

SUBMETIDO 06/12/2021

APROVADO 30/05/2022

PUBLICADO ON-LINE 16/06/2022

PUBLICADO 10/10/2023

EDITORES ASSOCIADOS

Mariana Amorim Fraga e
Hugo Plínio de Andrade Alves

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6543>

ARTIGO ORIGINAL

Estudo da aplicação das cinzas provenientes da queima da casca do coco em concretos

RESUMO: O Brasil se destaca na produção mundial de coco. Contudo, aproximadamente 80% do peso bruto do coco é considerado resíduo, o que, por sua difícil degradação, grande volume e descarte inadequado, gera problemas ao meio ambiente. O presente trabalho tem por objetivo analisar as características das cinzas geradas pela queima da casca do coco, produzidas no litoral sul de Alagoas, visando à aplicação como adição mineral em concretos. As cinzas foram caracterizadas através dos ensaios de Análise Granulométrica, Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Análise Termogravimétrica (TG - *Thermogravimetric Analysis*) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Nos resultados obtidos por DRX, quanto à composição química, os principais compostos identificados foram KCl, SiO₂ e Ca₂(SiO₄). Para os ensaios tecnológicos no concreto, os percentuais adotados de substituição de cimento por cinzas foram de 3%, 5% e 7%. A consistência do concreto tende a aumentar quanto maior o percentual das cinzas incorporadas no concreto. A absorção de água foi maior quanto maior o percentual de cinzas incorporadas, variando de 5,85% a 7,56%. Quanto à resistência à compressão, houve aumento de 12,19% de resistência em MPa na formulação com substituição de 3% de cimento por cinzas. Conforme os resultados obtidos, pode-se concluir que existe viabilidade de utilização das cinzas produzidas como adição mineral no concreto nos percentuais abaixo de 5%.

Palavras-chave: adição em concreto; adições minerais; cinzas do coco; subproduto do coco.

Study of the application of ashes from the burning of coconut husk in concrete

ABSTRACT: Brazil stands out in the world production of coconut. However, approximately 80% of the coconut's gross weight is considered waste; which due to its difficult degradation, large volume, and inadequate disposal, causes problems for the environment. The present work aimed to analyze the characteristics of the ash generated by the burning of coconut husk,

 Marcos Vinícius do Prado Silva ^{[1]*}

 Sheyla Karolina Justino Marques ^[2]

 Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Raposo ^[3]

[1] marcos.prado@ifal.edu.br

[2] sheyla.marques@ifal.edu.br

[3] aurea.raposo@ifal.edu.br

Programa de Pós-Graduação em
Tecnologias Ambientais, Instituto Federal
de Alagoas (IFAL), Brasil

*Autor para correspondência.

produced on the south coast of Alagoas, aiming at its application as mineral addition in concrete. The ashes were characterized through Granulometric Analysis, X-Ray Fluorescence (FRX), X-Ray Diffraction (XRD), Thermogravimetric Analysis (TG), and Scanning Electron Microscopy (SEM). In the results obtained by XRD, regarding the chemical composition, the main compounds identified were: KCl, SiO₂, and Ca₂(SiO₄). For the technological tests on concrete, the percentages of replacement of cement by ash were 3%, 5%, and 7%. The consistency of concrete tends to increase, the higher the percentage of ash incorporated into the concrete. The water absorption was greater the higher the percentage of ash incorporated, ranging from 5.85% to 7.56%. As for the compressive strength, there was a 12.19% increase in strength in MPa in the formulation with the replacement of 3% of cement by ash. According to the results obtained, it can be concluded that there is the feasibility of using the produced ash as a mineral addition in concrete in percentages below 5%.

Keywords: addition in concrete; coconut ash; coconut by-product; mineral additions.

1 Introdução

O Brasil se destaca como um dos principais produtores mundiais de coco, ocupando a quinta posição no *ranking* global. No entanto, é preocupante observar que cerca de 85% da massa desse fruto acaba se transformando em resíduos desperdiçados, sendo indevidamente encaminhada para lixões, aterros sanitários e áreas públicas inadequadas. Essa situação se configura como um problema, pois, embora orgânico, o resíduo do coco mostra-se de difícil degradação, demorando de 8 a 12 anos para se decompor completamente (CORRADINI *et al.*, 2009; NUNES, 2021).

Pensando em alternativas para evitar a perda produtiva associada aos resíduos de coco, Padilla *et al.* (2018) observaram que a casca do coco tem poder calorífico superior (PCS) de cerca de 18,7 MJ/kg. Em virtude desse potencial calorífico, algumas empresas já utilizam a casca do coco como fonte de energia. A partir do processo de geração da energia, um dos resíduos sólidos produzidos são as cinzas da casca do coco.

Em paralelo, a indústria da Construção Civil vem incorporando resíduos de diversas cadeias produtivas. Trata-se de uma medida relevante, visto que, apesar de ser reconhecida como uma das mais importantes atividades produtivas e econômicas, essa indústria é responsável também por grandes impactos ao meio ambiente, tanto pelo grande consumo de matérias-primas como pelos processos produtivos geradores de resíduos (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Um dos exemplos está na composição do concreto, material da Construção Civil mais consumido do mundo, que consiste, basicamente, na mistura de cimento, areia, brita e água. A demanda por cimento está crescendo ao longo dos anos. Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o consumo total desse material no Brasil, em 2019, foi de 54,8 milhões de toneladas (SNIC, 2019). Entretanto, ao longo do tempo, as técnicas de dosagem, de produção e de utilização do concreto passaram por inúmeras inovações. Dessa forma, a evolução da tecnologia de produção de concretos foi incrementada com uso de adições e/ou aditivos (SCHWAAB, 2015). Do mesmo modo, a produção do cimento também gera grandes números de poluição ao meio ambiente, tendo em vista que foi responsável por cerca de 5% de toda a emissão de dióxido de carbono (CO₂) do planeta gerada pelo homem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Diante disso, a aplicação de adições minerais e orgânicas na produção de concreto, em substituição ao cimento, promove a minimização do impacto ambiental referente à sua fabricação, reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera; além da minimização do consumo de energia e da preservação das jazidas de calcário e argila utilizadas na fabricação do cimento Portland (BONATO, 2014).

Este artigo integra um estudo que buscou avaliar a aplicação das cinzas da casca do coco como adição mineral em concretos, visando valorizar o coproduto subutilizado, inserindo-o na cadeia produtiva da Construção Civil como potencial alternativa de fechamento de ciclo de vida do material.

O artigo encontra-se estruturado em cinco seções. A seção 2 sintetiza o referencial teórico, que abrange desde a produção e os principais usos industriais do coco até a contextualização do papel das adições minerais, passando pela síntese do sistema produtivo do coco e dos estudos sobre as fibras da casca do coco como coprodutos. A seção 3 aborda os materiais e métodos adotados, bem como resume os procedimentos dos ensaios de caracterização das cinzas e dos ensaios tecnológicos. A seção 4 apresenta os resultados das análises físico-químicas das cinzas e da aplicação do coproduto no concreto em diferentes percentuais de adição. Por fim, a seção 5 apresenta as conclusões e considerações finais do estudo.

2 Referencial teórico

Nesta seção, contextualizam-se os principais usos industriais do coco no Brasil, no Nordeste, especificamente no município de Coruripe, em Alagoas. Além disso, também se aborda o funcionamento do sistema produtivo do coco; apresentam-se estudos que utilizaram o coproduto do coco na produção de novos materiais; e conceituam-se as adições minerais em argamassas e concretos, considerando essa aplicação do coproduto do coco neste estudo.

