperaturas superiores a 60°C demonstrou ser prejudicial a longo prazo, devido ao aumento da porosidade e diminuição na resistência à compressão. O ideal é controlar a umidade relativa dos CAA principalmente no início da cura, para se evitar a perda da integridade microestrutural e o surgimento de microfissuras do produto formado (SEVERO et al., 2013).

2.3 Materiais precursores

Precursores referem-se a materiais aluminossilicatos geralmente caracterizados por um alto teor de fases amorfas, solubilidade em soluções alcalinas e alta reatividade (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). Segundo Khale e Chaudhary (2007), qualquer substância pozolânica ou fonte de sílica e alumina que possa ser solubilizada em uma solução alcalina tem a capacidade de ser empregada como precursor para a síntese do CAA. Os materiais precursores, devido à sua natureza amorfa, apresentam uma estrutura desordenada, que pode se manifestar em características vítreas ou em forma de camadas após tratamento térmico.

A produção do CAA pode se beneficiar da utilização de vários subprodutos que apresentam características necessárias para serem empregados como precursor. O reaproveitamento dos diversos tipos de subprodutos industriais ou agroindustriais tornam o CAA vantajoso do ponto de vista ambiental e econômico, pois reduz a extração de recursos naturais e diminui a utilização de aterros. Além disso, em muitos casos, o reuso desses subprodutos nas matrizes pode contribuir com o aumento da resistência mecânica e na durabilidade desses materiais, à depender de alguns fatores (BORGES et al., 2019). Dentre os subprodutos utilizados como precursores na síntese dos CAA, destacam-se rejeitos de barragens de minério de ferro, lama vermelha, cinza de casca de arroz e escória de alto-forno (ZACCARON et al., 2020).

As propriedades finais do CAA podem sofrer variações dependendo da fonte de

aluminossilicatos utilizada. Isso ocorre devido a microestrutura e as propriedades químicas, físicas, mecânicas e térmicas dos precursores que podem variar. Como verificado por Nazari; Bagheri; Riahi (2011), o tamanho das partículas da fonte precursora interfere na ligação dos materiais. Quanto mais finas forem as partículas maior será a área superficial e a dissolução dos aluminossilicatos que formam estruturas mais densas e mais resistentes no processo de reação de ativação alcalina.

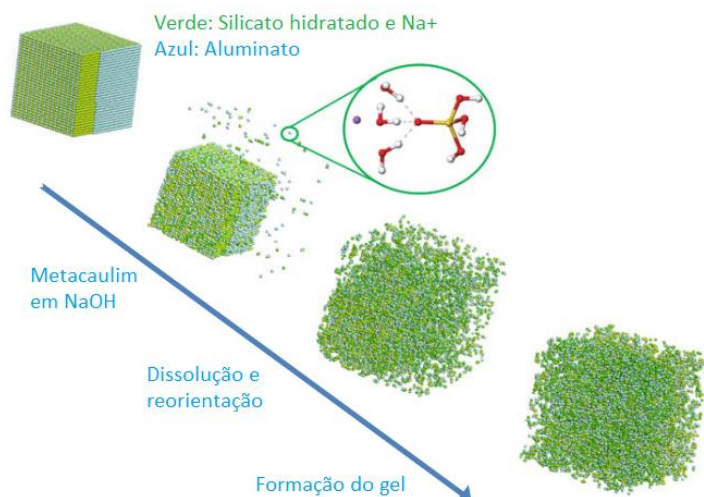
Ao comparar dados na literatura, surge um desafio devido à elevada variabilidade na composição química dos subprodutos industriais ou agroindustriais decorrente da diversidade de fontes encontradas em diferentes regiões. (PROVIS; PALOMO; SHI, 2015). A cinza volante, por exemplo, é amplamente utilizada devido ao seu elevado teor de silicatos e aluminatos amorfos, porém sua qualidade varia significativamente em função da origem do carvão e das condições de queima na usina. Essa variabilidade impacta diretamente o controle da composição química da cinza volante, dificultando a uniformidade do material produzido (ZHANG et al., 2016; YUN-MING et al., 2017). Por outro lado, o MK é produzido em condições mais homogêneas, garantindo maior controle sobre sua composição e desempenho final, o que o torna uma alternativa mais previsível para a fabricação dos CAA (MARDANI-AGHABAGLOU et al., 2014). Geralmente, os CAA com melhores propriedades mecânicas são fabricados utilizando materiais tratados termicamente, exemplo deles são: MK, cinzas volantes e escória de alto-forno (YUN-MING et al., 2017).

O metacaulim (MK) foi o primeiro precursor utilizado na síntese de CAA, como destacado por Davidovits (1989). Ele é produzido pela calcinação controlada da caulinita, um processo que intensifica sua reatividade ao formar fases amorfas altamente pozolânicas. Contudo, a calcinação excessiva pode levar à formação de fases cristalinas, não reativas, comprometendo o desempenho do material e resultando em matrizes de baixa resistência. Estudos indicam que a temperatura ideal de calcinação para obter a máxima resistência mecânica é de 750 °C, com uma relação Si/Al de 1,54 (YUN-MING et al., 2017). Além disso, a resistência mecânica do concreto de CAA depende da concentração de ativadores alcalinos, como KOH e NaOH, que desempenham um papel fundamental na dissolução de íons Si^{4+} e Al^{3+} presentes no MK (TIPPAYASAM et al., 2016).

Na Figura 1, observa-se a simulação tridimensional de um modelo que reproduz as características microestruturais do processo de reação do metacaulim (MK) com hidróxido de sódio (NaOH). Durante esse processo, as partículas de MK são dissolvidas pela solução alcalina, liberando íons de alumínio (Al^{3+}) e silício (Si^{4+}). Esses íons se reorganizam quimicamente para formar um gel aluminossilicato, que preenche os espaços vazios no concreto

de CAA, contribuindo para a resistência e densidade do material (PROVIS, 2013).

Figura 1: Processo de reação de ativação alcalina do MK em hidróxido de sódio.



Fonte: Adaptado de Provis (2013)

2.4 Relação molar sílica/alumina

A síntese do CAA está diretamente relacionada à relação molar entre sílica e alumina, o que afeta a dissolução, hidrólise e reação de condensação dos materiais. Quanto maior a dissolução, maior a disponibilidade de silício e alumínio na reação química. Os produtos finais dependem da reação de condensação, e as propriedades mecânicas são impactadas pela redução da quantidade de componentes não reativos (GHARZOUNI et al., 2016).

Existem outros parâmetros na produção de CAA que estão relacionados à relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. CAA formados com relações entre 2 e 2,5 tendem a apresentar menor quantidade de MK residual em comparação com CAA preparados com relações de 3,0; 3,5 e 4,0. O aumento da resistência mecânica está associado ao reforço das ligações Si-O-Si e à presença de sílica residual. No entanto, CAA com relações superiores a 3,0 apresentam menor estabilidade química, principalmente devido à presença de eflorescência na superfície, causada pelo alto teor de álcalis residuais livres (HE et al., 2016).

2.5 Ativadores

Na ativação alcalina, qualquer cátion pode teoricamente ser utilizado, mas os estudos concentram-se principalmente nos íons de sódio (Na^+) e potássio (K^+) devido à sua relevância prática (VAN JAARSVELD; VAN DEVENTER, 1999). Os ativadores à base de sódio são os mais comuns, pois apresentam maior disponibilidade, alta reatividade e baixo custo. No

entanto, em aplicações que demandam alta reatividade, os silicatos e hidróxidos de potássio são preferidos (TIPPAYASAM et al., 2016).

As diferenças no tamanho e nas propriedades de hidratação dos cátions alcalinos influenciam a taxa de reação e as propriedades finais dos materiais consolidados. Por exemplo, o sódio (Na^+), por ser menor, forma pares com oligômeros menores de silicato, como monômeros. Já o potássio (K^+), devido ao maior tamanho, favorece a formação de oligômeros maiores de silicato, aos quais o $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ tem maior afinidade. Assim, o sódio melhora a dissolução da fonte de aluminosilicato, enquanto o potássio aumenta a taxa de condensação, gerando uma estrutura mais desordenada (SEVERO et al., 2013).

Os CAA quando reagem com o potássio têm apresentado melhores resistências à compressão em comparação aos ativados com sódio. Isso ocorre porque o K^+ eleva a desordem na fase gel, resultando em materiais mais resistentes (GHARZOUNI et al., 2016). Além disso, a resistência mecânica do CAA tende a melhorar com o aumento da concentração de NaOH (entre 4 e 12 mol/L), que acelera a reação, reduz a porosidade e aumenta a resistência. Contudo, é essencial monitorar a concentração do ativador, pois concentrações excessivas de hidroxilas podem causar precipitação precoce do gel, resultando em materiais com menor resistência mecânica (EDUOK, 2016).

2.6 A Indústria do café no Brasil

O café é uma cultura de significativa importância para o agronegócio brasileiro. Hoje, o Brasil tem posição de destaque no cenário mundial, sendo considerado o maior exportador de café solúvel, com vendas de volume físico para o exterior, totalizando 320 mil sacas no mês, para os países consumidores (EMBRAPA, 2023).

Ao longo dos anos, a cafeicultura no Brasil evoluiu de forma significativa, principalmente no que diz respeito à distribuição geográfica da produção de café e suas variedades. Essa evolução está diretamente ligada às mudanças estruturais decorrentes da redução da intervenção governamental e seus efeitos sobre os preços no mercado cafeeiro, o que estabeleceu uma nova dinâmica da cafeicultura no país. Historicamente, a cultura do café iniciou-se no século XVIII na região Norte, se deslocando posteriormente para os estados do Rio de Janeiro e São Paulo. Em meados de 1850, a cafeicultura se espalhou em direção à Serra da Mantiqueira e Santos. Mais tarde, no século XX sua expansão ocorreu nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Paraná e no Norte do Brasil. Durante o período 1984 a 2015, os tradicionais estados cafeeiros, Paraná e São Paulo, mantiveram apenas algumas regiões especializadas na produção de café, transformando, Minas Gerais e Espírito Santo nos mais

importantes estados produtores de café do país (VOLSI et al., 2019).

Atualmente, o estado de Minas Gerais, impactado pelo clima adverso, apresentou o maior número de microrregiões especializadas em cultivo de plantas das espécies *Coffea arábica* (60%), respondendo por 75,4% da produção total de café e 81,4% do PIB da produção de café desse estado. Esses dados destacam a importância de Minas Gerais ser considerado o principal produtor de café do país. O fato pode ser explicado por se tratar de uma região que abriga uma produção cafeeira de alta produtividade, paisagens favoráveis e uso extensivo de irrigação e mecanização. Os estados da Bahia e Rondônia também estão se destacando como importantes produtores cafeeiros do país e contribuem para solidificar ainda mais o papel central do café na agroeconomia brasileira (VOLSI et al., 2019).

Segundo a Organização Internacional do Café (OIC), a produção mundial de café, que prevista para a safra 2022-2023 foi estimada em 171,3 milhões de sacas. A safra do período de 2021-2022 atingiu um volume físico equivalente a 175,6 milhões de sacas, volume este que em relação ao período anterior objetivou em um acréscimo de 0,6% em relação ao consumo mundial de café.

Após a colheita, os frutos do café passam pelo processo de beneficiamento para obtenção do produto comercial. Existem dois diferentes métodos de secagem dos frutos: via seca ou via úmida. O processamento à seco dos frutos do café é a técnica de beneficiamento mais simples utilizada, do qual os frutos são secos de 10 a 11% de umidade e os grãos são separados em uma máquina descascadora para a retirada das impurezas (casca, polpa, pergaminho e membrana), partes essas não utilizadas na fabricação da bebida. Já no processamento úmido, não ocorre secagem dos frutos inicialmente, portanto, a casca e a polpa são removidas mecanicamente, os grãos são fermentados para a remoção da impureza restante de polpa de 0,5 a 2 mm de espessura e, então, após a obtenção dos grãos limpos, esses são secos até completar cerca de 12% do teor de umidade e descascados para a remoção do pergaminho. Após o processo de secagem, os grãos de café são embalados e armazenados, para serem comercializados posteriormente. (SAENGER et al. 2001).

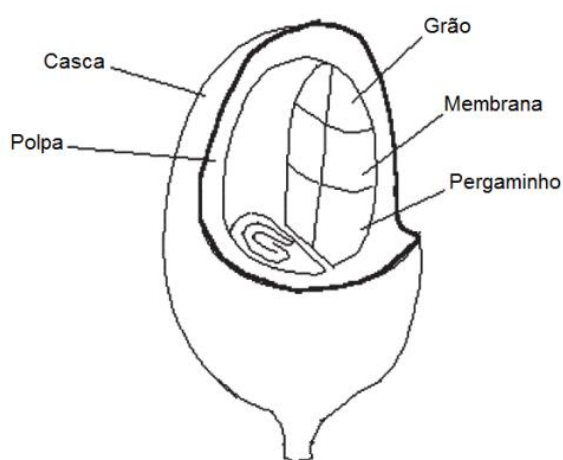
2.7 Resíduos da produção cafeeira

Muitos dos subprodutos agroindustriais ainda não possuem uma aplicação e uma destinação adequada, podendo gerar muitos problemas ambientais ao serem mal descartados em aterros ou nas próprias lavouras agrícolas. Diante desse fato, pesquisas envolvendo a reutilização desses resíduos tem sido feitas com o objetivo de agregar valor ao material diminuindo os custos de produção como em compósitos, biocombustíveis, produtos químicos

e até mesmo na construção civil, como é o caso dos resíduos da CC (SABOGAL-OTÁLORA; PALOMO-HERNÁNDEZ; PIÑEROS-CASTRO, 2022).

Na Figura 2, é possível identificar a estrutura do fruto do café. Geralmente, cada fruto contém dois grãos, cada um envolvido por uma camada fina chamada membrana. Externamente à membrana, há uma película amarelada e mais solta conhecida como pergaminho. Todo o conjunto é envolvido por uma polpa, cuja camada externa é composta pela casca (ILLY; VIANI, 2005).

Figura 2: Desenho esquemático da estrutura do fruto do café.



Fonte: Alterado de Saenger et. al (2001)

Dos resíduos gerados do processamento e beneficiamento dos frutos, no setor produtivo da cafeicultura, o principal e de maior quantidade produzido são as CC (Figura 3). São obtidos em torno de aproximadamente 450kg de resíduos para cada 1 tonelada de grãos de café in natura produzidos (DULTRA, 2013). O desperdício médio de café tem 86–89% de conteúdo orgânico, tem baixa resistência ao cisalhamento e alta compressibilidade (ARULRAJAH et al., 2014).

Figura 3: Resíduos da CC.



Fonte: Do autor (2024)

Os resíduos gerados na produção de café são comumente usados apenas como fertilizante orgânico, sendo reaproveitados somente uma pequena parte das cascas nas próprias lavouras como forração das plantas do café. No entanto, a CC apresenta algumas características interessantes para sua aplicação em outros setores, como alto valor calorífico, alto teor de umidade de 75-80% e um baixo nível de enxofre. Além disso, a CC contém 10,78% de proteína bruta, 33,13% fibra bruta, 24,67% de lignina e 20,22% de celulose (HARSONO, 2022).

