



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

IAN LIWIS NASCIMENTO SILVA

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS DO RESÍDUO DO
CAFÉ PARA ADIÇÃO EM CONCRETO**

**FORTALEZA
2022**

IAN LIWIS NASCIMENTO SILVA

AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS DO RESÍDUO DO
CAFÉ PARA ADIÇÃO EM CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário Christus, como requisito
parcial para a obtenção do título de bacharel
em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Elayne Valério
Carvalho.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N244a Nascimento Silva, Ian Liwis.
AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS DO
RESÍDUO DO CAFÉ PARA ADIÇÃO EM CONCRETO / Ian Liwis
Nascimento Silva. - 2022.
46 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,
Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Elayne Valério de Carvalho.

1. Cinzas. 2. Adição mineral. 3. Atividade pozolânica. 4.
Indústria de café. 5. Resíduos agrícolas. I. Título.

CDD 624

IAN LIWIS NASCIMENTO SILVA

AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS DO RESÍDUO DO
CAFÉ PARA ADIÇÃO EM CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário Christus, como requisito
parcial para a obtenção do título de bacharel
em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Elayne Valério
Carvalho.

Aprovada em: ___/___/___/

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Elayne Valério Carvalho
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Ma. Mariana de Araújo Leite
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

RESUMO

Diante dos impactos ambientais causados pela indústria da construção civil ao longo de toda a sua cadeia produtiva, tem-se investigado o reaproveitamento de resíduos sólidos diversos, incorporando-os de alguma forma em materiais de construção. Estudos relatam o beneficiamento desses resíduos com o objetivo de produzir adições para argamassas ou concretos, aumentando a durabilidade dos elementos construtivos. Contudo, a incorporação desses resíduos deve, além de conferir uma alternativa construtiva sustentável, não alterar a durabilidade e as propriedades mecânicas dos materiais nos quais são introduzidos. Portanto, este estudo tem como objetivo produzir e avaliar a atividade pozolânica das cinzas de resíduo da indústria do café (CRC), produzida sob condições de queima controlada em laboratório. Para isso, calcinou-se o resíduo coletado em galpões de uma indústria local de café. Além disso, realizou-se a caracterização físico-química e o teste de Índice de Atividade Pozolânica (IAP). Os resultados indicaram que as CRC foram convertidas em óxidos, o que confirma a eliminação da matéria orgânica, prejudicial à pasta cimentícia. Confirmou-se a formação de silicatos e aluminatos, contudo a presença de óxidos de potássio pode conferir propriedades indesejadas ao produto. Além disso, a CRC apresentou alta capacidade de fixar CaO, um indicador de atividade pozolânica. Conclui-se, assim, que o material avaliado tem características que o classificam como promissora adição mineral para aplicação em concreto, mas que as condições de queima devem ser ajustadas para que atenda a todos os requisitos estabelecidos pela norma.

Palavras-chave: Cinzas. Adição mineral. Atividade pozolânica. Indústria de café. Resíduos agrícolas.

ABSTRACT

In light of the environmental impacts caused by the construction industry throughout its production chain, the reuse of various solid waste has been investigated, incorporating them in some way into construction materials. Studies report the improvement of these residues with the objective of producing additions for mortars or concrete, increasing the durability of the constructive elements. However, the incorporation of these residues must, in addition to providing a sustainable constructive alternative, not alter the durability and mechanical properties of the materials in which they are introduced. Therefore, this study aims to produce and evaluate the pozzolanic activity of coffee industry residue ash (CRC), produced under controlled burning conditions in the laboratory. For this, the residue collected in sheds of a local coffee industry was calcined. In addition, the physicochemical characterization and the Pozzolanic Activity Index (PIA) test were performed. The results indicated that the CRC were converted into oxides, which confirms the elimination of organic matter, which is harmful to the cement paste. The formation of silicates and aluminates was confirmed, however the presence of potassium oxides can confer undesired properties to the product. In addition, CRC showed a high capacity to fix CaO, an indicator of pozzolanic activity. It is concluded, therefore, that the material evaluated has characteristics that classify it as a promising mineral addition for application in concrete, but that the firing conditions must be adjusted so that it meets all the requirements established in the standard.

Keywords: Ashes. Mineral addition. Pozzolanic activity. Coffee industry. Agricultural waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esforços na seção transversal de um elemento de concreto armado.....	12
Figura 2 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de Cimento Portland	16
Figura 3 – Esquema representativo da capilaridade	23
Figura 9 – Fluxograma das etapas deste estudo	25
Figura 10 - Local de armazenamento do resíduo nas instalações da empresa 3Corações®.....	26
Figura 11 – Etapas relacionada à (A) lavagem do resíduo com água corrente, utilizando uma peneira, seguida da (B) secagem em estufa. O processo de lavagem e secagem resultou em um material compactado (C e D).....	27
Figura 12 – Calcinação em estufa do material compactado	28
Figura 13 – Moinho de bolas planetário utilizado para moer o resíduo por meio do impacto de alta energia das bolas de moagem em tigelas rotativas.....	28
Figura 14 - Etapas para determinação da reatividade pozolânica da CRC: aquecimento sob agitação da solução contendo CRC e CaO (A); e titulação com HCl para indicar a alcalinidade remanescente.	30
Figura 15 – Espectro de absorção na região do infravermelho	32
Figura 16 - Curva termogravimétrica da CRC	33
Figura 17 – Micrografias do resíduo de café antes (A) e após (B) o processo de queima em forno mufla.....	34
Figura 18 – EDS do resíduo de café antes do processo de queima em mufla	35
Figura 19 – EDS do resíduo de café após do processo de queima em mufla	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais constituintes do Cimento Portland.....	14
Quadro 2 – Classes de agressividade ambiental (CAA).....	19