2.1 Produção e principais usos industriais do coco

No Brasil, a previsão estimada em 2020 era de que a área colhida de coco-da-baía chegasse a 223 mil hectares, com produção de 1,95 bilhão de frutos. Diferentemente do principal direcionamento dos maiores produtores mundiais, os cultivos brasileiros destinam-se à produção de coco seco *in natura*, coco ralado, leite de coco e água de coco (NUNES, 2021). O Nordeste constitui-se como a maior região produtora, com 81,3% da área e 71,2% da produção nacional, posição que foi conquistada desde a introdução dos primeiros plantios em seu litoral e que ainda se mantém (BRAINER; XIMENES, 2020).

Na região litorânea do estado de Alagoas, os produtos agrícolas de maior ênfase são a cana-de-açúcar e o coco. O município de Coruripe, por exemplo, possui uma área de 4 mil hectares destinada à plantação de coqueiros, representando 2% de toda a área nacional existente para o plantio desse fruto, com produção superior a 20 milhões de cocos ao ano, cerca de 4% de toda a produção nacional (IBGE, 2017).

O cultivo do coco em Alagoas e no Brasil tem como maior finalidade a produção de insumos para a indústria alimentícia; contudo, como coprodutos, são geradas milhões de toneladas de cascas desse fruto por ano. Atualmente, o destino das cascas de coco configura-se como questão crítica, visto que grande parte dessas cascas, devido à falta de gerenciamento adequado, acaba sendo descartada de forma inapropriada, causando

impactos ambientais negativos, tais como sobrecarga em lixões e aterros sanitários, poluição do ar e obstrução do fluxo de água quando lançadas em rios, córregos ou áreas de drenagem, contribuindo para inundações e degradação ambiental (CAVALCANTE, 2017).

2.2 Sistema produtivo do coco

O sistema de produção do coco vem sendo significativamente modificado nas últimas décadas, sobretudo nas produções de coqueiros do tipo anão e híbrido, em que se percebe a passagem do modelo de produção baseado no extrativismo para o modelo produtivo, inserido no contexto representado pela modernização agrícola (CAVALCANTE, 2017).

Entretanto, na região Nordeste, cerca de 60% da variedade plantada ainda é de coqueiro gigante, que é destinado à produção de coco seco. A renda do produtor, muitas vezes, não é suficiente para cobrir os custos com insumos e adoção de tecnologias, o que o faz continuar com o mesmo sistema de cultivo semiextrativista, principalmente em áreas litorâneas (BRAINER; XIMENES, 2020).

O sistema de produção adotado baseia-se em um modelo produtivo vinculado à Economia Linear, que consiste no processo composto pelas etapas: i) extração de insumos; ii) produção; iii) distribuição de produtos; iv) consumo; e v) descarte de resíduos e/ou coprodutos que não estão sendo utilizados. Esse modelo mostra-se inviável por causar o esgotamento dos recursos finitos do meio ambiente e provocar enorme geração de resíduos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Em contrapartida ao modelo linear de produção, surgiu um novo modelo econômico, baseado na Economia Circular, que incentiva outra maneira de utilizar as matérias-primas e a energia. Esse modelo constitui-se em três princípios básicos: respeito à preservação e ao aumento do capital natural; circulação constante dos materiais; e eficácia do sistema, através da identificação e exclusão das externalidades negativas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017).

Desse modo, esse modelo econômico mostra-se relevante, considerando que, segundo Oliveira, França e Rangel (2019), novos modelos de produção, baseados nos princípios da Economia Circular, tornam-se necessários para o desenvolvimento de produtos e processos locais que resultem no prolongamento da vida útil dos materiais e que estejam voltados ao reprocessamento dos coprodutos ou à reintegração em novas cadeias de produção.

Somado a isso, a utilização desse modelo apresenta-se como uma opção na Construção Civil, visto que, segundo Munaro e Tavares (2022), esse setor demanda alternativas para otimizar o uso das matérias-primas e incentivar a redução e a reciclagem dos resíduos de construção civil (RCC). Nesse sentido, o estudo dos autores supracitados destaca que é possível a implantação da Economia Circular, norteadas por instrumentos normativos como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio dos princípios de responsabilidade compartilhada e de logística reversa.

Portanto, a Economia Circular busca a otimização dos materiais, ampliando a vida útil dos produtos e ativos, durante e após o uso; reduzindo o consumo de insumos e recursos não renováveis; optando pela utilização de recursos renováveis e insumos de base biológica; propondo a maior circulação dos coprodutos através do reuso na indústria alimentícia ou em indústrias da mesma cadeia produtiva; ou, ainda, através do reprocessamento em outras indústrias e/ou cadeias produtivas (LUZ, 2017).

2.3 Estudos das fibras da casca do coco como coprodutos

As fibras vegetais existentes na casca do coco são formadas por diversos componentes químicos constituídos à base de hidrogênio (H) e de carbono (C), sendo os principais: a celulose, a hemicelulose e a lignina (CABRAL *et al.*, 2017).

Royer *et al.* (2005) afirmam que o primeiro aditivo redutor de água utilizado pela indústria da Construção Civil foi um polímero dispersante à base de lignina. De acordo com Moura (2014), as fibras da casca do coco (mesocarpo) são materiais lignocelulósicos compostos por mais de 40% de lignina, atribuindo dureza e durabilidade quando comparadas com outras fibras naturais.

Essa característica da fibra da casca do coco como material lignocelulósico foi corroborada pelo estudo de Souza *et al.* (2023), que avaliou a produção de papel com o uso da fibra da casca do coco a partir do processo químico de Kraft, obtendo como resultados a produção de papel com boa flexibilidade, imprimibilidade e fácil clareamento.

Outras pesquisas também demonstraram o potencial de utilização das cascas do coco, em forma de fibra e/ou pó, como reforçador em matriz de polímeros no desenvolvimento de materiais compósitos (AGUNSOYE; ISAAC; SAMUEL, 2012; DAS; BISWAS, 2016) e como agregados na composição de argamassas de cimento ou concretos especiais para a Construção Civil (ASASUTJARIT *et al.*, 2007).

Lertwattanakur e Suntijitto (2015) avaliaram o uso de 15% de fibras do coco verde em materiais feitos de argamassa de cimento com fibra de coco e de óleo de palma para aplicação em telhados e revestimentos. Eles concluíram que os produtos de fibrocimento com fibras naturais podem ser usados para melhorar a eficiência energética na Construção Civil.

Prusty e Patro (2015) analisaram a aplicação da casca de coco em concretos, comparando as diferentes propriedades físicas e mecânicas, analisando o comportamento estrutural e a condutividade térmica desses materiais. Como resultado, a casca do coco demonstrou viabilidade de utilização.

Outros estudos apontaram o potencial de utilização das cinzas de biomassa na produção de materiais de construção, a exemplo da casca de arroz (PEREIRA *et al.*, 2015), do bagaço de cana-de-açúcar (PAULA *et al.*, 2009), da folha de bananeira (KANNING, 2013) e das cinzas da casca do coco (BONATO, 2014).

2.4 Adições minerais

Segundo a NBR 11172 (ABNT, 1990, p. 4), o termo *adição* deve ser empregado para designar “[...] produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características [...]”, sendo essas adições classificadas quanto à ação físico-química em três tipos: inertes, cimentantes e pozolânicas.