Algumas biomassas já são empregadas na produção de biocombustíveis e produtos químicos, utilizando microrganismos para converter os açúcares derivados da biomassa em produtos de maior valor agregado. As CC, por serem materiais lignocelulósicos abundantes, possuem grande potencial para a produção de açúcares fermentáveis, que podem ser transformados em biocombustíveis, como etanol, ou em outros produtos. Esse processo oferece uma solução para reaproveitar esse subproduto agrícola, dando-lhe um destino final e agregando valor ao material (SABOGAL-OTÁLORA; PALOMO-HERNÁNDEZ; PIÑEROS-CASTRO, 2022).

Pesquisas estão sendo feitas utilizando resíduos da CC para produção de materiais compósitos, como o estudo de Castro et al. (2019), que utilizou as CC (*Coffea arabica* L.) em substituição parcial ao cimento, avaliando as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de tijolos em diferentes idades para produzir um material mais sustentável e diminuir o descarte inadequado de resíduos agrícolas. Como resultados, foi observado que o aumento no teor de casca provocou acréscimos na absorção de água, redução na resistência à compressão e na

massa específica aparente seca. Além disso, a interação entre o teor de casca e a idade dos corpos de prova foi significativa apenas para a variável resistência à compressão e a condutividade térmica encontrada para o material evidenciou seu potencial isolante, com valores abaixo dos determinados para tijolos cerâmicos. Portanto, visto que o material produzido não se enquadrava nas exigências normativas para tijolos de solo-cimento, as aplicações para esse estudo podem ser adaptadas para construções rústicas, como as realizadas com tijolos de adobe.

Já os estudos de Emma; Alangar; Yadav (2022), extraiu o óleo da CC convertendo em éster metílico por transesterificação e testou esse biodiesel na produção de um combustível alternativo, renovável e sustentável, para ser utilizado em um motor à diesel. Os resultados encontrados nessa pesquisa mostraram que as propriedades fundamentais do combustível produzido são comparáveis às do diesel, havendo redução na emissão de gases de escape quando comparado ao diesel convencional.

2.8 Utilização de resíduos de casca de café em cimentos álcali-ativados

A alta produção de café no Brasil gera grandes volumes de resíduos, que ainda não são totalmente aproveitados, tornando essencial a busca por destinações adequadas para esses rejeitos. Nesse contexto, as CC têm sido exploradas como materiais de enchimento em matrizes de CAA. Compósitos de CAA produzidos com resíduos agrícolas, como as CC, têm atraído o interesse de pesquisadores devido às vantagens que oferecem, como fácil processamento, baixo custo, baixa densidade e elevada relação resistência/peso, tornando-os promissores para aplicações na engenharia (ESPEJEL et al., 2022).

Já existem alguns trabalhos empregando a CC na produção de CAA, no entanto, a utilização desses resíduos na matriz de CAA ainda apresentam grande limitação. Como exemplo, os estudos de Lima et al. (2022) utilizaram as cinzas da CC como fonte renovável para produzir ativadores alcalinos à base de escória de alto-forno como precursor sólido na formação de CAA. O objetivo foi reduzir o uso comum de hidróxido de sódio e silicato de sódio devido a problemas ambientais. Como resultados, eles observaram que as cinzas da CC que foram calcinadas em 600 e 700 °C são constituídas basicamente por óxido de potássio. Além disso, perceberam que as cinzas calcinadas a 700°C apresentaram resultados mais promissores como ativador alcalino quando se comparada às calcinadas a 600°C e esse fato pode ser explicado devido ao maior valor de pH e maior solubilidade em água. A resistência mecânica desses CAA produzidos foi comparado com argamassas sem cinzas, com adição das cinzas e de cimento Portland e como resultados observaram que a resistência a compressão dos

compósitos produzidos com a adição de cinzas tiveram maiores teores quando comparado com os compósitos de referência, o que leva a concluir que esses resíduos apresentam grande potencial para serem empregados como ativador alcalino em compósitos de CAA.

Nas pesquisas de Kua et al. (2017) foi desenvolvido um material de construção verde a partir de materiais residuais tradicionais, fabricando compósitos de CAA à base de cinzas volantes e escória de alto forno com adições de borra de café por meio da ativação alcalina para aplicação em subleitos em estradas, o sucesso dessa implementação reduziria consideravelmente a necessidade de descartar tais resíduos em aterros. Como resultados desse estudo, foi observado que o CAA produzido à base de escórias de alto forno funciona de forma mais eficiente na resistência mecânica quando comparado ao CAA à base de cinzas volantes, esse fato pode ser explicado devido a maior quantidade de óxidos de cálcio que reagem com o íons de sílica e alumina na formação dos géis de silicato de cálcio hidratado. Além disso, ao se adicionar a borra de café nesses compósitos, foi verificado um aumento na ductilidade através dos ensaios de deformações cíclicas dos materiais fabricados. Portanto, através desse estudo foi concluído que os resíduos da borra de café apresentam grande potencial para serem empregados em CAA, no entanto, foi verificado que com até 28 dias de cura, a resistência desses CAA não se deteriora mas é interessante realizar novas pesquisas pelo fato da borra de café ser constituída por um alto teor de matéria orgânica podendo gerar problemas futuros com a deteriorização desses compósitos e lixiviação de materiais perigosos que contaminam solos adjacentes e lençóis freáticos quando implementados como material de subleito.

O trabalho de Espejel et al. (2022), teve o objetivo de produzir compósitos com uma matriz de CAA à base de MK e sílica sol-gel com adição de agro-resíduos (casca de arroz, cevada e café) como material agregado, para aplicação em vários domínios da construção. Como resultados, foi observado que os compósitos utilizando a casca de cevada na matriz sol-gel apresentaram melhores rendimentos, melhor resistência ao escoamento e módulo de elasticidade, no entanto, os compósitos com matriz de CAA utilizando CC apresentaram melhor dureza, já no compósito de CAA com casca de arroz e café a resistência à compressão foi superior em relação à casca de cevada. No caso da matriz de CAA, a combinação com maior tensão de escoamento e módulo de elasticidade foi a da mistura com casca de arroz, não sendo possível calcular as tensões dessa matriz em combinação com a CC, pois o material apresentou fraturas imediatamente.

Nas pesquisas de Eskisar e Altun (2020), foi desenvolvido um possível uso de CAA à base de resíduos de café como material para a construção verde em aterros sanitários. Como precursores foram utilizadas cinzas volantes e cinzas de casca de arroz, por serem materiais

ricos em sílica e alumina e como ativador alcalino, silicato de sódio e hidróxido de sódio, utilizados para desencadear o processo de reação de ativação alcalina. O desenvolvimento de resistência foi maior em amostras tratadas com uma proporção de ativador/cinza de 1,7 e observados os resultados de compressão, a cinza volante de classe C foi considerada o precursor mais eficaz. Como conclusão, os produtos da reação de ativação alcalina à base de café desenvolverão ainda mais o material orgânico em um material não degradável, mostrando, portanto, que a estabilização com CAA é um método viável para solos altamente orgânicos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- AIGBAVBOA, C.; OHIOMAH, I.; ZWANE, T. Sustainable Construction Practices: “a Lazy View” of Construction Professionals in the South Africa Construction Industry. **Energy Procedia**. Elsevier, v. 105, p.3003–3010, 2017.
- ALI, M. B.; SAIDUR, L.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. Renewable and Sustainable. **Energy Reviews**, Elsevier, v. 15, n. 5, p. 2252–2261, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C191**: Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. West Conshohocken, 2021.
- ARAÚJO, L. C. P. et al. Kraft lignin fractionation by organic solvents: Correlation between molar mass and higher heating value. **Bioresource Technology**, Elsevier, v. 314, p. 123757, 2020.
- ARULRAJAH, A. et al. Spent coffee grounds as a non-structural embankment fill material: Engineering and environmental considerations. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 72, p. 181–186, 2014.
- AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, Elsevier, v. 64, n. 371, p. 388–396, 2018.
- BARBOSA, H. A. A. Efeito da adição de resíduo de casca de café em geopolímeros à base de metacaulim. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) – **Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos**, Lavras, 2023.

BARBOSA, V. F. F.; MacKENZIE, K. J. D.; THOMPSON, J. Geopolymer: Synthesis and Characterization. **International Journal of Inorganic Materials**, v. 2, n. 4, p. 309-317, 2000.

BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; THAUMATURGO, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials**, Elsevier, v. 2, n. 4, p. 309–317, 2000.

BEHROUZIAN, F. et al. Characterization of dietary fiber from coffee silverskin: An optimization study using response surface methodology. **Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre**, Elsevier, v. 8, n. 2, p. 58–64, 2016.

BORGES, P. H. R. et al. Reuse of iron ore tailings in the production of geopolymer mortars. **REM - International Engineering Journal**, v. 72, n. 4, p. 581–587, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/remi/a/fBR9ZjcyYJfYnc7NCZK3bSg/?lang=en>>. Acesso em: 13 jun. 2023.

CANFIELD, G. M. et al. The role of calcium in blended fly ash geopolymers. **Journal of Materials Science**, v. 49, n. 17, p. 5922–5933, 2014. DOI 10.1007/s10853-014-8307-z. Disponível em: <<https://link-springer-com.ez26.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s10853-014-8307-z>>. Acesso em: 22/6/2023.

CASTRO, E. D. et al. ANALYSIS OF THE COFFEE PEEL APPLICATION OVER THE SOIL-CEMENT BRICKS PROPERTIES. **Coffee Science**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 12, 2019.

CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO₂/Na₂O ratio. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 109, p. 494–503, 2007.

CRIADO, M. et al. Effect of relative humidity on the reaction products of alkali activated fly ash. **Journal of the European Ceramic Society**, Elsevier, v. 32, n. 11, p. 2799–2807, 2012.

CRUZ, S. F. et al. Effect of organic materials on the setting time of alkali-activated binders. **Journal of Building Materials**, 2019.

CRUZ, L. R. et. al. The Influence of the Rice Husk Ash Addition on the Durability of Geopolymer Concrete Based on Fly Ash. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 352-363, 2019.

DA ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633–1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. GEOPOLYMERS AND GEOPOLYMERIC MATERIALS. **Journal of Thermal Analysis**, v. 35, p. 429–441, 1989.

- DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry and Applications – 5 edition. **Institut Géopolymère**, p. 1-22, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265076752_Geopolymer_Chemistry_and_Applications>. Acesso em: 26/05/2023.
- DE FIGUEIREDO, R. A. et al. Sustainable Alternatives to Portland Cement: The Alkali-Activated Slag Cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 51-59, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 093**: Solos – Determinação da densidade real, Norma Rodoviária, Método de ensaio, 1994.
- DAS, D. et al. Characterization of Geopolymer Composites from Red Mud and Metakaolin: Physical, Mechanical and Microstructural Properties. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 7931–7935, 2021.
- DULTRA, E. J. V. **Adição de subprodutos da cinza da casca de café (Coffea canephora) em massa cerâmica para porcelanato**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 1-135, 2013.
- DUXSON, P. et al. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Elsevier, v. 292, n. 1, p. 8–20, 2007.
- Aqui está a referência do trabalho de Duxson e Provis (2005) conforme a norma ABNT:
- DUXSON, P. et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, p. 47–58, 2005.
- EDUOK, E. I. Thermal properties of geopolymer materials.– Institutt For Matematikk Og Naturvitskap, Universitet I Stavanger, Stavanger, p. 1-84, 2016.
- EMBRAPA. Relatório sobre o mercado de Café - Abril 2023. **Organização Internacional do Café**, p. 1–13, 2023.
- EMMA, A. F.; ALANGAR, S.; YADAV, A.K. Extraction and characterization of coffee husk biodiesel and investigation of its effect on performance, combustion, and emission characteristics in a diesel engine. **Energy Conversion and Management: X**, Elsevier, v. 14, p. 100214, 2022.
- ESKISAR, T.; ALTUN, S. Strength Properties of Coffee Waste Based Geopolymers. **Lecture Notes in Civil Engineering**, v. 90, p. 129–136, 2021.
- ESPEJEL, K. R. et al. Geopolymeric Composite Materials Made of Sol-Gel Silica and Agroindustrial Wastes of Rice, Barley, and Coffee Husks with Wood-Like Finishing. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 24, 2022.
- FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, p. 1552 a 1596, 2012.

- FERREIRA, S. R. et al. Effect of microcrystalline cellulose on geopolymer and Portland cement pastes mechanical performance. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 288, 2021.
- FIOROTTO, R. S. et al. Avaliação de painéis de média densidade de bagaço de cana-de-açúcar aglomerados com resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 3, p. 1234-1245, 2023.
- FRANCO DE CARVALHO, J. M. et al. Low Environmental Impact Cement Produced Entirely from Industrial and Mining Waste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 31, n. 2, 2019.
- GHARZOUNI, A. et al. Predictive tools to control the structure and the properties of metakaolin based geopolymer materials. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Elsevier, v. 511, p. 212–221, 2016.
- HABERT, G. et al. Environmental Impact of Portland Cement Production: A Case Study of the Manufacturing Process in Brazil. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 3, p. 429-436, 2011.
- HARSONO, S. S. et al. Stove with Low Carbon Monoxide Emission Fueled by Solid Fuel Coffee-Husk Biopellet. **Sustainability** 2022, v. 14, n. 18, p. 11192, 2022.
- HASSAN, A.; ARIF, M.; SHARIQ, M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 223, p.704-728, 2019.
- HE, P. et al. Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer. **Ceramics International**, Elsevier, v. 42, n. 13, p. 14416–14422, 2016.
- HEAH, C. Y. et al. Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers. **Physics Procedia**, Elsevier, v. 22, p.305–311, 2012.
- HUANG, L. et al. Sustainable Use of Coffee Husks For Reinforcing Polyethylene Composites. **Journal of Polymers and the Environment**, New York, v. 26, p. 48–58, 2016.
- IACOBESCU, R. I. et al. Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier, v. 196, p. 287–294, 2011.
- ILLY, A.; VIANI, R. Espresso coffee: The science of quality. **Elsevier Academic Press**, London, 2. ed., 2005.
- KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 112, p. 4041–4052, 2016.
- KAZE, R. C. et al. The corrosion of kaolinite by iron minerals and the effects on geopolymerization. **Applied Clay Science**, Elsevier, v. 138, p. 48–62, 2017.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, vol. 42, p. 729-746, 2007.

KOMNITAS, P.; ZAHARAKI, D. Utilization of industrial by-products in the production of eco-cement and eco-concrete. **In: Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**, 2007.

KUA, T. A. et al. Stiffness and deformation properties of spent coffee grounds based geopolymers. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 138, p. 79–87, 2017.

KUMAR, H. et al. Utilisation of industrial waste (Fly ash) in synthesis of copper based surface composite through friction stir processing route for wear applications. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 196, p. 460–468, 2018.

LEMOUGNA, P. N. et al. The role of iron in the formation of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash: A ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy study. **Journal of Materials Science**, New York, v. 48, n. 15, p. 5280–5286, 2013.

LIMA, L. et al. Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 289, p. 125730, 2021.