As adições minerais inertes promovem, basicamente, três efeitos físicos principais sobre a hidratação do cimento Portland, a saber: redução do consumo do cimento; aumento no teor de finos; e nucleação heterogênea. A redução do consumo do cimento é equivalente ao aumento da relação água/cimento. Quanto maior o teor de substituição, menor a quantidade de cimento, acarretando menor teor de hidratos produzidos ao longo do tempo (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Entre os efeitos físicos, está o efeito *microfiler*, que consiste na ocupação dos espaços vazios por micropartículas de adição. O efeito da redução do consumo do cimento consiste na menor concentração de cimento, diminuindo a quantidade de produtos da hidratação; e o efeito de nucleação heterogênea, proporcionado pela adição mineral, funciona como a restrição do espaço para o crescimento dos cristais na superfície do cimento (GUIMARÃES; MATOS, 2017).

As adições denominadas cimentantes dispõem de hidratação lenta, e a quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) produzida não é suficiente para que essas adições sejam utilizadas com finalidade estrutural. Esse tipo de adição não precisa de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{HO})_2$) para formar os produtos cimentantes C-S-H; contudo, quando usada em substituição parcial ao cimento Portland ou como adição, a presença da gipsita e do $\text{Ca}(\text{HO})_2$ acelera a hidratação, proporcionando a formação de C-S-H (DAL MOLIN, 2005).

As adições pozolânicas são definidas pela NBR 12653 (ABNT, 2014) como materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que dispõem de pouca ou nenhuma atividade aglomerante; no entanto, apresentam granulometria fina; e, na presença de água, fixam o $\text{Ca}(\text{HO})_2$ à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades hidráulicas.

Quanto ao uso de cinzas como adição mineral, a eficiência está relacionada ao tipo de biomassa utilizada e às condições de queima (variação de temperatura, tipo de caldeira, entre outras), pois esses fatores influenciam diretamente nas propriedades químicas e físicas das cinzas e determinam o efeito sobre os materiais à base de cimento, seja na aplicação como pastas, argamassas ou concretos (GUIMARÃES; MATOS, 2017).

3 Método da pesquisa

O desenvolvimento da pesquisa foi dividido em duas etapas, a saber: i) caracterização e ensaios físico-químicos das cinzas produzidas; ii) utilização das cinzas em traços de concretos, com realização de ensaios de consistência, de absorção de água e de resistência à compressão.

A produção e a coleta das cinzas ocorreram em um sítio situado na cidade de Coruripe, estado de Alagoas. Trata-se de uma pequena propriedade de cultivo do coco, como outras existentes naquela região, em que, após a finalização da colheita, os cocos são descascados no próprio terreno e vendidos para o empresariado local, sendo apenas o endocarpo comercializado.

Após os cocos serem descascados, as cascas são amontoadas e, dias depois, queimadas no próprio terreno, por não haver nenhuma alternativa de reuso no próprio cultivo, sendo a opção adotada para liberar espaço no terreno. A queima é realizada de maneira induzida, com uso de fósforo, já que as cascas secas entram em combustão com facilidade.

Para a pesquisa, foram queimadas, separadamente, em torno de 100 cascas de coco sobre uma base metálica para facilitar a coleta das cinzas. Foi destinado para caracterização e ensaios tecnológicos em torno de 1 kg das cinzas coletadas.

3.1 Análises físico-químicas das cinzas

Nesta subseção, apresentam-se os procedimentos adotados para as análises físicas das cinzas, por meio da análise granulométrica e da massa específica; e para as análises

químicas das cinzas, a partir da análise termogravimétrica, da fluorescência de raios X e da difração de raios X.

3.1.1 Análise granulométrica das cinzas

Para a realização da análise granulométrica, foram separadas duas amostras de 300 g de cada tipo das cinzas produzidas, com vistas à repetição do procedimento. Em seguida, foi realizado o processo de peneiramento, utilizando parte da série normal de Tyler, sendo empregadas as peneiras com as seguintes medidas: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.

Além do peneiramento no agitador por 2 minutos, foi adotado o peneiramento manual e individual, até que fosse percebido que a passagem de material era inferior a 1% do material retido.

3.1.2 Massa específica das cinzas

Considerando que não há norma técnica para determinação de massa específica das cinzas enquanto coproduto, para a pesquisa, foi adotada a NBR 16605 (ABNT, 2017). O líquido utilizado no ensaio foi o querosene, e a massa adotada das cinzas foi de 50 g.

3.1.3 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica permite obter informações das reações que ocorrem durante a degradação do material pelo calor (PADILLA, 2018). Parâmetros como composição química, razão de aquecimento e temperatura podem ser comparados nessa análise; sendo assim, neste estudo, a análise foi realizada na faixa de temperatura de 20 °C a 1000 °C, sob atmosfera de argônio, usando a razão de aquecimento de 5 °C/min e a vazão de 50 ml/min. A massa da amostra pesada em cadinho de alumina foi de, aproximadamente, 15 mg.

3.1.4 Fluorescência de Raios X

A Fluorescência de Raios X (FRX) é a técnica não destrutiva pela qual é possível realizar tanto análises quantitativas como qualitativas, assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra (OLIVEIRA, 2011). O ensaio foi realizado utilizando o espectrômetro EDX-720 da Shimadzu em atmosfera a vácuo, empregando o método semiquantitativo para determinação dos elementos presentes nas amostras.

3.1.5 Difração de Raios X

A Difração de Raios X (DRX) é a técnica que revela informações estruturais, como composição química, estrutura do cristal, tamanho do cristalito, orientação preferida e espessura da camada (OLIVEIRA, 2011). O ensaio foi realizado utilizando o aparelho

Shimadzu XRD-6000, com radiação de Cu-K α e ângulo de varredura (2 Θ) de 0° a 80°, para identificação das fases mineralógicas presentes.

3.1.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

A fibra natural e as cinzas foram analisadas através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foram registradas imagens de alta resolução, com magnificação de 100 \times , 500 \times , 1000 \times , 2000 \times e 5000 \times do tamanho real do material, para observação das características microestruturais. O procedimento de preparação das amostras consistiu no processo de metalização das amostras por fina camada de ouro, sendo as amostras posteriormente levadas para o MEV.

3.2 Ensaios tecnológicos no concreto

A determinação do traço de referência do concreto foi realizada seguindo os critérios estabelecidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (RODRIGUES, 1998). Após a definição dos materiais e o cálculo dos parâmetros, obteve-se o seguinte traço de referência: 1 : 2,17 : 2,22 : 0,57. O resumo dos parâmetros adotados e calculados pode ser visto a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1 ►

Resumo dos parâmetros.

Fonte: dados da pesquisa

Parâmetros adotados e calculados		
<i>D</i> _{max} agregado	Mm	9,50
Módulo de finura da areia	–	2,20
Massa especificada da areia (<i>pm</i>)	kg/m ³	2673
Massa especificada da brita (<i>pb</i>)	kg/m ³	2683
Massa especificada do cimento (<i>pc</i>)	kg/m ³	3100
Massa unitária da brita (<i>Mu</i>)	kg/m ³	1450
Massa especificada da água (<i>pa</i>)	kg/m ³	1000
<i>Slump</i> pretendido	mm	60-80
Resistência característica (<i>Fck</i>)	Mpa	20,00
Resistência média (<i>Fcj</i>)	Mpa	26,60
Resistência do cimento	Mpa	32,00
Relação (<i>a/c</i>)	–	0,57

A mistura dos materiais para confecção dos concretos foi executada manualmente. Os ensaios de absorção de água por imersão e de resistência à compressão foram executados em corpos de prova de concreto de formato cilíndrico de 10 cm \times 20 cm, moldados conforme critérios estabelecidos na NBR 5738 (ABNT, 2015).

Foram quatro tratamentos ao todo, considerando o traço de referência e substituições em massa de 3%, 5% e 7% de cimento por cinzas. Em cada tratamento, foram confeccionadas quatro amostras para a realização dos ensaios de consistência do concreto (*slump test*), absorção de água e resistência mecânica à compressão.

3.2.1 Consistência do concreto (*slump test*)

O ensaio do abatimento do concreto, também conhecido como *slump test*, foi realizado para verificar a trabalhabilidade do concreto em seu estado plástico, buscando medir sua consistência. O ensaio de consistência foi realizado conforme procedimentos estabelecidos pela NBR 16889 (ABNT, 2020). O ensaio foi realizado em todos os tratamentos propostos na pesquisa, visando observar a influência da substituição parcial do cimento por cinzas nos percentuais definidos.

3.2.2 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado conforme procedimentos estabelecidos na NBR 9778 (ABNT, 2005). O ensaio foi realizado em quatro corpos de prova por traço proposto. Após 14 dias submersos, os corpos de prova foram retirados da água e pesados. Depois, foram colocados na estufa por 24 horas e, posteriormente, pesados novamente. Retornaram para a estufa por mais 24 horas e foram, mais uma vez, pesados. Como a variação de massa foi inferior aos limites previstos na norma, foram feitos os cálculos de absorção.

3.2.3 Resistência mecânica à compressão

O ensaio de resistência mecânica à compressão foi realizado em uma prensa elétrica da marca Forttest, modelo FT 01, N/S 0173, com capacidade de 200 tf, conforme procedimentos estabelecidos na NBR 5739 (ABNT, 2018). O ensaio foi realizado em quatro corpos de prova por tratamento e com idade de rompimento de 28 dias. A técnica utilizada para nivelamento das faces dos corpos de prova foi a neoprene.

4 Resultados da pesquisa

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das cinzas e nos ensaios tecnológicos de aplicação do coproduto no concreto, por meio de tabelas e gráficos, juntamente com as discussões e análises correspondentes.

4.1 Resultados das análises físico-químicas

Nesta subseção, apresentam-se os resultados obtidos nas análises físico-químicas das cinzas, quanto à distribuição granulométrica média das cinzas e à massa específica.

4.1.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica média das cinzas produzidas está apresentada na Tabela 2 (próxima página).

Tabela 2 ▶

Distribuição granulométrica das cinzas.

Fonte: dados da pesquisa

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	% Retido acumulado
0,600	0	0	0,00%
0,300	0	0	0,00%
0,150	98,2	98,2	32,76%
0,075	96,6	194,7	64,99%
fundo	104,9	299,6	100,00%

Observando-se a Tabela 2, verifica-se que as partículas das cinzas ficaram retidas apenas a partir da peneira 0,15 mm, correspondendo ao percentual de 32,76% das cinzas. Na peneira 0,075 mm, ficaram retidos 32,23%; e, passando para o fundo do conjunto de peneiras, o percentual foi de 35,01%. O módulo de finura das cinzas calculado foi de 0,33, classificando-as como muito finas.

4.1.2 Massa específica das cinzas

Quanto ao resultado da massa específica das cinzas, para a amostra testada de 50 g, a leitura no frasco de Le Chatelier foi de 23,8, chegando ao resultado de massa específica de 2,1 g/cm³. Em relação à massa específica do cimento, as cinzas representam 67,7%.

O valor de massa específica foi semelhante aos valores encontrados nas cinzas produzidas no estudo de Bonato (2014), com massa específica de 2,27 g/cm³, e na pesquisa de Guimarães e Matos (2017), com massa específica de 2,22 g/cm³.

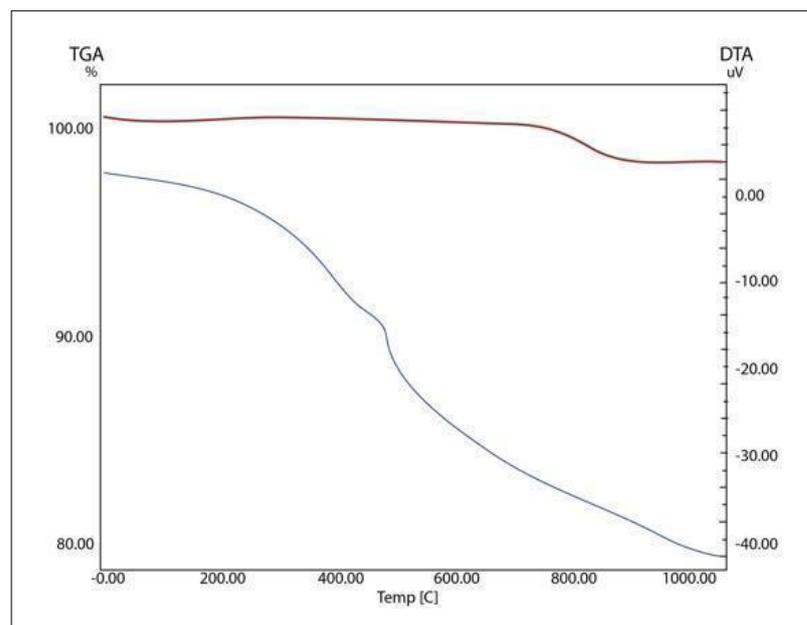
4.1.3 Análise termogravimétrica

A Figura 1 apresenta as curvas termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG) das cinzas.

Figura 1 ▶

Curvas TG e DTG das cinzas.

Fonte: dados da pesquisa



Observa-se, na Figura 1, que o material não apresenta perda de massa até a temperatura de 800 °C. Apenas acima dessa temperatura nota-se pequena variação da massa até os 1000 °C, indicando que a temperatura de queima por combustão realizada nas cascas do coco foi em torno de 800 °C.

4.1.4 Fluorescência de raios X

Os dados referentes à composição química das cinzas geradas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 ▶
Composição química
das cinzas.
Fonte: dados da pesquisa

Fórmula química	Concentração (%)
CaO	37,77
Fe ₂ O ₃	34,04
SiO ₂	11,67
SO ₃	4,58
MgO	3,71
K ₂ O	2,95
Al ₂ O ₃	1,99
P ₂ O ₅	1,44
ZnO	0,67
CuO	0,57

A Tabela 3 demonstra a predominância dos seguintes componentes químicos: óxido de cálcio (CaO), com 37,77%; óxido de ferro (Fe₂O₃), com 34,04%; e dióxido de silício (SiO₂), com 11,67%. Outros componentes químicos que se destacaram foram o óxido sulfúrico (SO₃), com 4,58%; o óxido de magnésio (MgO), com 3,71%; e o óxido de potássio (K₂O), com 2,95%.

Segundo estudos desenvolvidos por Mehta e Monteiro (2014), os óxidos CaO, SiO₂, óxido de alumínio (Al₂O₃), Fe₂O₃, MgO e SO₃ estão entre os principais componentes químicos do cimento, sendo o elemento de maior concentração o CaO, o que aponta para um fator positivo nas reações entre as cinzas e o cimento no concreto. A presença de CaO na matriz do concreto contribui no aumento da resistência mecânica do material. À medida que o CaO reage com a água, forma-se hidróxido de cálcio, que participa da formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis por ligar as partículas de cimento e agregados.