LIMA, F. S. et al. Novel one-part alkali-activated binder produced with coffee husk ash. **Materials Letters**, v. 313, p. 131733, 2022.

LINS, L. N. **Estudo da aplicação da casca de café na indústria da construção**. Universidade Federal Fluminense. 2006.

LIU, D.; YUAN, X.; BHATTACHARYYA, D. The effects of cellulose nanowhiskers on electrospun poly (lactic acid) nanofibers. **Journal of Materials Science**, v. 47, p. 3159–3165, 2012.

MAJIDI, B. Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. **Materials Technology**, v. 24, n. 2, p. 79-87, 2009.

MARJABA, G. E.; CHIDIAC, S. E. Sustainability and resiliency metrics for buildings – Critical review. **Building and Environment**, v. 101, p. 116–125, 2016.

MASUERO, A. B. Materiais alternativos ao cimento Portland: uma revisão sobre potencial de redução de impacto ambiental. **Revista Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 65-79, 2011.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. São Paulo, 2011.

MEHTA, B. R. et al. High energy heavy ion induced changes in the photoluminescence and chemical composition of porous silicon. **Thin Solid Films**, v. 289, p. 95–98, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MOHAMAD IBRAHIM, M. N. et al. Chemical and thermal properties of lignins from oil palm biomass as a substitute for phenol in a phenol formaldehyde resin production. **Carbohydrate Polymers**, Elsevier, v. 86, n. 1, p. 112–119, 2011.

NAZARI, A.; BAGHERI, A.; RIAHI, S. Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. **Materials Science and Engineering: A**, Elsevier, v. 528, n. 24, p. 7395–7401, 2011.

NETO, J. A. S. **Influência da concentração alcalina (NaOH) e razão dos reagentes alcalinos ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) em concreto álcali-ativado de base metacaulim**. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OBENG, J. et al. Effect of calcium carbide residue on the sulphate resistance of metakaolinbased geopolymer mortars. **Cleaner Materials**, p. 100177, 2023.

OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S. An Overview of the Potential Uses for Coffee Husks. **Coffee in Health and Disease Prevention**, Elsevier, p.283–291, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em <<https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ (ICO). Relatórios e estatísticas sobre o mercado de café global. Disponível em <<https://www.ico.org>>. Acesso em: 04 dez. 2024.

PERERA, D. S. et al. Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 3099–3106, 2006.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what?. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 47, n. 1–2, p. 11–25, 2013.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299–327, 2014.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. **Springer**, Dordrecht, 2014.

PROVIS, J. L.; PALOMO, A.; SHI, C. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results. **Chemistry of Materials**, v. 17, p. 3075–3085, 2015.

PROVIS, J. L. et al. Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 110–125, 2015.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymers Structures, Processing, Properties and Industrial Applications. **Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC**, p. 1–454, 2009.

SABOGAL-OTÁLORA, A. M.; PALOMO-HERNÁNDEZ, L.F.; PIÑEROS-CASTRO, Y. Sugar production from husk coffee using combined pretreatments. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, Elsevier, v. 176, p. 108966, 2022.

SAENGER, M. et al. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, v. 23, n. 1, p. 103–121, 2001.

SANTA, R. A. A. B. **Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANTOS, R. V. et al. Caracterização física e mecânica de compósitos cimentícios reforçados com fibras de coco. **Revista Matéria**, v. 28, n. 1, p. e-12345, 2023.

SCHNEIDER, M. et al. Sustainable cement production—present and future. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 642–650, 2011.

SETTER, C.; OLIVEIRA, T. J. P. Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. **Renewable Energy**, v. 189, p. 1007–1019, 2022.

SEVERO, C. G. S. et al. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, n. 2, p. 55–67, 2013.

SHETTIMA, A. U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 120, p. 72–79, 2016.

SILVA, L. H. et al. Polymerization dynamics in alkali-activated materials using organic additives. **Materials Science Journal**, 2020.

SILVA, W. R. L.; ALMEIDA, L. R.; MELO, D. M. A. Resistência Mecânica e Avaliação Térmica de Geopolímeros à Base de Cinzas de Carvão e Metacaulim. **Revista Matéria**, v. 25, n. 3, p. e20200358, 2020.

TIPPAYASAM, C. et al. Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 104, p. 293–297, 2016.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J. Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 38, n. 10, p. 3932–3941, 1999.

VAN OSS, H.; PADOVANI A. Cement manufacture and the environment Part II: environmental challenges and opportunities. **Journal of Industrial Ecology**, v. 7, p. 93–126, 2003.

VOLSI, B. et al. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLOS ONE**, v. 14, n. 7, p. 0219742, 2019.

YUN-MING, L. et al. Formation of one-part-mixing geopolymers and gepolymer ceramics from geopolymer powder. **Construction and Building Materials**, v.156, p. 9-18, 2017.

YUSUF, M. O. Bond Characterization in Cementitious Material Binders Using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. **Applied Sciences**, v. 13, n. 5, p. 3353, 2023.

ZACCARON, A. et al. Incorporação de escória de alto-forno a carvão vegetal em massa de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 25, n. 1, p. 35-41, 2020.

ZEAL ESCAMILLA, E.; HABERT, G.; WOHLMUTH, E. When CO₂ counts: Sustainability assessment of industrialized bamboo as an alternative for social housing programs in the Philippines. **Building and Environment**, v. 103, p. 44–53, 2016.

ZHANG, C. et al. Effects of silane on reaction process and microstructure of metakaolin-based geopolymer composites. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 32, p. 101695, 2020.

ZHANG, M. et al. Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 124, p. 373–382, 2016.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

COMPÓSITO DE CIMENTO ALCALINO ATIVADO À BASE DE METACAULIM COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CASCA DE CAFÉ

¹Daniella Dutra Carneiro; ²Silmara Carvalho Mandu; ³Flávia Cristina Dutra de Carvalho; ⁴Lorran de Sousa Arantes; ⁵Saulo Rocha Ferreira; ⁶Keoma Defáveri do Carmo e Silva.

RESUMO

O cimento Portland, amplamente utilizado na construção civil, gera um impacto ambiental significativo, especialmente em relação às emissões de CO₂. Diante disso, a comunidade científica tem buscado alternativas mais sustentáveis, como o cimento álcali-ativado (CAA), que se destaca por suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, contribuindo para mitigar essas preocupações. A indústria da construção civil tem se empenhado em integrar materiais descartados, como resíduos agrícolas e industriais, na criação de produtos alternativos. O objetivo deste estudo é avaliar as propriedades físicas, mecânicas, químicas e microestruturais dos compósitos de cimentos álcali-ativados (CAA) com a adição de diferentes proporções de resíduos de casca de café (CC). As CC foram moídas em moinho de facas, gerando duas granulometrias distintas, e incorporadas em compósitos com metacaulim (MK) como precursor. Foi realizada a caracterização física, química, morfológica e mineralógica das matérias-primas. A ativação alcalina foi realizada utilizando soluções de hidróxido de sódio nas molaridades de 8 e 10 mol/L, combinadas com silicato de sódio. Os resultados evidenciam o grande potencial da casca de café (CC) como aditivo em compósitos cimentícios ativados alcalinamente. A presença de potássio na CC atua como um ativador alcalino, promovendo reações de polimerização e resistência mecânica comparável à do cimento convencional, especialmente em concentrações otimizadas da CC. A redução da granulometria da CC não garantiu maior reatividade, mas sua adição em proporções adequadas aumentou a resistência à tração na flexão e contribuiu para uma matriz cimentícia mais densa, especialmente em sistemas ativados com 10 mol/L de NaOH. No entanto, concentrações mais elevadas de CC comprometeram a resistência mecânica, e o aumento da concentração de NaOH não favoreceu a resistência à compressão. A combinação de silicato de sódio com hidróxido de sódio melhorou as resistências mecânicas, reduziu o tempo de pega final e formou uma matriz mais rígida e coesa. Assim, a CC valoriza resíduos agroindustriais e se apresenta como uma alternativa viável e eficaz para aplicações estruturais, promovendo inovação na construção civil.

Palavras-chave: Construção civil. Propriedades mecânicas. Materiais alternativos.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional está diretamente ligado com o desenvolvimento de novos materiais. No decorrer do tempo, a evolução da indústria da construção civil implicou em grandes impactos ambientais devido a grandes emissões globais de CO₂ e a crescente geração de resíduos muitos dos quais acabam sendo descartados em aterros (ZEA ESCAMILLA; HABERT; WOHLMUTH, 2016). O impacto da construção civil se intensifica pelo processo de fabricação de cimento, que é responsável por uma parte substancial das emissões globais de CO₂. Este processo de produção de cimento envolve alto consumo de matéria-prima e energia, contribuindo para cerca de 5-7% das emissões globais de CO₂ (ALI; SAIDUR; HOSSAIN, 2011; FRANCO DE CARVALHO et al., 2019; IACOBESCU et al., 2011; KAJASTE; HURME, 2016).

Práticas inovadoras têm sido cada vez mais adotadas e pesquisadas para reduzir os impactos ambientais da indústria. Nesse contexto, o CAA surge como uma alternativa promissora ao tradicional cimento Portland, principalmente devido ao alto consumo desse material no setor e aos problemas ambientais relacionados à sua produção (ZHANG et al., 2016). O CAA, introduzido à comunidade científica pelo Professor Joseph Davidovits na década de 1970, é um material sintetizado por meio da reação entre uma solução alcalina e um pó de aluminossilicato (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019). Essa reação resulta em um material estável, caracterizado por estruturas amorfas ou semicristalinas, que apresentam ligações Si-O-Al-O-Si (DAVIDOVITS, 1991; DUXSON et al., 2007; MAJIDI, 2009). Entre os precursores utilizados na síntese do cimento alcalino ativado, destacam-se o MK, a cinza volante e a escória de alto forno (FERREIRA, S. R. et al., 2021).

Segundo a Organização Internacional do Café (ICO), a indústria cafeeira desempenha um papel crucial no comércio internacional, sendo o café um dos produtos agrícolas mais comercializados no mundo. Em 2023, as exportações globais alcançaram mais de 10,78 milhões de sacas de 60 kg por mês, com o Brasil liderando como maior exportador, especialmente de café solúvel e arábica. No entanto, o processamento de grãos gera grandes volumes de resíduos, sendo a casca de café (CC) um dos principais subprodutos (DULTRA, 2013). Embora a CC seja rica em fibras celulósicas, apresente baixa densidade, bom isolamento térmico e excelentes propriedades mecânicas, seu aproveitamento em aplicações na construção civil é pouco explorado. Essa falta de valorização resulta em descarte inadequado, agravando a geração de resíduos (FARUK et al., 2012). Apesar da relevância do tema, a literatura apresenta limitações quanto à aplicação da CC em cimentos alcalinos ativados. Um exemplo notável é o trabalho de

Kua et al. (2017), que desenvolveu compósitos alcalinamente ativados à base de cinzas volantes e escória de alto-forno, incorporando borra de café, e demonstrou a viabilidade de sua aplicação em subleitos de estradas.

Este trabalho apresenta uma inovação ao propor o uso de CAA como uma alternativa ao cimento Portland. A adição da CC contribui para o aproveitamento de resíduos, agregando valor a este material e explorando suas propriedades reativas, físicas e mecânicas. A combinação entre a CC e os CAA pode potencializar as reações de ativação alcalina, promovendo a formação de matrizes mais densas e com melhores propriedades mecânicas. Essa interação tem o potencial de resultar em compósitos eficazes, oferecendo uma solução viável para substituir materiais convencionais na construção civil e expandindo suas aplicações.

O objetivo deste estudo é examinar os efeitos da incorporação da casca de café (CC) em diferentes proporções em compósitos cimentícios alcalinamente ativados (CAA) à base de metacaulim (MK). A CC foi previamente submetida a um processo de moagem para obter duas granulometrias distintas. Os compósitos foram ativados por uma solução composta de hidróxido de sódio nas molaridades de 8 e 10 mol/L, combinada com silicato de sódio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados foram o Metacaulim HP ULTRA como precursor (Figura 4), a CC como adição (Figura 5.a), silicato de sódio e hidróxido de sódio como ativadores alcalinos. O MK empregado segue a NBR 15.894 (2010) e sua composição química predominante é o silicato de alumínio (CAS 1332-58-7) – $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, conforme informações do fabricante. Como ativador alcalino foi utilizado uma solução formada pela mistura da solução de hidróxido de sódio (NaOH) fornecida pela ACS Científica em concentrações de 8 e 10 mol/L e silicato de sódio puro (Na_2SiO_3) (P.A. Êxodo).

As CC da espécie *Arábica* foram obtidas do processo de beneficiamento da lavoura da Universidade Federal de Lavras, em Lavras – MG. As amostras foram coletadas *in natura* e secas em estufa a 105°C por 24 horas. Para a adição das CC nos compósitos de CAA, as cascas passaram por um processo de moagem utilizando o moinho Willye STAR FT 50, passando por peneira com malha de 1,18 mm. Na condição M1 (Figura 5.b), as CC foram passadas uma vez no moinho de facas, e na condição M2 (Figura 5.c), foram passadas duas vezes, obtendo, assim, duas granulometrias distintas.

Figura 4: Amostra de MK HP ULTRA.



Fonte: Do autor (2024)

Figura 5: (a) CC *in natura*; (b) CC moída uma vez; (c) CC moída duas vezes.



Fonte: Do autor (2024)

2.2 Caracterizações da casca de café e metacaulim

As amostras de CC e MK foram caracterizadas física, química, morfológica e mineralogicamente. Para esses ensaios, foram utilizadas amostras de CC já beneficiadas, conforme descrito no item 2.2.1, enquanto as amostras de MK não passaram por nenhum tipo de beneficiamento e preparo. Para a caracterização física das matérias-primas, foi realizado o ensaio de granulometria conforme a norma NBR 7211 (2022), a determinação da densidade real das CC, seguindo a DNER – ME 093 (1994), com as amostras devidamente preparadas de acordo com a NBR 6457 (2016), e o ensaio do índice de absorção de água das CC, conforme as normas NBR NM 52 (2009) e NBR 16916 (2021).

Para a caracterização química, foram realizadas as seguintes análises: termogravimetria (TG), utilizando um analisador termogravimétrico DTG Shimadzu 60, sob fluxo de 50 mL/min, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e faixa de temperatura de 20 °C a 800 °C, em atmosfera de nitrogênio; e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizando amostras em pastilhas de KBr, com faixa espectral de 4000-400 cm⁻¹, 32 varreduras e resolução de 4 cm⁻¹. Considerando que a CC é um material orgânico, foram realizadas análises físico-químicas de nutrientes no Departamento de Ciência dos Solos da Universidade Federal de Lavras. Essas análises determinaram os teores de macronutrientes (K, N, P, Ca, Mg e S, em g/kg) e micronutrientes (Cu, Zn, Fe, Mn e B, em mg/kg).