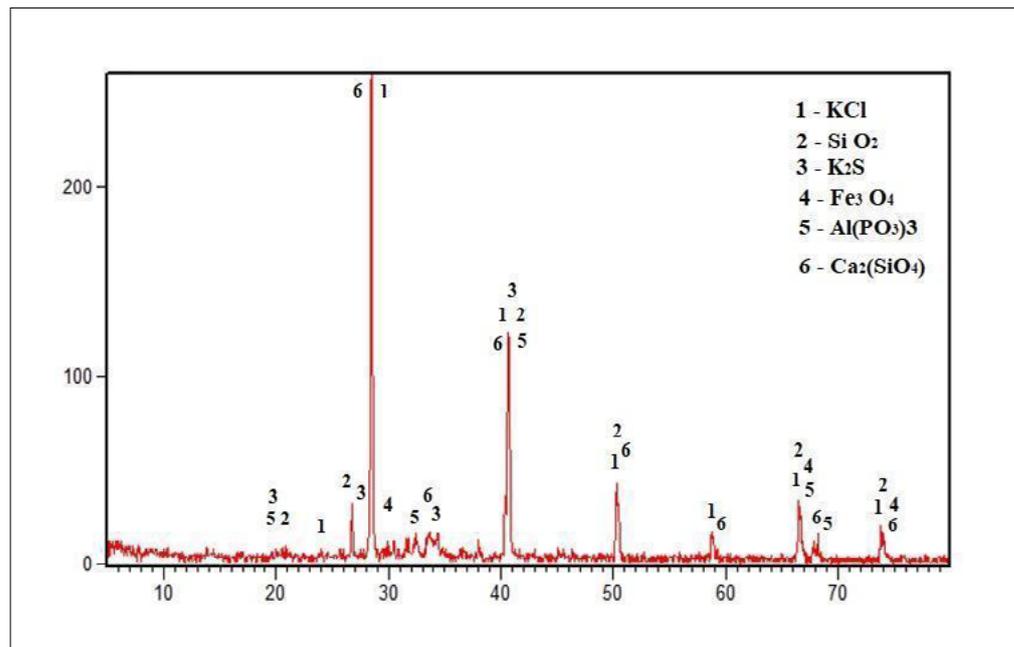
4.1.5 Difração de raios X

Verifica-se, na Figura 2, que o composto químico mais abundante foi o cloreto de potássio (KCl), com picos chegando à intensidade de 250 cps e com outros picos bem menos intensos, não passando de 5 cps. Também se observou o quartzo (SiO₂), o silicato de cálcio (Ca₂(SiO₄)) e a magnetita (Fe₃O₄).

Figura 2 ►

DRX das cinzas produzidas por combustão.

Fonte: dados da pesquisa



Percebe-se, a partir da Figura 2, a presença de seis compostos químicos identificados nas cinzas. Em alguns picos, verifica-se a presença de mais de um composto. No pico de maior intensidade, foi verificada a presença de cloreto de potássio (KCl), de belita (C₂S) e de silicato de cálcio (Ca₂(SiO₄)). Segundo Centurione (1999), o início da formação da belita ocorre em temperaturas entre 700 °C e 900 °C. Apesar de a queima dessas cinzas ter ocorrido sem controle de temperatura, pela formação do composto químico belita, parte do SiO₂ reage com o CaO disponível para sintetizar esse silicato de cálcio de baixa temperatura e, pela análise da curva termogravimétrica (TG) das cinzas, verificou-se que a temperatura aproximada de produção das cinzas foi superior a 800 °C.

A Tabela 4 apresenta a análise semiquantitativa dos compostos químicos identificados por DRX.

Tabela 4 ►

Compostos químicos identificados por DRX.
Fonte: dados da pesquisa

Nome do composto	Fórmula química	Semiquantitativa (%)
Cloreto de potássio	KCl	28
Quartzo	SiO ₂	26
Silicato de cálcio	Ca ₂ (SiO ₄)	21
Fosfato de alumínio	Al(PO ₃) ₃	11
Sulfeto de potássio	K ₂ S	7
Magnetita	Fe ₃ O ₄	7

Na Tabela 4, observa-se, como compostos químicos mais abundantes nas cinzas o KCl, com 28%; em seguida, tem-se o SiO₂, com 26%, e o Ca₂(SiO₄), com 21%; e, por fim, como compostos menos abundantes, tem-se: fosfato de alumínio (Al(PO₃)₃), com 11%, sulfeto de potássio (K₂S), com 7%, e magnetita (Fe₃O₄), também com 7%.

A formação da fase belita, quando hidratada, forma C-S-H, o que colaborou na elevação da resistência mecânica dos concretos produzidos com as cinzas.

4.1.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

As Figuras 3 e 4 apresentam o resumo das imagens geradas no MEV, sendo que a Figura 3 mostra a fibra natural, com magnificação de 500×, e a Figura 4 ilustra as cinzas geradas por queima por combustão, com magnificação de 500×.

Figura 3 ▶

Micrografias com aumento de 500× – fibra natural.

Fonte: acervo dos autores

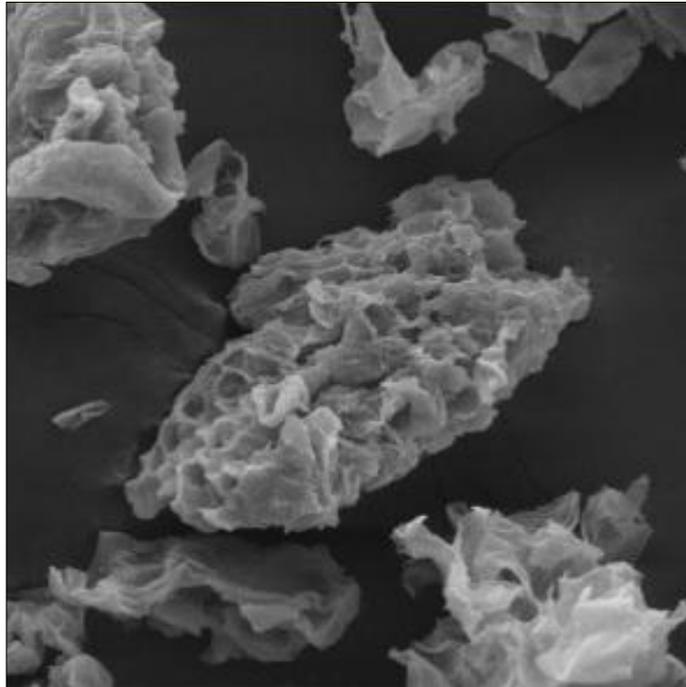
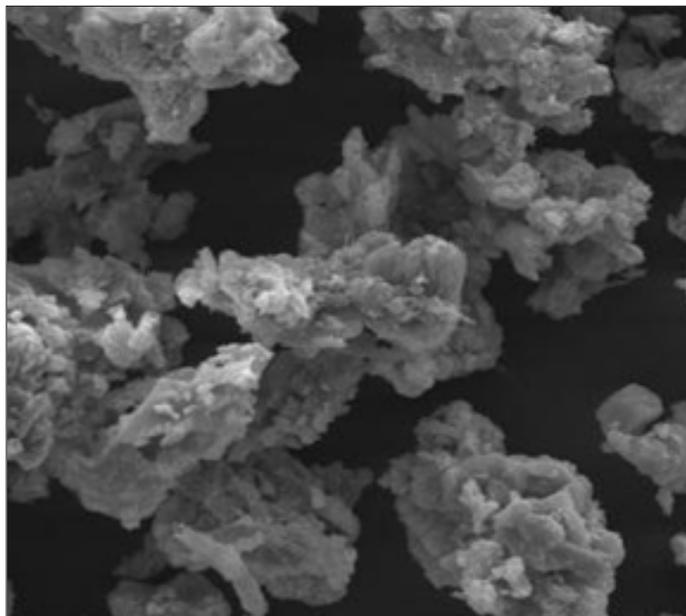


Figura 4 ▶

Micrografia com aumento de 500× – cinzas.

Fonte: acervo dos autores



Observando as imagens das Figuras 3 e 4, foi possível perceber as características da superfície dos grãos, que apresentam morfologia porosa, reforçando a menor densidade das cinzas, quando comparada com a dos agregados e a do cimento. Dessa forma, é

constatado que a estrutura da superfície do material mantém-se bastante semelhante, tanto nas fibras em estado natural (Figura 3) como nas cinzas (Figura 4).

No estudo realizado por Moura (2014), também foi observada a porosidade e a rugosidade da superfície do material, sendo destacado que a morfologia superficial está diretamente relacionada às capacidades de adesão e de homogeneização com a matriz polimérica.

4.2 Ensaio tecnológicos do concreto

Nesta subsecção, sintetizam-se os resultados referentes aos ensaios tecnológicos aplicados no concreto, referentes à consistência do concreto, verificada através do *slump test*; à absorção de água por imersão; e à resistência mecânica à compressão, após 28 dias da moldagem dos corpos de prova.

4.2.1 Consistência do concreto (*slump test*)

Considerando os traços previstos no estudo, foi realizado o ensaio de consistência do concreto, antes de serem moldados os corpos de provas. O traço de referência alcançou o *slump* pretendido no cálculo, ficando o resultado entre 60 mm e 80 mm de abatimento de tronco de cone. A Tabela 5 apresenta o abatimento medido no ensaio.

Tabela 5 ►
Consistência do
concreto (*Slump test*).
Fonte: dados da pesquisa

Traço	Abatimento de tronco de cone (mm)
Traço de referência	60
Substituição cinzas (3%)	60
Substituição cinzas (5%)	55
Substituição cinzas (7%)	45

Pode-se verificar, a partir da Tabela 5, que a incorporação das cinzas interferiu na consistência do concreto. Observa-se, também, a tendência de aumento da consistência do concreto com o aumento das cinzas incorporadas, obtendo-se diferença de 25% no abatimento do tronco de cone em relação ao traço de referência quando a substituição foi de 7%.

No estudo desenvolvido por Guimarães e Matos (2017), foi utilizado um aditivo superplastificante para compensar a perda de trabalhabilidade da mistura, após a adição das cinzas, sem alterar a relação água/cimento. Neste estudo, a intenção foi produzir os concretos sem a utilização de nenhum aditivo, visando favorecer a comparação entre o concreto produzido com cinzas e o produzido sem o uso de cinzas.

4.2.2 Absorção de água por imersão

A partir dos registros de massa dos corpos de prova, após 14 dias submersos em água e secagem na estufa, foram gerados os dados apresentados na Tabela 6 (próxima página), referentes aos valores de absorção de água.

Tabela 6 ►

Absorção de água.

Fonte: dados da pesquisa

Traço	Absorção de água (%)	Média da absorção (%)
Referência - CP 01	7,62%	7,78%
Referência - CP 02	7,98%	
Referência - CP 03	7,98%	
Referência - CP 04	7,53%	
Cinzas - 3% - CP 01	5,73%	5,85%
Cinzas - 3% - CP 02	5,88%	
Cinzas - 3% - CP 03	5,92%	
Cinzas - 3% - CP 04	5,88%	
Cinzas - 5% - CP 01	6,52%	6,31%
Cinzas - 5% - CP 02	6,38%	
Cinzas - 5% - CP 03	6,27%	
Cinzas - 5% - CP 04	6,05%	
Cinzas - 7% - CP 01	7,72%	7,56%
Cinzas - 7% - CP 02	7,52%	
Cinzas - 7% - CP 03	7,47%	
Cinzas - 7% - CP 04	7,52%	

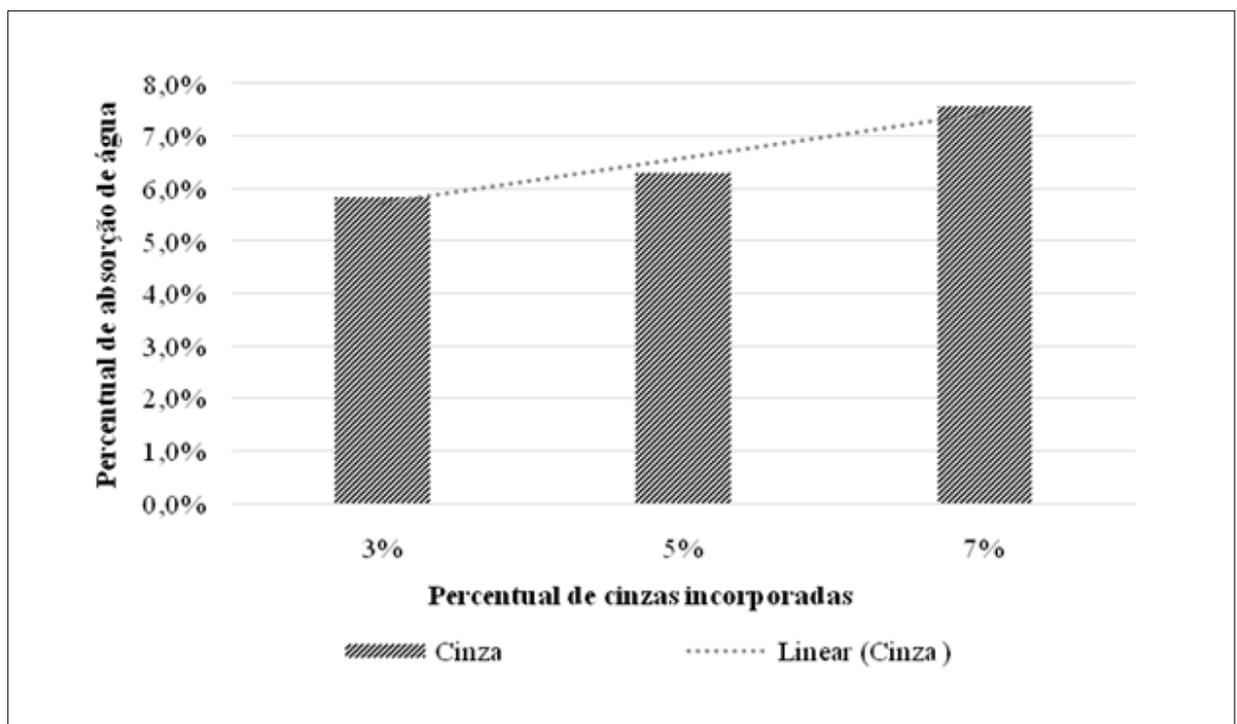
Figura 5 ▼

Absorção de água e curva de tendência.

Fonte: dados da pesquisa

A Tabela 6 demonstra a variação de absorção nos traços que utilizaram as cinzas produzidas por combustão: 5,85% para a substituição de 3% do cimento pelas cinzas; 6,31% para a substituição de 5%; e 7,56% para a substituição de 7%, ficando abaixo do valor do traço de referência, que foi de 7,78%.

O gráfico da Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água.