As análises morfológicas foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras passaram primeiro por um banho de ouro para garantir condutividade e possibilitar o processamento da imagem. O banho foi realizado com um evaporador de ouro modelo SCD 050, que aplica uma fina película de ouro e garante o vácuo. Em seguida, as amostras foram colocadas nos stubs dentro do microscópio eletrônico de varredura LEO EVO

40 XVP (Carl Zeiss), onde foi aplicado o vácuo e ativado o filamento para a leitura e formação das imagens.

As composições mineralógicas foram determinadas por difração de raios-X (DRX) em equipamento Bruker D2 Phaser 2ª Geração, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ (1,54184 Å), tamanho do passo de $0,021^\circ$, a um passo por segundo, e faixa 2θ de 10 a 70° .

2.3 Métodos

2.3.1 Produção dos compósitos

Na produção dos compósitos, as CC foram utilizadas nas proporções indicadas na Tabela 1, com adições de 2%, 4% e 6% em relação à massa do MK.

A relação em massa de precursor/ativador de 0,90 foi definida com base em testes iniciais realizados no laboratório, utilizando três tipos de relações: 0,75 (FERREIRA et al., 2021), 0,80 (OBENG et al., 2023) e 0,90 (AZEVEDO; STRECKER; LOMBARDI, 2018). A relação escolhida foi a que garantiu a consistência, homogeneidade da mistura e boa trabalhabilidade. O silicato de sódio foi dissolvido em água destilada, formando uma solução líquida com 49,67% de H_2O . Para a preparação da solução ativadora, foi utilizada uma razão de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ igual a 2,0, conforme estudos de Neto (2021).

Tabela 1 - Proporção da mistura de amostras ativadas por álcali.

ID da Mistura	MK	CC (M1)	CC (M2)	Molaridade de NaOH	Relação Ativador/Precursor	Relação NaOH/ Na ₂ SiO ₃
	(g)	(g)	(g)	(mol/L)	(-)	(-)
MK8	900	-	-	8	0,9	1:2
2%CC(M1)8		18	-			
4%CC(M1)8		36	-			
6%CC(M1)8		54	-			
2%CC(M2)8		-	18			
4%CC(M2)8		-	36			
6%CC(M2)8		-	54			
MK10		-	-	10		
2%CC(M1)10		18	-			
4%CC(M1)10		36	-			
6%CC(M1)10		54	-			
2%CC(M2)10		-	18			
4%CC(M2)10		-	36			
6%CC(M2)10		-	54			

Legenda: A nomenclatura das amostras segue o formato "X%CC(M)N", onde "X%" representa a proporção de CC adicionada; "CC(M)" indica o tipo de casca de café, moída uma ou duas vezes; e "N" refere-se à concentração molar de NaOH. Por exemplo, "2% CC(M1)10" corresponde a um compósito de CAA com 2% de CC moída uma vez, com uma concentração molar de 10 mol/L de NaOH. Para as amostras de MK, sem a adição de CC, a nomenclatura segue o formato "MK(N)", onde "N" corresponde à concentração molar de NaOH. Por exemplo, "MK(10)" representa um compósito de CAA com 10 mol/L de NaOH.

Fonte: Do autor (2024).

Inicialmente, após todos os materiais serem pesados, a CC foi adicionada ao MK apenas nas misturas que continham adição de CC. Para essas misturas, a CC foi combinada com o MK em um recipiente, misturada e reservada. Para as misturas de referência, que não incluíam CC, apenas o MK foi utilizado, sem a necessidade de misturar com a CC. Em seguida, em outro recipiente preparou-se o ativador, começando pela mistura do silicato de sódio com água, que foi misturada manualmente por 5 minutos. Após essa etapa, o hidróxido de sódio foi adicionado à mistura para completar a solução dos ativadores, sendo misturado também manualmente por mais 1 minuto.

Para garantir a homogeneidade da massa, todos os materiais foram transferidos para uma argamassadeira mecânica industrial, modelo BPM-12 Plus, marca Maná, com capacidade

de 12 litros. Nessa etapa, o ativador foi adicionado à mistura reservada, contendo o MK e CC, e a mistura mecanizada foi feita por 4 minutos na velocidade 10 do equipamento.

Quando a massa atingiu a consistência desejada, foi colocada nos moldes de madeira com base metálica. A cura dos compósitos ocorreu em condições de temperatura ambiente controlada (22 ± 2 °C) e umidade relativa de 60%.

2.3.2 Propriedades dos compósitos

As amostras de CAA foram avaliadas em relação às propriedades no estado fresco e estado endurecido. Inicialmente, foi conduzido o ensaio físico de tempo de pega (agulha de Vicat) conforme a ASTM C191 (2021) enquanto a mistura estava em estado fresco. Subsequentemente, as propriedades no estado endurecido foram categorizadas em propriedades mecânicas e propriedades químicas e microestruturais, determinadas pelo FTIR para todos os compósitos.

Para os ensaios no estado endurecido foram confeccionados três corpos de prova prismáticos para cada tipo de mistura. Essas amostras foram moldadas com dimensões de 40×40×160 mm, utilizando fôrmas de madeira apoiadas em uma base plana e metálica. Todos os corpos foram desmoldados após 48h e armazenados em local ventilado e livre da ação de intempéries, para a cura seca em temperatura ambiente por 7 dias.

Os ensaios mecânicos foram realizados de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) aos 7 dias de idade dos compósitos. No ensaio de flexão de 3 pontos foram utilizados corpos de prova com dimensões de 40×40×160 mm. Para o ensaio de compressão foram utilizadas amostras com dimensões de 40×40×40 mm, sendo essas amostras retiradas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão.

A análise das propriedades químicas foi realizada utilizando amostras dos corpos de prova rompidos nos ensaios mecânicos, por meio da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Essa análise seguiu as mesmas metodologias empregadas nas caracterizações das matérias-primas.

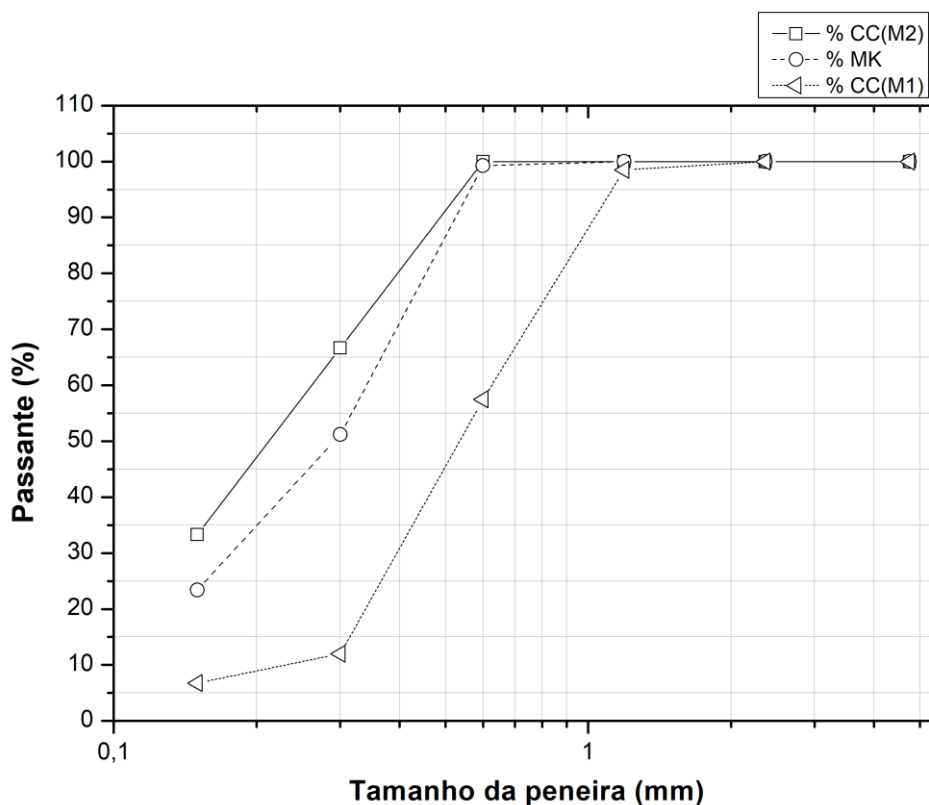
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterizações da CC e MK

A distribuição do tamanho das partículas de CC(M1), CC(M2) e MK são mostradas na Figura 6. Os parâmetros D50 e D90 representam o tamanho das partículas em que, respectivamente, 50% e 90% da amostra são compostos por partículas menores do que esses valores. A CC(M1) apresentou parâmetros D50 e D90 iguais a 0,54 mm e 1,03 mm, respectivamente. Já a CC(M2) apresentou D50 e D90 iguais a 0,21 mm e 0,49 mm, respectivamente. O processo de moagem proporcionou uma redução na CC(M2) de aproximadamente 61%, e 52% em D50 e D90, respectivamente, em relação a CC(M1), o que pode tornar o tratamento mecânico através do moinho de facas eficiente para a adesão entre os materiais, pois o objetivo ao reduzir o índice granulométrico da CC é aumentar sua área superficial, garantindo maior reatividade.

O MK apresentou valores de D50 e D90 de 0,29 mm e 0,53 mm, respectivamente. Essa granulometria pode influenciar positivamente na formação dos géis no CAA e na qualidade final do material ativado. Essa relação é corroborada por Zhang et al. (2020), que destacam que o tamanho médio das partículas do precursor, no caso do MK, contribui significativamente para o efeito fíler, preenchendo os espaços vazios na matriz, e para a geração de pontos de nucleação, ambos fundamentais para melhorar as propriedades das matrizes álcali-ativadas.

Figura 6: Granulometria do MK e da CC moída uma e duas vezes.

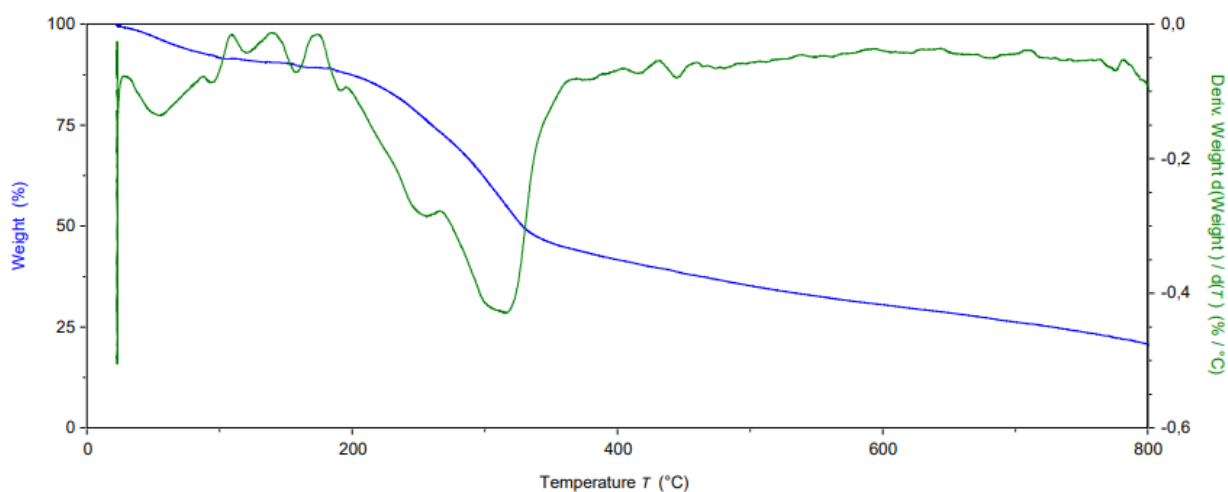


A densidade real da CC determinada em nosso estudo foi de $1,54 \text{ g/cm}^3$, indicando que a CC é um material relativamente leve em comparação com outros materiais lignocelulósicos. Por exemplo, o bagaço de cana-de-açúcar apresenta densidade real de aproximadamente $1,5 \text{ g/cm}^3$ (FIOROTTO, R. S. et al, 2023), enquanto as fibras de coco possuem densidade real em torno de $1,15 \text{ g/cm}^3$ (SANTOS, R. V., 2023). Esses valores sugerem que a CC possui densidade comparável à do bagaço de cana-de-açúcar e é mais densa que as fibras de coco, posicionando-se dentro da faixa típica de materiais lignocelulósicos utilizados em diversas aplicações industriais. Já o índice de absorção de água observado foi de 138%, sendo um valor próximo quando comparado a outros estudos como o Lins (2006), que obteve um valor de 123% para essa análise. No entanto, o valor encontrado indica uma alta capacidade de retenção de água pela CC, o que pode impactar a resistência mecânica gerando uma estrutura mais porosa e menos coesa.

Na Figura 7, são apresentados os resultados TGA da CC. As curvas TGA revelam três estágios térmicos distintos e bem definidos no intervalo de temperatura de 30–800 °C. No primeiro estágio (30–100 °C), ocorre uma perda inicial de massa atribuída à evaporação da água livre presente na CC. Esse processo é comum em materiais lignocelulósicos devido à presença

de água adsorvida nas fibras. O segundo estágio (170–325 °C) está associado à decomposição térmica da hemicelulose, um componente estrutural menos estável termicamente. A hemicelulose possui uma estrutura amorfa, o que explica sua degradação em temperaturas mais baixas. O terceiro estágio (325–400 °C) corresponde à degradação da celulose, que é mais estável termicamente. Durante este estágio, ocorre a decomposição de sua estrutura cristalina, resultando em maior perda de massa. Devido à estrutura complexa da lignina, sua decomposição não ocorre em um único estágio, mas sim de forma lenta e contínua ao longo de todo o intervalo de temperatura analisado. Resultados semelhantes foram reportados por Huang et al. (2016), que identificaram três processos térmicos distintos para a CC no intervalo de 50–600 °C. No estudo, o primeiro estágio (35–110 °C) foi associado à eliminação da água presente nas fibras, o segundo estágio (210–310 °C) à degradação térmica da hemicelulose, e o terceiro estágio (310–370 °C) à degradação da celulose. Esses achados corroboram os resultados apresentados neste trabalho.

Figura 7: Análise termogravimétrica da CC.

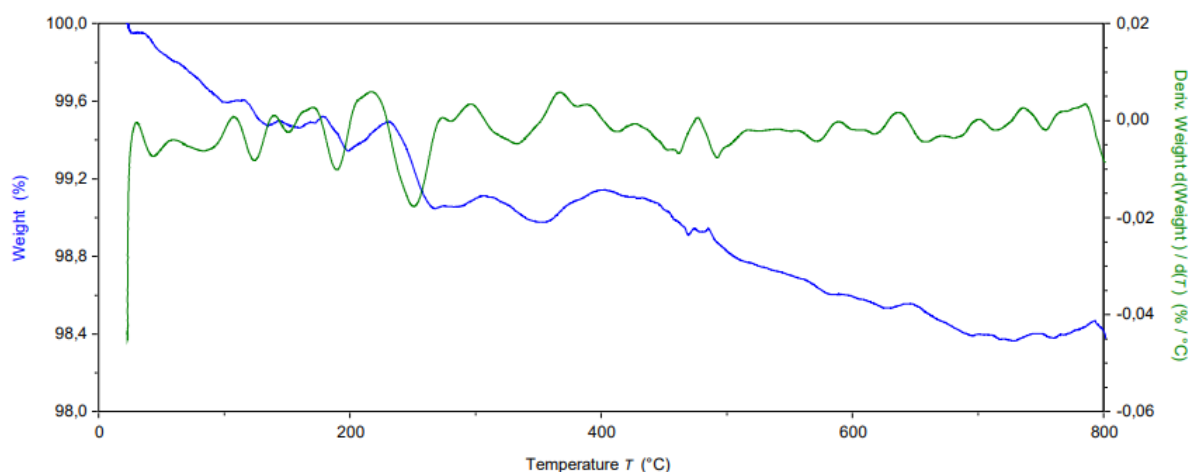


Fonte: Do autor (2023)

Na análise TGA do MK, apresentado na Figura 8, observa-se um pico próximo a 40 °C, que representa o início da evaporação da água livre presente no material. No entanto, diferentemente do observado por Medina (2011), o MK analisado na presente pesquisa não apresentou um segundo pico próximo a 500 °C, que seria atribuído à desidroxilação da caulinita, representando a perda de massa associada a esse processo. Medina (2011) identificou dois picos principais nas curvas TG/DTG do MK: o primeiro, em aproximadamente 80 °C, relacionado à perda de água livre, e o segundo, em cerca de 500 °C, correspondente à desidroxilação da caulinita. Segundo Da Rocha (2005), a ausência desse segundo pico no

presente estudo pode ser explicada pelo fato de o MK ter sido calcinado em uma temperatura recomendada (aproximadamente 750 °C). Esse procedimento garante a completa desidroxilação da caulinita durante a calcinação, sem comprometer a reatividade do material.

Figura 8: Análise termogravimétrica do MK.



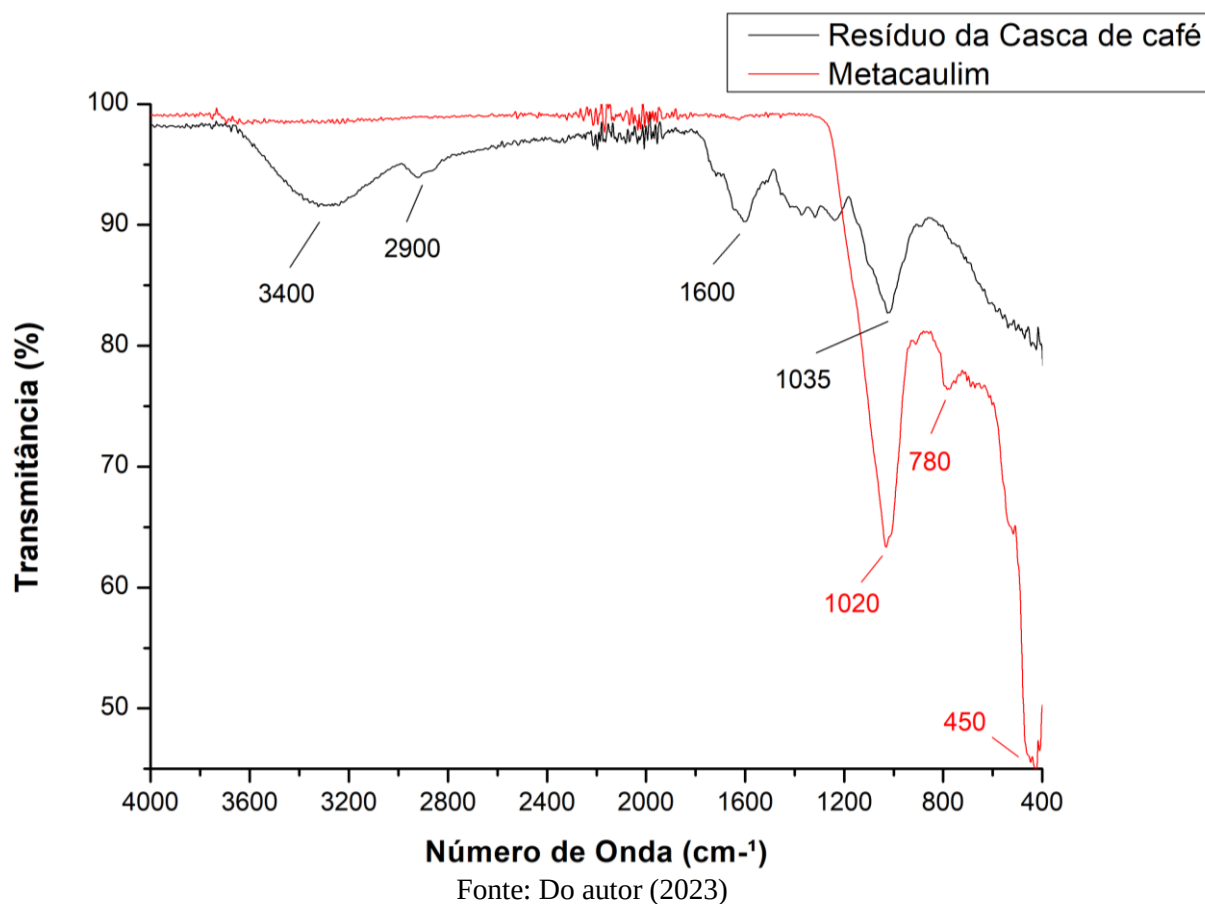
Fonte: Do autor (2023)

Na Figura 9 são apresentados os resultados de FTIR da CC e MK. Para a CC, destacam-se bandas em 3400 cm^{-1} , atribuídas ao estiramento do grupo hidroxila, em 2900 cm^{-1} , associadas ao modo de estiramento do C-H presente em celulose e hemicelulose, e em 1600 cm^{-1} , relacionadas à ligação C=C dos grupos aromáticos. A alta intensidade dessas bandas está diretamente ligada aos elevados teores de lignina presentes na CC. Além disso, as transmitâncias entre 1200 e 1400 cm^{-1} indicam a presença de anéis guaiacil-siringílico e guaiacílicos, confirmando a composição química característica da lignina. Por fim, a banda em 1035 cm^{-1} está associada à deformação do C-H aromático, ao alongamento das ligações C-O e C-C, e às ligações C-OH presentes nos polissacarídeos da CC. Essas características espectrais são consistentes com estudos anteriores, como os de Araújo et al. (2020) e Mohamad Ibrahim et al. (2011), que identificaram bandas similares em materiais lignocelulósicos, reforçando a identificação e atribuição das bandas observadas na CC.

O espectro de FTIR do MK revelou a presença de grupos funcionais característicos, formados após o processo de calcinação da caulinita. Pequenas vibrações nas regiões de 3450 cm^{-1} e 1650 cm^{-1} foram observadas, indicando a presença de água adsorvida na estrutura. Já a banda de 1020 cm^{-1} presente entre as regiões entre 1000 e 1300 cm^{-1} pode ser relacionada às impurezas do quartzo presente na amostra e um alongamento do Si-O apresenta bandas vibracionais próximas de 1050 cm^{-1} . Além disso, podem ser observadas vibrações referentes as

ligações de Si-O-Al na região próxima da banda de 780 cm^{-1} com flexão vibracional na região de 450 cm^{-1} . Os resultados obtidos estão em conformidade com os estudos de Barbosa, Mackenzie e Traumaturgo (2000).

Figura 9: FTIR da CC e do MK.



Os resultados da análise de nutrientes da CC são apresentados na Tabela 2. Pode-se perceber que esse material é composto majoritariamente por potássio (45,6%), seguido de nitrogênio (36,1%), cálcio (7,9%) e enxofre (3,6%). A alta concentração de potássio, comumente observada em resíduos de biomassa, torna o material fortemente alcalino e reativo, o que favorece seu uso como um ativador alcalino alternativo. A presença de cálcio, embora em menor proporção, desempenha um papel importante, pois está associada à formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e pode influenciar a formação de zeólitas na tecnologia de CAA (PROVIS, PALOMO E SHI, 2015).

Tabela 2: Análise de nutrientes da CC.

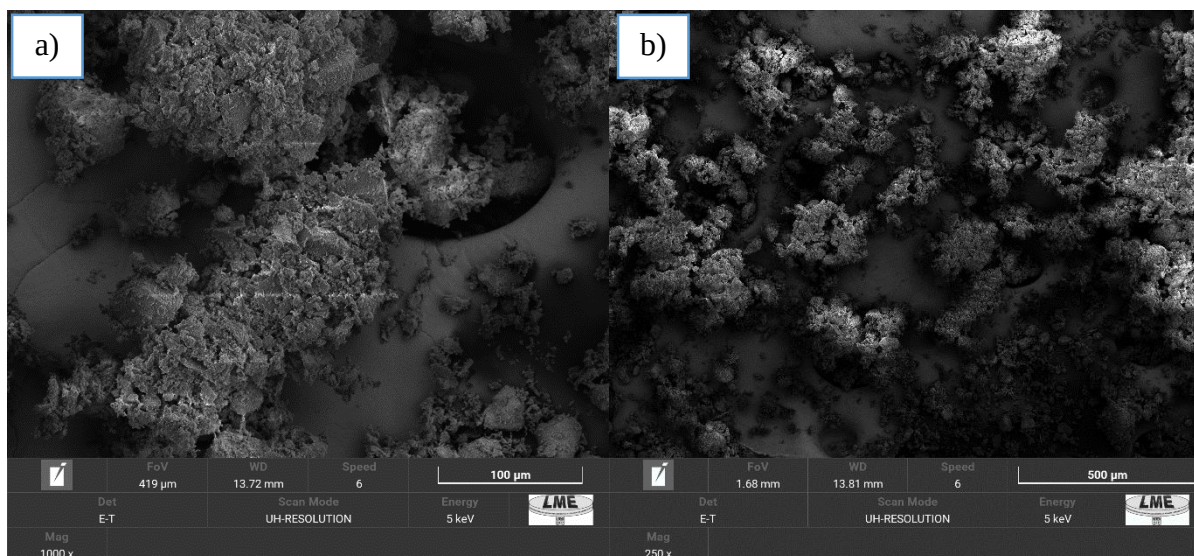
Amostra	Análise de Nutrientes										
	Elementos (g/kg)										
	K	N	Ca	S	P	Mg	Fe	B	Mn	Cu	Zn
Casca de café	19,48	15,40	3,40	1,57	1,39	1,03	0,29	0,04	0,03	0,02	0,01

Fonte: Do autor (2023)

As micrografias de MEV do MK e CC(M2) são apresentadas na Figura 10 e 11, respectivamente. É possível observar que as partículas de MK apresentam uma estrutura majoritariamente desorganizada, com superfícies irregulares, tornando difícil identificar as características da caulinita *in natura*, como as folhas tetraédricas e octaédricas. Esse fenômeno pode ser explicado pela desidroxilação do caulim (SANTA, 2016). A divergência nos padrões de geometria e ângulos de contato dos aglomerados de grãos de MK, possivelmente, justifica sua elevada reatividade. Além disso, a adição de minerais com áreas de superfície específicas elevadas, também garante estabilidade e coesão ao compósito (PROVIS, J. L., & VAN DEVENTER, J. S. J., 2014).

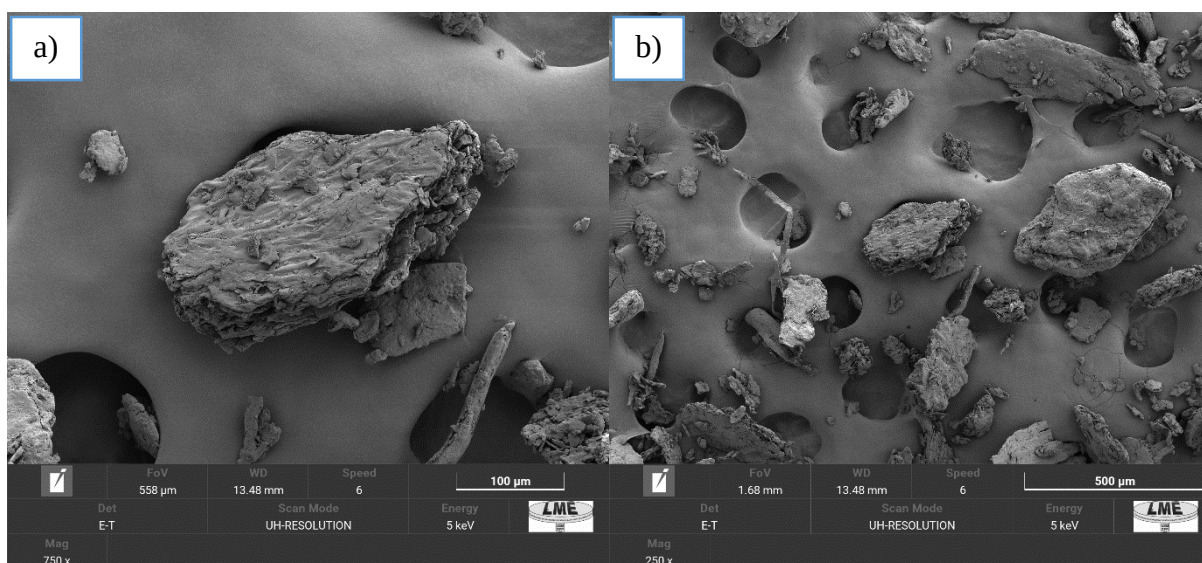
Pode-se observar através das imagens da CC, a presença de fibras na superfície das partículas, que podem contribuir para uma boa coesão com o MK. Além disso, a CC exibe uma geometria assimétrica e superfícies irregulares. Ao comparar as imagens ampliadas em 250x dos materiais, é evidente que a granulometria do MK é consideravelmente menor que a da CC. Essa diferença também pode contribuir para a interação entre os materiais, buscando reduzir a porosidade do compósito, o que, por sua vez, impacta positivamente no desempenho mecânico.

Figura 10: Micrografias MEV do MK com ampliação de (a) 1000x e (b) 250x.



Fonte: Do autor (2023)

Figura 11: Micrografias MEV da CC moída duas vezes com ampliação de (a) 750x e (b) 250x.