A Figura 5 demonstra que existiu um aumento na absorção de água dos corpos de provas, diretamente associado ao acréscimo do percentual de substituição do cimento por cinzas no concreto. A variação de absorção nos traços que utilizaram as cinzas foi de 5,85% a 7,56%, sendo esses valores similares aos encontrados no estudo de Bonato (2014), cuja variação foi de 5,85% a 6,53%.

4.2.3 Resistência mecânica à compressão

Após os 28 dias de moldagem, os corpos de provas foram rompidos na prensa elétrica. Na Tabela 7, são apresentados os valores da resistência mecânica à compressão e suas respectivas médias em MPa para cada traço proposto.

Tabela 7 ▶
Resistência à
compressão dos CPs.
Fonte: dados da pesquisa

Tratamentos	Resistência à compressão	Resistência média (Mpa)
Traço de referência	20,13	20,75
	21,70	
	21,15	
	20,03	
3% de cinzas	23,06	23,28
	23,18	
	23,79	
	23,10	
5% de cinzas	19,03	19,47
	20,50	
	18,81	
	19,54	
7% de cinzas	13,29	13,44
	14,04	
	12,74	

A partir da Tabela 7, pode-se verificar que a resistência característica (F_{ck}) para o traço de referência proposto foi atendida, alcançando o valor médio de 20,75 MPa.

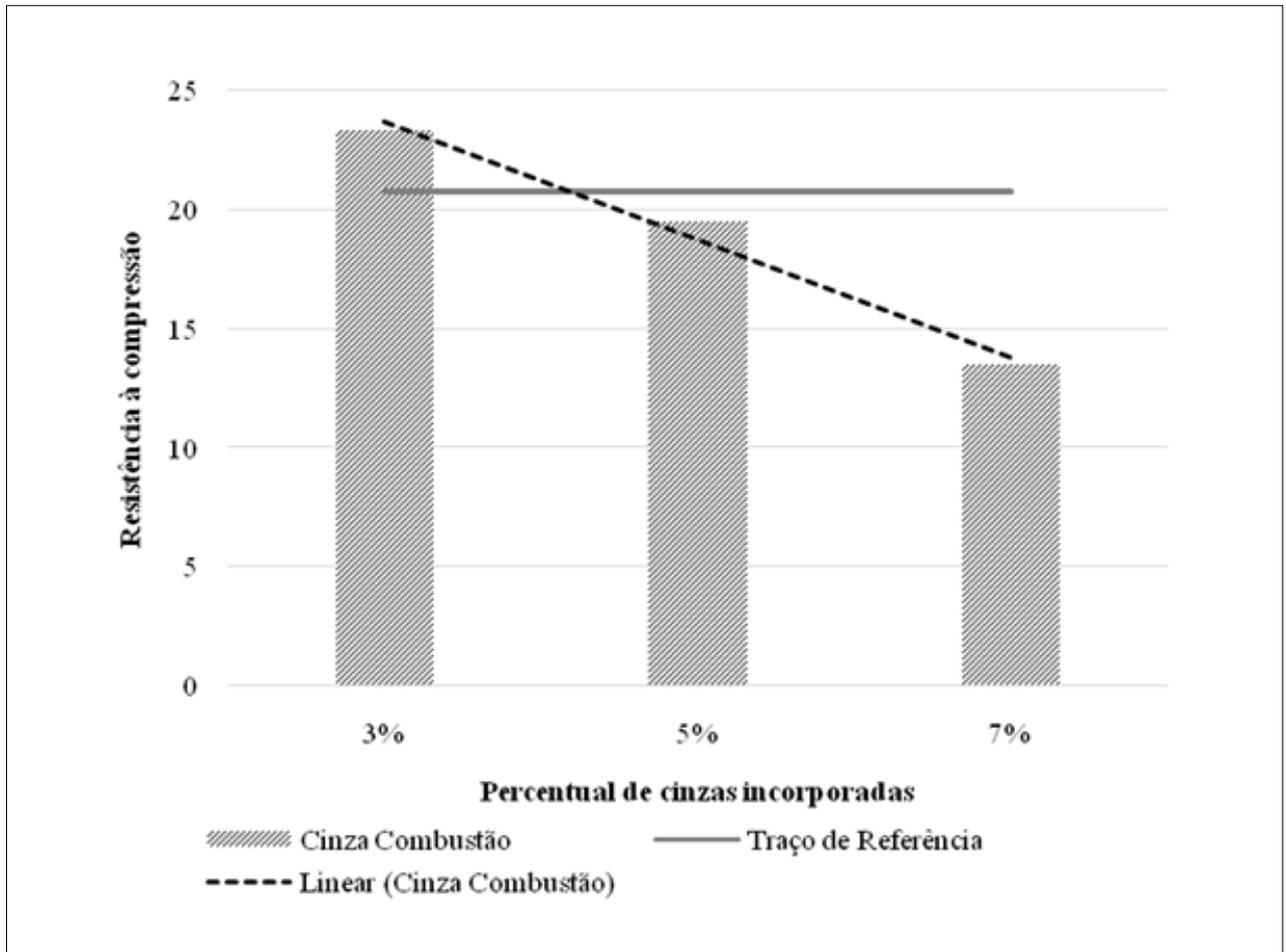
As cinzas produzidas com substituição de 3% obtiveram resistência média superior ao valor de referência em 12,19%, ficando a resistência em 23,28 MPa. Já no percentual de substituição de 5%, obteve-se perda de resistência de 6,17% em relação ao traço de referência. Na substituição de 7% de cimento por cinzas, obteve-se resistência média de 13,44 MPa, o que representa perda de 35,23% em relação ao valor de referência.

Para os valores de substituição de 3% e 5%, percebe-se semelhança com os resultados obtidos por Bonato (2014), já que houve melhoria de resistência na substituição de 3% de cimento por cinzas, apesar de o F_{ck} e a idade dos concretos serem diferentes nos estudos, e houve redução da resistência na substituição de 5% de cimento pelas cinzas.

Figura 6 ▼
Resistência à compressão dos corpos de prova e curva de tendência.
Fonte: dados da pesquisa

Segundo Bonato (2014), os concretos produzidos com 3% de cinzas em substituição ao cimento propiciaram menor consumo de cimento, o que representa redução na emissão de 11,2 kg de CO₂/m³ de concreto produzido.

O gráfico da Figura 6 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão.



A Figura 6 apresenta as informações de resistência mecânica à compressão de forma resumida, verificando-se a tendência de diminuição da resistência dos corpos de provas associada ao aumento da substituição do cimento por cinzas no concreto.

5 Considerações finais

Quanto à consistência do concreto no estado fresco, verificou-se que a substituição do cimento por cinzas alterou a trabalhabilidade da mistura, deixando o concreto mais seco quanto maior o percentual de substituição.

Em relação à composição das cinzas, os compostos identificados em maior abundância foram KCl, SiO₂ e Ca₂(SiO₄), e os compostos menos abundantes foram Al(PO₃)₃, K₂S e Fe₃O₄. Além disso, foi registrado que a absorção de água por imersão crescia quanto maior o percentual de cinzas incorporadas, variando de 5,85% a 7,56% de absorção para as substituições de cinzas.

Quanto à resistência à compressão, os melhores resultados de resistência foram obtidos quando houve substituição de 3% de cimento por cinzas, com aumento de 12,19% em relação à resistência do traço de referência.

Portanto, em relação à aplicação das cinzas da casca do coco como adição mineral, verificaram-se potencialidades, tanto nos aspectos relacionados à absorção de água quanto nos aspectos relacionados à resistência à compressão, em percentuais abaixo de 5% de substituição do cimento pelas cinzas.