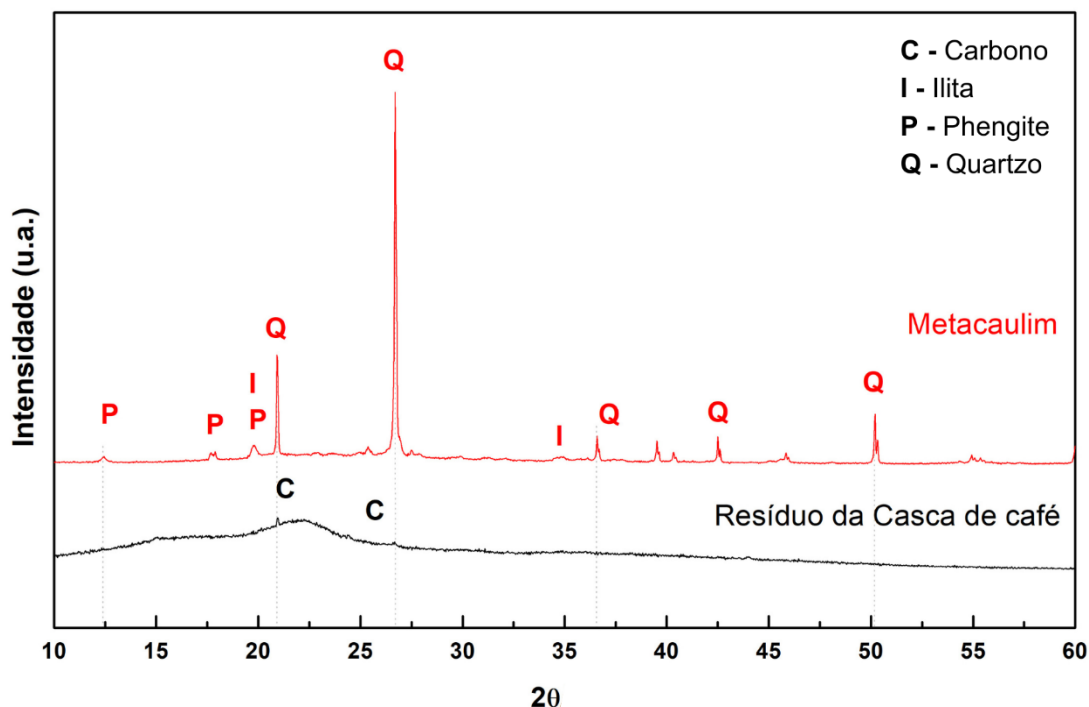


Fonte: Do autor (2023)

Na Figura 12 é apresentado a análise de DRX da CC e MK. Através dessa análise, torna-se evidente a presença de fases semicristalinas no difratograma da CC (picos em 22 e 25° 2θ) que representam a celulose do material, conforme também relatado por Liu; Yuan; Bhattacharyya (2012). Já as fases cristalinas do MK estão relacionadas com o quartzo (SiO_2), fengita ($\text{K(AlMg)}_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}$) e ilita ($((\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{AL})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})])$). Em torno de 20-30° 2θ, são identificadas fases vítreas e amorfas através de uma ampla protuberância em ambos difratogramas. É possível observar que o halo amorfo mencionado é menos perceptível na amostra de MK devido à presença do pico de quartzo e a influência dos

efeitos de escala. Os padrões de DRX do MK e CC estão de acordo com estudos anteriores como o de Shettima et. al. (2016) e Behrouzian et. al. (2016).

Figura 12: DRX da CC in natura e do MK.



Fonte: Do autor (2023)

3.2 Caracterização do compósito em estado fresco

Os resultados do tempo de pega dos compósitos estão apresentados na Figura 13. Para a amostra CC(M1)8, o tempo de pega inicial variou de 72-75 minutos, com o tempo de pega final entre 150-180 minutos. Já para a amostra CC(M1)10, o tempo de pega inicial foi de 17-33 minutos, e o tempo de pega final variou entre 70-95 minutos. Para a amostra CC(M2)8, o tempo de pega inicial ficou entre 32-84 minutos, enquanto o tempo de pega final foi registrado entre 135-180 minutos. Por fim, para a amostra CC(M2)10, o tempo de pega inicial variou de 24-27 minutos, e o tempo de pega final ficou entre 75-80 minutos. Esses dados mostram uma relação clara entre o aumento da concentração de CC e a extensão dos tempos de pega inicial e final nos compósitos, isso pode ser explicado devido a CC influenciar no processo de ativação alcalina, retardando as fases iniciais da reação. Essa característica está alinhada com o comportamento típico de retardadores, que retardam a formação dos primeiros produtos de hidratação, permitindo um maior tempo de manuseio e ajuste na fase fresca do compósito (BARBOSA et al., 2000; CRIADO et al., 2007). Além disso, a elevada capacidade de retenção de água pela CC pode ter contribuído para o prolongamento dos tempos de pega, o que, por sua

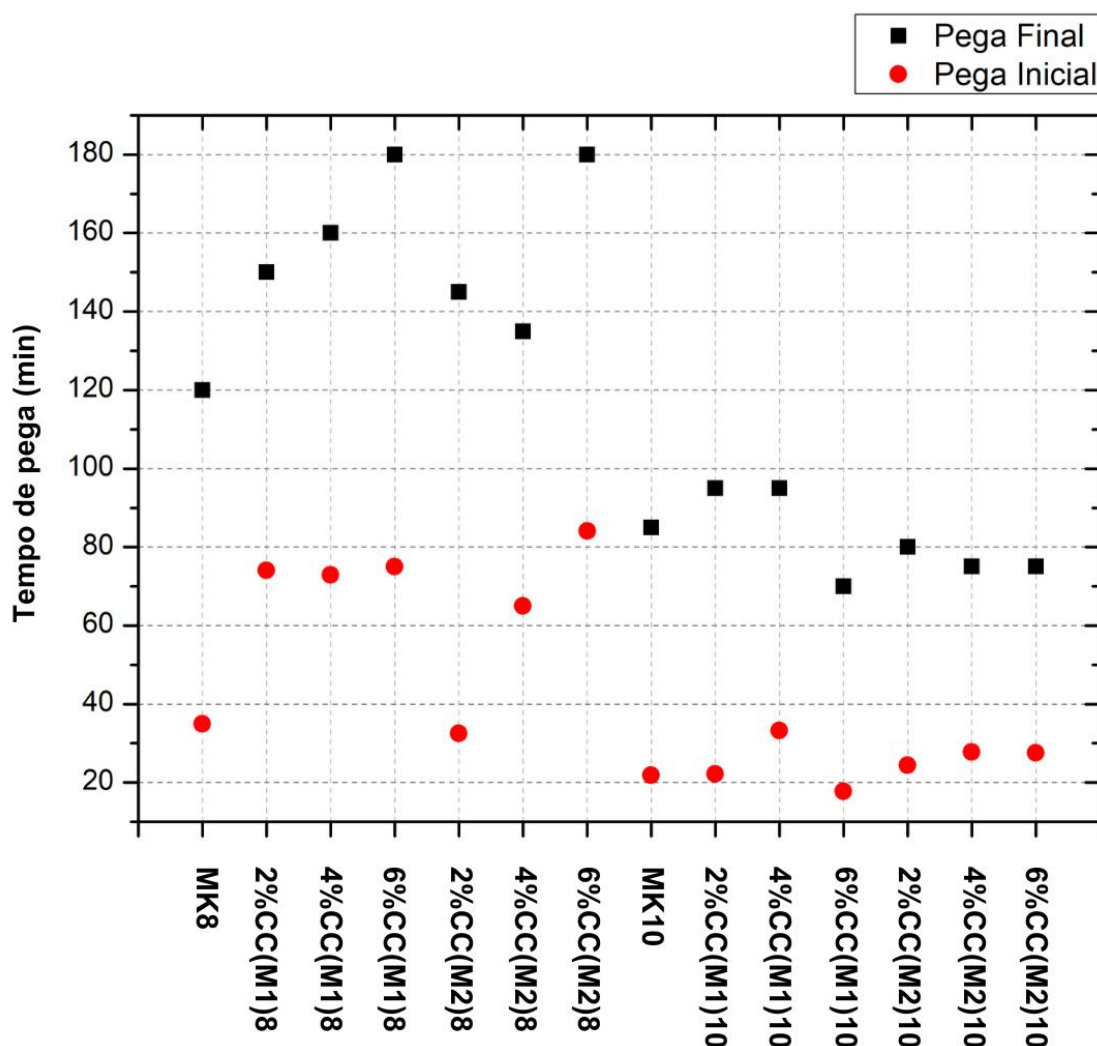
vez, pode comprometer a integridade mecânica dos compósitos ao afetar a coesão e a compactação na matriz. Esse comportamento está em concordância com a literatura, que indica que materiais orgânicos podem retardar a reação de hidratação, influenciando diretamente a trabalhabilidade do material (CRUZ et al., 2019; SILVA et al., 2020).

Os resultados do ensaio de tempo de pega indicaram que a molaridade do hidróxido de sódio na solução alcalina utilizada para ativação tem um impacto significativo na reatividade do sistema alcalino-ativado, influenciando diretamente os tempos de pega inicial e final. Especificamente, a molaridade de 10 mol/L resultou em uma redução tanto no tempo de pega inicial quanto no final, em comparação com a molaridade de 8 mol/L. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da concentração de íons OH^- na solução alcalina mais concentrada (10 mol/L), que intensifica a dissolução do MK e acelera a formação de produtos de reação, como silicatos e aluminatos de cálcio. Essa maior disponibilidade de espécies reativas contribui para um início mais rápido das reações de ativação alcalina, bem como para a formação precoce de uma estrutura endurecida, conforme evidenciado pela redução dos tempos de pega final nas misturas de 10 mol/L. Resultados semelhantes como o estudo de Eduok (2016) e Provis e Bernal (2014), têm sido observados na literatura, sugerindo que a elevação da molaridade acelera o desenvolvimento das propriedades mecânicas e microestruturais devido à maior eficiência da reação alcalina.

A comparação com o estudo de Barbosa (2023) revelou que a adição de silicato de sódio, em combinação com hidróxido de sódio, reduz significativamente o tempo de pega final dos compósitos. Segundo Provis e Van Deventer (2009), o silicato de sódio acelera a formação do gel de aluminossilicato, consolidando a matriz mais rapidamente. Esse efeito ocorre devido à maior disponibilidade de íons silicato, que intensificam as reações de polimerização, formando uma estrutura de gel densa e rígida em menos tempo. Assim, o silicato de sódio atua como um aditivo estratégico para controlar o tempo de pega, especialmente quando uma reatividade mais rápida é desejável.

Analisando os resultados, pode-se observar também que a diminuição da granulometria da CC — de M1 para M2 — não parece ter um impacto direto nos tempos de pega (inicial e final) dos compósitos. Os tempos de pega apresentam valores semelhantes para ambas as granulometrias dentro das mesmas concentrações e condições de ativação (mol/L de NaOH).

Figura 13: Tempo de pega dos compósitos.



Fonte: Do autor (2023)

3.3 Caracterização do compósito em estado endurecido

Os resultados da análise por FTIR, estão apresentados nas Figuras 14 e 15. Ambos os gráficos apresentam picos significativos na região de 4000 a 3000 cm^{-1} , indicando a presença de grupos O-H provenientes de moléculas de água ou à presença de hidróxido de sódio (NaOH). Nos tratamentos com 10 mol/L, observa-se uma leve diminuição na intensidade dos picos nessa mesma faixa em comparação aos de 8 mol/L, indicando menor quantidade de grupos O-H livres. Isso sugere que a maior concentração de NaOH intensifica a polimerização, reduzindo a presença de hidroxilas livres (HEAH et al., 2012).

Na região de 3000 a 2800 cm^{-1} , os tratamentos com 10 mol/L também apresentam picos, indicando a presença de compostos orgânicos da CC. Assim como nas amostras de 8 mol/L, a intensidade dos picos varia conforme o grau de moagem, mas nos tratamentos de 10 mol/L, os

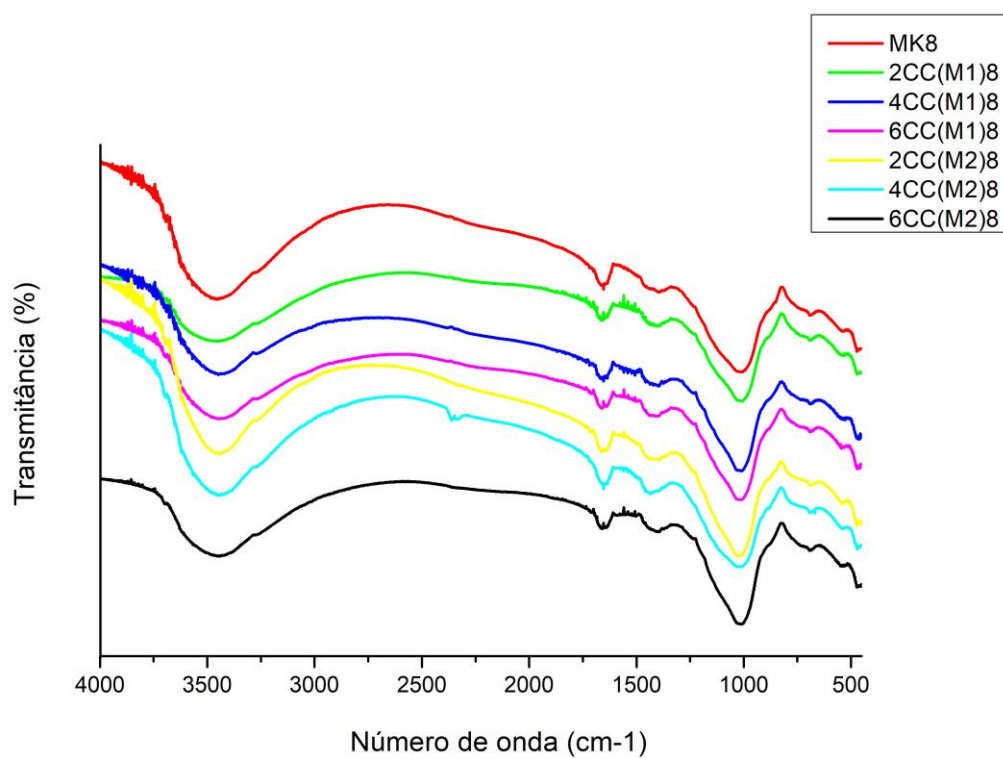
picos são um pouco mais intensos, sugerindo melhor preservação dos compostos orgânicos na matriz CAA com maior concentração de NaOH.

Na região de 1800 a 1500 cm^{-1} , que corresponde aos grupos carbonila ($\text{C}=\text{O}$), os gráficos de 10 mol/L apresentam uma leve intensificação das bandas, sugerindo uma maior reação química com os componentes da CC, possivelmente liberando ou estabilizando mais grupos carbonila na matriz (DAS et al., 2021).

Na região de 1500 a 1000 cm^{-1} , associada às ligações Si-O-Si e Si-O-Al, os gráficos mostram picos intensos que indicam a formação de silicatos e aluminatos, fundamentais para a estruturação da matriz CAA. As amostras com 10 mol/L de NaOH apresentam picos ligeiramente mais pronunciados, o que sugere uma maior taxa de polimerização das cadeias de silicatos, acelerada pela maior concentração de NaOH. Isso resulta em uma matriz mais densa e com um grau de polimerização superior, como também observado nos estudos de Duxson et. al. (2005), que analisaram a influência da composição dos CAA sobre sua microestrutura e propriedades mecânicas.

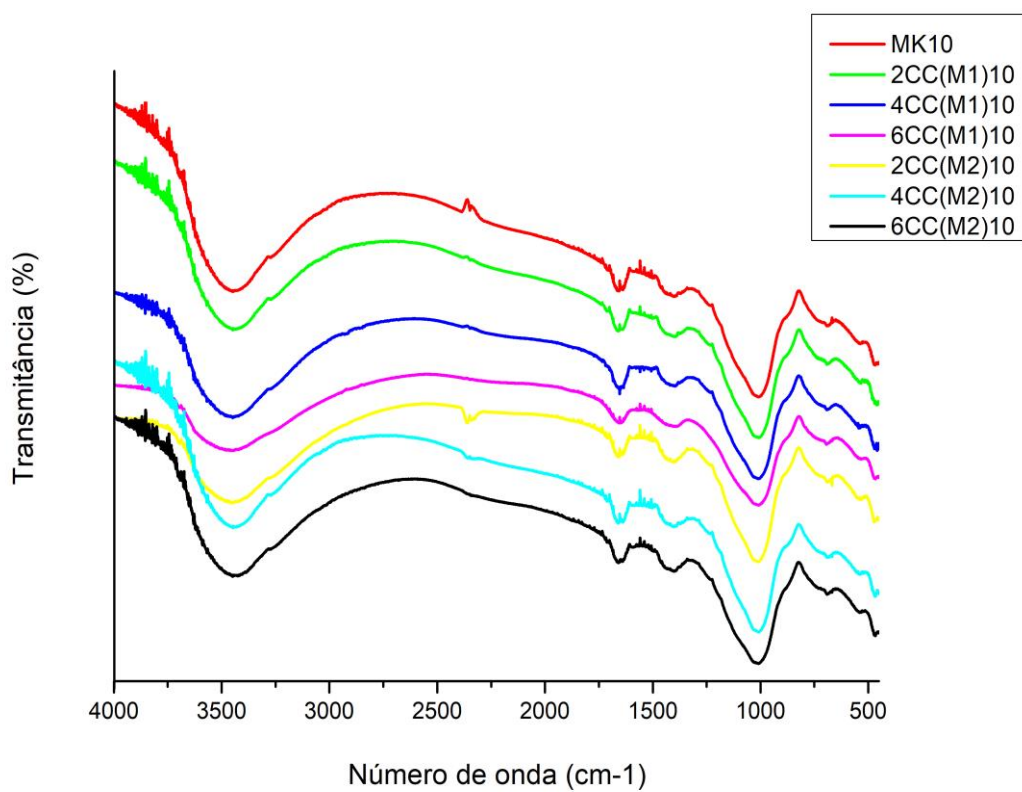
Na região de 800 a 500 cm^{-1} , ambos os gráficos exibem picos que indicam a presença de ligações Si-O, essenciais para a estrutura do CAA. A diferença é mais evidente nas amostras de 10 mol/L, que apresentam picos mais intensos e definidos, sugerindo uma maior formação de redes inorgânicas conforme a concentração de NaOH aumenta (YUSUF, 2023).

Figura 14: FTIR dos compósitos em hidróxido de sódio 8 mol/L.



Fonte: Do autor (2023)

Figura 15: FTIR dos compósitos em hidróxido de sódio 10 mol/L.



Fonte: Do autor (2023)

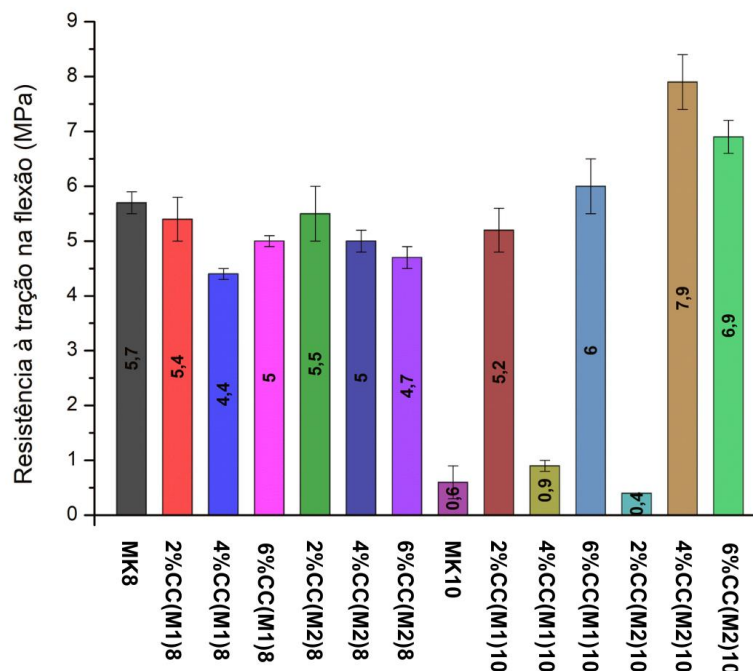
A Figura 16 apresenta os resultados da resistência à tração na flexão dos CAA aos 7 dias de cura. Os compósitos 4%CC(M2)10 e 6%CC(M2)10 destacam-se com 7,9 MPa e 6,9 MPa, respectivamente. Comparando o compósito 4%CC(M2)10 (7,9 MPa) com 4%CC(M2)8 (5,0 MPa), observa-se um aumento de 58% na resistência devido à maior alcalinidade com 10 mol/L de NaOH. Em relação ao estudo de Barbosa (2023), que utilizou apenas NaOH, a resistência dos compósitos com 2%CC(M1)8 aumentou de 0,62 MPa para 5,4 MPa (768%) com a adição de silicato de sódio. Para os compósitos 2%CC(M1)10, o aumento foi de 271%, passando de 1,4 MPa para 5,2 MPa. Além disso, não foi identificada uma relação consistente entre as moagens da CC (M1 e M2) e a resistência dos compósitos, sugerindo que a redução da granulometria não influenciou o desempenho mecânico. Esse comportamento é inesperado, considerando que o aumento da área superficial da CC poderia, teoricamente, melhorar sua reatividade e integração na matriz de aluminossilicato.

A adição de CC em concentrações otimizadas, nos compósitos de 10 mol/L, resulta em uma melhoria na resistência dos compósitos. De acordo com a literatura, o trabalho de Barbosa (2023), também identificou que a inserção da CC em CCA também proporcionou um reforço aos compósitos e também garantiu maiores resistências em comparação aos de referência de mesma classe.

A relação entre as molaridades de NaOH de 8 mol/L e 10 mol/L mostra que o aumento na concentração de NaOH resulta em resistências mecânicas superiores. Isso ocorre porque a solução concentrada de NaOH intensifica a reatividade do MK, promovendo a formação de uma matriz de aluminossilicato mais coesa e resistente, como discutido por Provis e Van Deventer (2009).

Além disso, foi observado um impacto positivo do silicato de sódio na resistência dos compósitos, especialmente quando comparado ao estudo de Barbosa (2023), que utilizou exclusivamente NaOH como ativador. A presença dos íons de silicato acelera as reações de polimerização, contribuindo para a formação de uma matriz mais rígida e com propriedades mecânicas superiores, como explicado por Komnitsas e Zaharaki (2007). Isso reforça a importância da adição de silicato de sódio na otimização das propriedades dos CAA.

Figura 16: Resistência à tração na flexão dos compósitos



Fonte: Do autor (2023)

A Figura 17 apresenta os resultados da resistência à compressão dos CAA aos 7 dias de cura. Os compósitos 2%CC(M2)8 e 2%CC(M1)8 apresentaram as maiores resistências, alcançando 25,9 MPa e 25,4 MPa, respectivamente. Contudo, ao comparar o compósito 2%CC(M1)8 (25,4 MPa) com 2%CC(M1)10 (20,1 MPa), observa-se uma redução de 20,9% na resistência com o aumento da alcalinidade para 10 mol/L de NaOH. Por outro lado, a comparação entre os compósitos 4%CC(M2)8 (22,5 MPa) e 4%CC(M2)10 (24,2 MPa) revelou um aumento de 7,6% na resistência sob a mesma condição de maior alcalinidade. Ao comparar os resultados do presente estudo com os de Barbosa (2023), que utilizou apenas NaOH como ativador, observa-se um aumento expressivo na resistência dos compósitos com a adição de silicato de sódio. Para 2%CC(M1)8, a resistência passou de 0,85 MPa para 25,9 MPa, representando um aumento de 2.947%. Já para 2%CC(M1)10, o aumento foi de 429%, passando de 3,8 MPa para 20,1 MPa. Nos compósitos de CC(M2)8, observou-se que o aumento da proporção de casca de café (CC) de 2% para 4% resultou em uma diminuição da resistência à compressão, com os valores caindo de 25,9 MPa para 22,5 MPa, o que representa uma redução de aproximadamente 13%. Apesar dessa queda, a adição de CC nas proporções de 2% e 4% ainda apresentou resultados superiores à referência (20,6 MPa), indicando que, até esse ponto, a inserção de CC contribui positivamente para a resistência mecânica. No entanto, ao atingir a

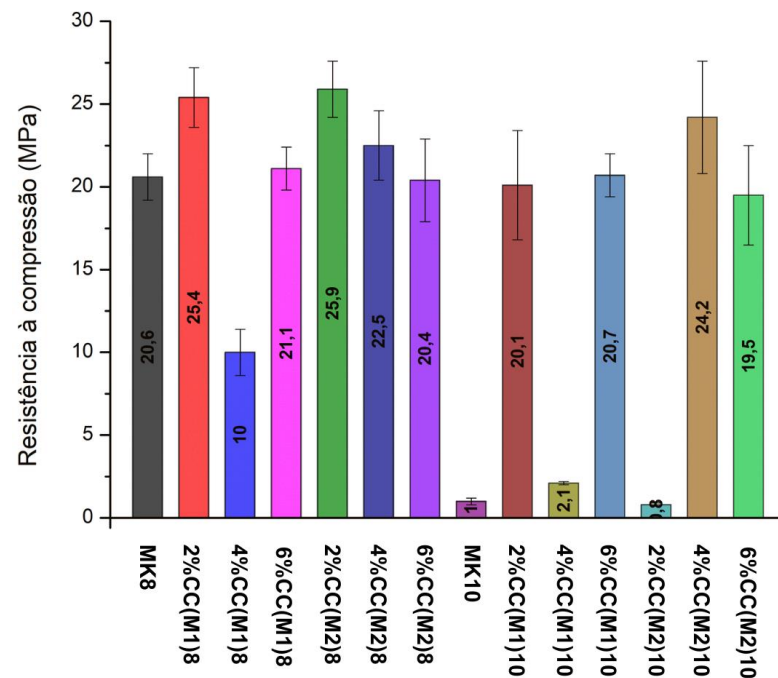
proporção de 6% de CC, a resistência caiu para 20,4 MPa, um valor inferior à referência, resultando em uma redução de cerca de 1% em relação à amostra de referência. Além disso, os resultados não demonstraram uma tendência consistente em todas as amostras, indicando que a redução da granulometria da CC não é um fator determinante para o aumento da resistência em todas as condições avaliadas.

A maior molaridade (10 mol/L) utilizada como solução ativadora, não apresentou maiores resultados na resistência à compressão em comparação à concentração de 8 mol/L. Em contrapartida, as misturas ativadas com 8 mol/L de NaOH estabeleceram um equilíbrio eficaz entre a reatividade e a integridade estrutural da matriz, destacando-se as amostras com 2%CC (M1)8 e 2%CC(M2)8, que apresentaram valores comparáveis à resistência de concretos convencionais, que tipicamente variam de 20 a 40 MPa para aplicações estruturais (Neville, 2016).

A combinação de silicato de sódio e hidróxido de sódio como ativadores resultou em resistências à compressão superiores às de sistemas ativados apenas com NaOH. Essa sinergia ocorre devido à capacidade dos íons de silicato de acelerar as reações de polimerização e formar microestruturas mais densas, conforme destacado por Ali (2019) e Witzleben (2020).

Além disso, a resistência de alguns compósitos apresenta tendência de diminuição com o aumento da quantidade de CC, possivelmente devido à alta absorção de água da CC, o que compromete a coesão da matriz, resultado esse também encontrado no trabalho de Barbosa (2023). Esses resultados, mostram que a CC possui potencial para ser aplicada em CAA e o controle da proporção da CC é essencial para otimizar as propriedades mecânicas e alcançar desempenho adequado para aplicações estruturais em CCA, como também afirmam Lima et al. (2022) e Barbosa (2023).

Figura 17: Resistência à compressão dos compósitos



Fonte: Do autor (2023)

De forma geral, as resistências à tração na flexão e à compressão encontradas neste estudo mostrou que os CAA apresentam propriedades mecânicas competitivas quando comparados ao cimento Portland, especialmente no que diz respeito à resistência à compressão. Enquanto os cimentos Portland tradicionais podem atingir resistências mais altas em longo prazo (MEHTA e MONTEIRO, 2014), os CAA demonstraram desempenho satisfatório em curto prazo, especialmente com proporções otimizadas de CC.

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, são exploradas as propriedades físicas, mecânicas, químicas e morfológicas de uma mistura ativada alcalinamente composta por MK e resíduos de CC. Através dos resultados obtidos, é possível concluir que:

- I. A redução significativa do índice granulométrico da CC(M1) para a CC(M2) após o tratamento mecânico não contribuiu para uma maior reatividade e adesão entre os materiais, mesmo que o tamanho da partícula e a superfície específica seja fatores importantes para garantir a intensidade na aceleração das reações.
- II. A calcinação a 750°C assegura a reatividade do MK, como indicado pelo pico próximo a 500°C nas curvas TG/DTG, enquanto suas características geométricas observadas no MEV reforçam sua ampla aplicação em CAA.
- III. A análise de nutrientes da CC revelou alto teor de potássio (45,6%), tornando-a uma solução alcalina e reativa, com potencial para atuar como ativador alcalino alternativo. A presença de cálcio também pode influenciar na formação de zeólitas nos CAA.
- IV. As micrografias da CC revelam fibras na superfície das partículas, indicando potencial para melhorar a coesão com o MK.
- V. A CC, devido ao seu conteúdo orgânico, retarda a polimerização e prolonga os tempos de pega especialmente com 10 mol de NaOH, enquanto o silicato de sódio acelera a consolidação da matriz ao reduzir o tempo de pega final. Ajustes nos aditivos e condições de ativação são essenciais para otimizar a trabalhabilidade e resistência dos compósitos CAA.
- VI. Os gráficos de FTIR indicam que a maior concentração de NaOH intensifica a polimerização, reduzindo os grupos hidroxilas livres ($4000-3000\text{ cm}^{-1}$). Amostras com 10 mol/L, devido à presença de compostos orgânicos da CC e maior formação de redes inorgânicas, apresentam matriz cimentícia mais densa e melhor preservação dos compostos, evidenciando a importância do NaOH na estrutura e propriedades dos CAA.
- VII. A adição otimizada de CC aumentou a resistência à tração na flexão dos compósitos ativados com 10 mol/L de NaOH. A maior concentração de NaOH intensificou a reatividade do MK, enquanto o silicato de sódio contribuiu para uma matriz mais rígida e coesa, destacando a importância da combinação de ativadores e proporções de CC para otimizar as propriedades dos CAA. As

amostras de menor granulometria (M2) não apresentaram desempenho superior em relação às M1.

- VIII. A resistência à compressão das amostras ativadas com 10 mol/L de NaOH não mostrou melhorias significativas em relação às de 8 mol/L. As amostras com 2% de CC e 8 mol/L apresentaram bom equilíbrio entre reatividade e integridade estrutural, sendo adequadas para aplicações estruturais. A combinação de silicato de sódio e NaOH foi crucial para aumentar a resistência, formando matrizes mais densas e coesas. Contudo, o excesso de CC comprometeu a resistência devido à alta absorção de água, destacando a necessidade de controlar essa proporção. As amostras de menor granulometria (M2) não apresentaram desempenho superior em relação às M1.