Sendo o cimento o insumo mais caro do concreto e o maior gerador de impactos ambientais relacionados à sua produção, verificar a viabilidade de substituição parcial do cimento pelo coproduto cinzas, que está sendo desperdiçado nos terrenos dos sítios produtores de coco no litoral sul alagoano, caracterizou-se em importante contribuição para o desenvolvimento de novas pesquisas sobre a temática.

Sugere-se aprofundar os estudos de substituição parcial do cimento pelas cinzas, para melhor entendimento das características e dos efeitos dessa aplicação que favoreceram e melhoraram a resistência à compressão em percentuais abaixo de 5%. Recomenda-se, também, que seja estudada a substituição parcial do agregado miúdo pelas cinzas, visando verificar os efeitos resultantes dela.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

AGUNSOYE, J. O.; ISAAC, T. S.; SAMUEL, S. O. Study of mechanical behaviour of coconut shell reinforced polymer matrix composite. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v. 11, n. 8, p. 774-779, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2012.118065>.

ALMEIDA, R. R. P.; SILVA, M. A.; SILVA, A. C. G.; FORMIGA, W. A.; CRISPIM, D. L.; MEDEIROS, A. P.; CAJÁ, D. F.; PAIVA, A. C. C.; SILVA, F. T. Identificação e análise dos impactos ambientais gerados na indústria da construção civil. **Informativo Técnico do Semiárido (INTESA)**, v. 9, n. 1, p. 39-46, jan.-jun. 2015. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/INTESA/article/view/3215>. Acesso em: 4 jun. 2022.

ASASUTJARIT, C.; HIRUNLABH, J.; KHEDARI, J.; CHAROENVAI, S.; ZEGHMATI, B.; SHIN, U. C. Development of coconut coir-based lightweight cement board. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 277-288, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.028>.

BONATO, M. M. **Desempenho mecânico e ambiental de concretos e argamassas de cimento Portland com substâncias minerais, orgânicas e fotocatalíticas**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/37243>. Acesso em: 4 jun. 2022.

BRAINER, M. S. C. P.; XIMENES, L. F. Produção de coco: soerguimento das áreas tradicionais do Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**, ano 5, n. 127, 2020. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/387>. Acesso em: 4 jun. 2022.

CABRAL, M. M. S.; ABUD, A. K. S.; ROCHA, M. S. R. S.; ALMEIDA, R. M. R. G.; GOMES, M. A. Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos. **ENGEVISTA**, v. 19, n. 1, p. 99-108, 2017. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v19i1.802>.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Carlos, v. 55, p. 18-32, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>.

CAVALCANTE, L. V. A modernização da produção brasileira de coco e a racionalidade do capital. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 11, n. 3, p. 235-254, dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5216/ag.v11i3.41071>.

CENTURIONE, S. L. **A mineralização do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos**. 1999. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de

Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/T.44.1999.tde-19112015-085440>.

CORRADINI, E.; ROSA, M. F.; MACEDO, B. P.; PALADIN, P. D.; MATTOSO, L. H. C. Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 837-846, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000300030>.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 12, p. 345-379.

DAS, G.; BISWAS, S. Effect of fiber parameters on physical, mechanical and water absorption behaviour of coir fiber-epoxy composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 35, n. 8, p. 1-10, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F0731684415626594>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo à economia circular: o racional de negócio para acelerar a transição**. 2015. Disponível em: https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-à-economia-circular_SumarioExecutivo.pdf. Acesso em: 4 jun. 2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Uma economia circular no Brasil: uma abordagem exploratória inicial**. 2017. Disponível em: https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf. Acesso em: 4 jun. 2022.

GUIMARÃES, C. C.; MATOS, S. R. C. Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento Portland em argamassas. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, p. 251-269, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.v13i1.41675>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Coruripe: Produção agrícola - 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <http://cod.ibge.gov.br/1JIN2>. Acesso em: 04 jun. 2022.

KANNING, R. C. **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/30448>. Acesso: 13 jun. 2022.

LERTWATTANARUK, P.; SUNTIJITTO, A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 664-669, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.154>.

LUZ, B. (org.). **Economia circular Holanda-Brasil: da teoria à prática**. 1. ed. Rio de Janeiro: Exchange 4 Change Brasil, 2017. Disponível em: https://e4cb.com.br/wp-content/uploads/2021/06/Livro-EC-Holanda-Brasil_E4CB_May-2017.pdf. Acesso em: 4 jun. 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2014.

MOURA, A. S. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas e térmicas entre compósitos de PHB reforçados com casca de arroz ou fibra de coco**. 2014. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais) – Faculdade UnB Gama/Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/16139>. Acesso em: 16 jun. 2022.

MUNARO, M. R.; TAVARES, S. F. Analysis of Brazilian public policies related to the implementation of circular economy in civil construction. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 2, p. 129-142, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000200597>.

NUNES, L. A. **Diagnóstico do desperdício, possibilidades de aplicação e demanda futura das cascas do coco verde, com avaliação da incerteza das informações**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/34380>. Acesso em: 4 jun. 2022.

OLIVEIRA, E. A. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. 2011. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. DOI: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.18799>.

OLIVEIRA, F. R.; FRANÇA, S. L. B.; RANGEL, L. A. D. Princípios de economia circular para o desenvolvimento de produtos em arranjos produtivos locais. **Interações**, Campo Grande, v. 20, n. 4, p. 1179-1193, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20435/inter.v20i4.1921>.

PADILLA, E. R. D. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: caracterização físico-química e produção de carvão para energia**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9535>. Acesso em: 4 jun. 2022.

PADILLA, E. R. D.; BELINI, G. B.; NAKASHIMA, G. T.; WALDMAN, W. R.; YAMAJI, F. M. Potencial energético da casca de coco (*Cocos nucifera* L.) para uso na produção de carvão vegetal por pirólise. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 2, p. 334-345, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180026>.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300019>.

PEREIRA, A. M.; SILVA, C. A. R.; QUEIROZ, D. C. A.; MORAES, M. J. B.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 227-238, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150001.0023>.

PRUSTY, J. K.; PATRO, S. K. Properties of fresh and hardened concrete using agro-waste as partial replacement of coarse aggregate: a review. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 101-113, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.063>.

RODRIGUES, P. P. M. Parâmetros da dosagem racional do concreto. *In: REUNIÃO DE TÉCNICOS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO*, 34., 1998, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABCP, 1998. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/Parametros-dosagem_34aRTIC1983.pdf. Acesso em: 4 jun. 2022.

ROYER, B.; ASSUNÇÃO, R. M. N.; RODRIGUES FILHO, G.; MOTTA, L. A. C. Efeito da aplicação do poliestireno sulfonado (PSSNa) como aditivo em argamassas e concretos de cimento Portland CPV32. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. 63-67, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282005000100014>.

SCHWAAB, S. **Efeito da adição de aditivo plastificante retardador de pega nas propriedades de concretos usinados de cimento Portland usando planejamento fatorial**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2015.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2019**. São Paulo: SNIC, 2019. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf. Acesso em: 4 jun. 2022.

SOUZA, M. E. S.; SILVA, J. R. A.; SANTOS, C. C. L.; SILVA, H. C.; LIMA, P. S. E. Obtenção de celulose a partir do aproveitamento de resíduos de coco (*Cocos nucifera Linnaeus*, 1753) para a produção de papel. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 60, n. 1, p. 1-20, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5876>.