Dessa forma, conclui-se que a CC, quando utilizada em combinações otimizadas com MK, demonstra grande potencial para a formulação de compósitos CAA. Além de contribuir para a melhoria da reatividade, resistência e coesão dos materiais, sua aplicação agrega valor ao resíduo agroindustrial, oferecendo uma solução eficiente para sua destinação e impulsionando o desenvolvimento de materiais com propriedades mecânicas adequadas para aplicações estruturais.

TERCEIRA PARTE - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando as propriedades identificadas e analisadas, este estudo proporciona uma compreensão abrangente da viabilidade de aplicações de compósitos CCA, elaborados a partir de MK e CC submetida a tratamento mecânico.

Os resultados obtidos destacam o grande potencial da CC como um componente importante para a formulação de aglomerantes com desempenho mecânico adequado para aplicações estruturais. A elevada concentração de potássio na CC a torna um ativador alcalino promissor, contribuindo para a reatividade dos compósitos. Além disso, a aplicação da CC agrega valor a este resíduo agroindustrial, oferecendo uma alternativa eficiente para sua destinação. A redução da granulometria da CC, embora tenha sido considerada, não resultou em uma melhoria significativa nas resistências mecânicas.

Ademais, a incorporação de silicato de sódio junto ao hidróxido de sódio elevou significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos, permitindo comparações favoráveis com os cimentos convencionais.

Os resultados desta pesquisa abrem novas possibilidades para a destinação eficiente dos resíduos agroindustriais na construção civil, agregando valor à CC e consolidando-a como uma alternativa promissora e viável na formulação de CAA.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- AIGBAVBOA, C.; OHIOMAH, I.; ZWANE, T. Sustainable Construction Practices: “a Lazy View” of Construction Professionals in the South Africa Construction Industry. **Energy Procedia**. Elsevier, v. 105, p.3003–3010, 2017.
- ALI, M. B.; SAIDUR, L.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. Renewable and Sustainable. **Energy Reviews**, Elsevier, v. 15, n. 5, p. 2252–2261, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C191**: Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. West Conshohocken, 2021.
- ARAÚJO, L. C. P. et al. Kraft lignin fractionation by organic solvents: Correlation between molar mass and higher heating value. **Bioresource Technology**, Elsevier, v. 314, p. 123757, 2020.
- ARULRAJAH, A. et al. Spent coffee grounds as a non-structural embankment fill material: Engineering and environmental considerations. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 72, p. 181–186, 2014.
- AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, Elsevier, v. 64, n. 371, p. 388–396, 2018.
- BARBOSA, H. A. A. Efeito da adição de resíduo de casca de café em geopolímeros à base de metacaulim. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) – **Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos**, Lavras, 2023.

BARBOSA, V. F. F.; MacKENZIE, K. J. D.; THOMPSON, J. Geopolymer: Synthesis and Characterization. **International Journal of Inorganic Materials**, v. 2, n. 4, p. 309-317, 2000.

BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; THAUMATURGO, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials**, Elsevier, v. 2, n. 4, p. 309–317, 2000.

BEHROUZIAN, F. et al. Characterization of dietary fiber from coffee silverskin: An optimization study using response surface methodology. **Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre**, Elsevier, v. 8, n. 2, p. 58–64, 2016.

BORGES, P. H. R. et al. Reuse of iron ore tailings in the production of geopolymer mortars. **REM - International Engineering Journal**, v. 72, n. 4, p. 581–587, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/remi/a/fBR9ZjcyYJfYnc7NCZK3bSg/?lang=en>>. Acesso em: 13 jun. 2023.

CANFIELD, G. M. et al. The role of calcium in blended fly ash geopolymers. **Journal of Materials Science**, v. 49, n. 17, p. 5922–5933, 2014. DOI 10.1007/s10853-014-8307-z. Disponível em: <<https://link-springer-com.ez26.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s10853-014-8307-z>>. Acesso em: 22/6/2023.

CASTRO, E. D. et al. ANALYSIS OF THE COFFEE PEEL APPLICATION OVER THE SOIL-CEMENT BRICKS PROPERTIES. **Coffee Science**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 12, 2019.

CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO₂/Na₂O ratio. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 109, p. 494–503, 2007.

CRIADO, M. et al. Effect of relative humidity on the reaction products of alkali activated fly ash. **Journal of the European Ceramic Society**, Elsevier, v. 32, n. 11, p. 2799–2807, 2012.

CRUZ, S. F. et al. Effect of organic materials on the setting time of alkali-activated binders. **Journal of Building Materials**, 2019.

CRUZ, L. R. et. al. The Influence of the Rice Husk Ash Addition on the Durability of Geopolymer Concrete Based on Fly Ash. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 352-363, 2019.

DA ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633–1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. GEOPOLYMERS AND GEOPOLYMERIC MATERIALS. **Journal of Thermal Analysis**, v. 35, p. 429–441, 1989.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry and Applications – 5 edition. **Institut Géopolymère**, p. 1-22, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265076752_Geopolymer_Chemistry_and_Applications>. Acesso em: 26/05/2023.

DE FIGUEIREDO, R. A. et al. Sustainable Alternatives to Portland Cement: The Alkali-Activated Slag Cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 51-59, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 093**: Solos – Determinação da densidade real, Norma Rodoviária, Método de ensaio, 1994.

DAS, D. et al. Characterization of Geopolymer Composites from Red Mud and Metakaolin: Physical, Mechanical and Microstructural Properties. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 7931–7935, 2021.

DULTRA, E. J. V. **Adição de subprodutos da cinza da casca de café (Coffea canephora) em massa cerâmica para porcelanato**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 1-135, 2013.

DUXSON, P. et al. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Elsevier, v. 292, n. 1, p. 8–20, 2007.

Aqui está a referência do trabalho de Duxson e Provis (2005) conforme a norma ABNT:

DUXSON, P. et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, p. 47–58, 2005.

EDUOK, E. I. Thermal properties of geopolymer materials.– Institutt For Matematikk Og Naturvitskap, Universitet I Stavanger, Stavanger, p. 1-84, 2016.

EMBRAPA. Relatório sobre o mercado de Café - Abril 2023. **Organização Internacional do Café**, p. 1–13, 2023.

EMMA, A. F.; ALANGAR, S.; YADAV, A.K. Extraction and characterization of coffee husk biodiesel and investigation of its effect on performance, combustion, and emission characteristics in a diesel engine. **Energy Conversion and Management: X**, Elsevier, v. 14, p. 100214, 2022.

ESKISAR, T.; ALTUN, S. Strength Properties of Coffee Waste Based Geopolymers. **Lecture Notes in Civil Engineering**, v. 90, p. 129–136, 2021.

ESPEJEL, K. R. et al. Geopolymeric Composite Materials Made of Sol-Gel Silica and Agroindustrial Wastes of Rice, Barley, and Coffee Husks with Wood-Like Finishing. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 24, 2022.

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

- FERREIRA, S. R. et al. Effect of microcrystalline cellulose on geopolymer and Portland cement pastes mechanical performance. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 288, 2021.
- FIOROTTO, R. S. et al. Avaliação de painéis de média densidade de bagaço de cana-de-açúcar aglomerados com resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 3, p. 1234-1245, 2023.
- FRANCO DE CARVALHO, J. M. et al. Low Environmental Impact Cement Produced Entirely from Industrial and Mining Waste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 31, n. 2, 2019.
- GHARZOUNI, A. et al. Predictive tools to control the structure and the properties of metakaolin based geopolymer materials. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Elsevier, v. 511, p. 212–221, 2016.
- HABERT, G. et al. Environmental Impact of Portland Cement Production: A Case Study of the Manufacturing Process in Brazil. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 3, p. 429-436, 2011.
- HARSONO, S. S. et al. Stove with Low Carbon Monoxide Emission Fueled by Solid Fuel Coffee-Husk Biopellet. **Sustainability** 2022, v. 14, n. 18, p. 11192, 2022.
- HASSAN, A.; ARIF, M.; SHARIQ, M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 223, p.704-728, 2019.
- HE, P. et al. Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer. **Ceramics International**, Elsevier, v. 42, n. 13, p. 14416–14422, 2016.
- HEAH, C. Y. et al. Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers. **Physics Procedia**, Elsevier, v. 22, p.305–311, 2012.
- HUANG, L. et al. Sustainable Use of Coffee Husks For Reinforcing Polyethylene Composites. **Journal of Polymers and the Environment**, New York, v. 26, p. 48–58, 2016.
- IACOBESCU, R. I. et al. Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier, v. 196, p. 287–294, 2011.
- ILLY, A.; VIANI, R. Espresso coffee: The science of quality. **Elsevier Academic Press**, London, 2. ed., 2005.
- KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 112, p. 4041–4052, 2016.
- KAZE, R. C. et al. The corrosion of kaolinite by iron minerals and the effects on geopolymerization. **Applied Clay Science**, Elsevier, v. 138, p. 48–62, 2017.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, vol. 42, p. 729-746, 2007.

KOMNITAS, P.; ZAHARAKI, D. Utilization of industrial by-products in the production of eco-cement and eco-concrete. **In: Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**, 2007.

KUA, T. A. et al. Stiffness and deformation properties of spent coffee grounds based geopolymers. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 138, p. 79–87, 2017.

KUMAR, H. et al. Utilisation of industrial waste (Fly ash) in synthesis of copper based surface composite through friction stir processing route for wear applications. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 196, p. 460–468, 2018.

LEMOUGNA, P. N. et al. The role of iron in the formation of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash: A ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy study. **Journal of Materials Science**, New York, v. 48, n. 15, p. 5280–5286, 2013.

LIMA, L. et al. Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 289, p. 125730, 2021.

LIMA, F. S. et al. Novel one-part alkali-activated binder produced with coffee husk ash. **Materials Letters**, v. 313, p. 131733, 2022.

LINS, L. N. **Estudo da aplicação da casca de café na indústria da construção**. Universidade Federal Fluminense. 2006.

LIU, D.; YUAN, X.; BHATTACHARYYA, D. The effects of cellulose nanowhiskers on electrospun poly (lactic acid) nanofibers. **Journal of Materials Science**, v. 47, p. 3159–3165, 2012.

MAJIDI, B. Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. **Materials Technology**, v. 24, n. 2, p. 79-87, 2009.

MARJABA, G. E.; CHIDIAC, S. E. Sustainability and resiliency metrics for buildings – Critical review. **Building and Environment**, v. 101, p. 116–125, 2016.

MASUERO, A. B. Materiais alternativos ao cimento Portland: uma revisão sobre potencial de redução de impacto ambiental. **Revista Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 65-79, 2011.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. São Paulo, 2011.

MEHTA, B. R. et al. High energy heavy ion induced changes in the photoluminescence and chemical composition of porous silicon. **Thin Solid Films**, v. 289, p. 95–98, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MOHAMAD IBRAHIM, M. N. et al. Chemical and thermal properties of lignins from oil palm biomass as a substitute for phenol in a phenol formaldehyde resin production. **Carbohydrate Polymers**, Elsevier, v. 86, n. 1, p. 112–119, 2011.

NAZARI, A.; BAGHERI, A.; RIAHI, S. Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. **Materials Science and Engineering: A**, Elsevier, v. 528, n. 24, p. 7395–7401, 2011.

NETO, J. A. S. **Influência da concentração alcalina (NaOH) e razão dos reagentes alcalinos ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) em concreto álcali-ativado de base metacaulim**. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OBENG, J. et al. Effect of calcium carbide residue on the sulphate resistance of metakaolinbased geopolymer mortars. **Cleaner Materials**, p. 100177, 2023.

OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S. An Overview of the Potential Uses for Coffee Husks. **Coffee in Health and Disease Prevention**, Elsevier, p.283–291, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em <<https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ (ICO). Relatórios e estatísticas sobre o mercado de café global. Disponível em <<https://www.ico.org>>. Acesso em: 04 dez. 2024.

PERERA, D. S. et al. Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 3099–3106, 2006.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what?. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 47, n. 1–2, p. 11–25, 2013.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299–327, 2014.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. **Springer**, Dordrecht, 2014.

PROVIS, J. L.; PALOMO, A.; SHI, C. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results. **Chemistry of Materials**, v. 17, p. 3075– 3085, 2015.

PROVIS, J. L. et al. Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 110–125, 2015.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymers Structures, Processing, Properties and Industrial Applications. **Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC**, p. 1–454, 2009.

SABOGAL-OTÁLORA, A. M.; PALOMO-HERNÁNDEZ, L.F.; PIÑEROS-CASTRO, Y. Sugar production from husk coffee using combined pretreatments. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, Elsevier, v. 176, p. 108966, 2022.

SAENGER, M. et al. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, v. 23, n. 1, p. 103–121, 2001.

SANTA, R. A. A. B. **Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANTOS, R. V. et al. Caracterização física e mecânica de compósitos cimentícios reforçados com fibras de coco. **Revista Matéria**, v. 28, n. 1, p. e-12345, 2023.

SCHNEIDER, M. et al. Sustainable cement production—present and future. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 642–650, 2011.

SETTER, C.; OLIVEIRA, T. J. P. Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. **Renewable Energy**, v. 189, p. 1007–1019, 2022.

SEVERO, C. G. S. et al. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, n. 2, p. 55–67, 2013.

SHETTIMA, A. U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 120, p. 72–79, 2016.

SILVA, L. H. et al. Polymerization dynamics in alkali-activated materials using organic additives. **Materials Science Journal**, 2020.

SILVA, W. R. L.; ALMEIDA, L. R.; MELO, D. M. A. Resistência Mecânica e Avaliação Térmica de Geopolímeros à Base de Cinzas de Carvão e Metacaulim. **Revista Matéria**, v. 25, n. 3, p. e20200358, 2020.

TIPPAYASAM, C. et al. Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 104, p. 293–297, 2016.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J. Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 38, n. 10, p. 3932–3941, 1999.

VAN OSS, H.; PADOVANI A. Cement manufacture and the environment Part II: environmental challenges and opportunities. **Journal of Industrial Ecology**, v. 7, p. 93–126, 2003.

VOLSI, B. et al. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLOS ONE**, v. 14, n. 7, p. 0219742, 2019.

YUN-MING, L. et al. Formation of one-part-mixing geopolymers and gepolymer ceramics from geopolymer powder. **Construction and Building Materials**, v.156, p. 9-18, 2017.

YUSUF, M. O. Bond Characterization in Cementitious Material Binders Using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. **Applied Sciences**, v. 13, n. 5, p. 3353, 2023.

ZACCARON, A. et al. Incorporação de escória de alto-forno a carvão vegetal em massa de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 25, n. 1, p. 35-41, 2020.

ZEAL ESCAMILLA, E.; HABERT, G.; WOHLMUTH, E. When CO₂ counts: Sustainability assessment of industrialized bamboo as an alternative for social housing programs in the Philippines. **Building and Environment**, v. 103, p. 44–53, 2016.

ZHANG, C. et al. Effects of silane on reaction process and microstructure of metakaolin-based geopolymer composites. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 32, p. 101695, 2020.

ZHANG, M. et al. Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 124, p. 373–382, 2016.