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivos	9
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Concreto armado	11
2.1.1 Componentes do concreto	12
2.1.1.1 Cimento Portland	13
2.1.1.1.1 Cimento Portland comum e composto	14
2.1.1.1.2 Cimento Portland de alto-forno e pozolânico	15
2.1.1.1.3 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	15
2.1.1.1.4 Cimento resistente a sulfatos	16
2.1.2 Material pozolânico	17
2.1.3 Durabilidade de estruturas de concreto armado	18
2.2 Patologias do concreto armado	20
2.2.1 Fatores químicos e físicos de degradação do concreto	21
2.2.1.1 Fatores físicos	21
2.2.1.1.1 Permeabilidade	21
2.2.1.1.2 Capilaridade	22
2.2.1.2 Fatores químicos	23
2.3 A indústria do café e a contribuição com a geração de resíduos no Brasil	23
3 PARTE EXPERIMENTAL	25
3.1 Produção de cinzas do resíduo da indústria do café	26
3.2 Caracterização das cinzas do resíduo de café	29
3.2.1 Determinação do IAP das CRC	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Estruturas são projetadas estimando-se que o seu desempenho atenda à vida útil aproximada, prevista em projeto, de modo a oferecer segurança a seus usuários. Para isso, considera-se que a degradação das estruturas ocorre de forma natural ao longo do tempo, reduzindo o período de durabilidade das edificações. Nesse sentido, as patologias das estruturas são agentes que aceleram este processo de perda de desempenho e podem pôr em risco a utilização de uma construção (CANDIDO; FIGUEIREDO, 2020). Por isso, a durabilidade do concreto é um tema relevante em termos técnicos, econômicos e de sustentabilidade.

A durabilidade está ligada diretamente ao desempenho dos materiais ao longo do tempo e à capacidade de eles resistirem ao ambiente no qual estão inseridos. Diante disso, é muito importante compreender as diversas condições que podem diminuir a longevidade dos materiais utilizados (BEUSHAUSEN; ALEXANDER, 2019).

Geralmente, o concreto é um material de elevada resistência e, quando se executam técnicas construtivas adequadas e em condições certas, as estruturas de concreto podem facilmente durar entre 50 e 100 anos, ou mais (FREITAS, 2021). Ou seja, se a concepção e construção dos elementos forem executadas adequadamente e ele for apropriado para o ambiente em que está inserido, sua vida útil pode ser prolongada.

O concreto de Cimento Portland tem uma microestrutura altamente complexa e heterogênea (SIQUEIRA, 2021). A elevada porosidade da pasta cimentícia reduz significativamente a resistência do concreto, devido à permeabilidade facilitada de agentes agressivos através dos poros. Assim, a baixa durabilidade (HILAL, 2014) e a diminuição da resistência de estruturas de concreto se deve principalmente pela difusão, que ocorre em longo prazo, de substâncias ambientais, como aerossol, dióxido de carbono (CO_2) e íons cloretos (Cl^-) e sulfatos (SO_4^{2-}) (QIU, 2020). Há, portanto, a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias, processos construtivos e materiais de construções alternativos capazes de reduzir a permeabilidade de estruturas de concreto.

Diante dessa necessidade, a comunidade científica vem dando ênfase ao uso do material pozolânico, pois conferem propriedades relacionadas à durabilidade ao concreto. Quando um material pozolânico é adicionado ao cimento, ocorre o

preenchimento de espaços vazios remanescentes das reações de hidratação, conferindo maior resistência à pasta. O aumento da durabilidade é consequência da formação de silicato de cálcio hidratado como produto da reação com a pasta cimentícia. Esse constituinte é o maior responsável pela resistência do cimento, por minimizar a quantidade de poros (MEHTA; MONTEIRO, 2008) e diminuir a permeabilidade do concreto.

A maioria desses materiais são derivados de resíduos da indústria e da agroindústria. Alguns exemplos práticos são adições de sílica ativa, de cinza volante, de cinza da casa de arroz e de cinza da folha de bambu (DUARTE, 2022). Ainda, a substituição parcial do cimento pelos rejeitos da agroindústria confere uma alternativa sustentável à cadeia produtiva da construção civil, pois quando esses resíduos são descartados de maneira inadequada, danos ambientais acabam sendo agravados, provocando problemas relacionadas à poluição do solo e do ar (MORAES, 2019).

Um dos resíduos da agroindústria que vem sendo prejudicial ao meio ambiente é o oriundo da cafeicultura, mais especificamente das cascas do café. Diante disso, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de avaliar o desempenho do uso das cascas do café, em forma de cinzas, na construção civil. Oliveira e Souza (2017) utilizaram as cinzas para adição em bloquetes, concluindo que não houve acréscimos em sua resistência, porém os corpos de prova que receberam material foram acrescidos de atividade pozolânica.

Portanto, este trabalho tem como propósito avaliar a atividade pozolânica da cinza da casca do café. Para isso, realizou-se a caracterização físico-química para determinar a composição e características físicas das cinzas do resíduo de café. Em seguida, mediu-se o índice de atividade pozolânica o índice de atividade pozolânica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Caracterizar e avaliar a atividade pozolânica das cinzas de resíduo da indústria do café, produzida sob condições de queima controlada em laboratório.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Promover a queima do resíduo avaliado em condições controladas em laboratório.;
- Analisar, quimicamente, a composição das cinzas do resíduo de café para avaliar seu potencial pozolânico.;
- Determinar o índice de atividade pozolânica por meio do método Chapelle.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A degradação do concreto está diretamente relacionada à composição, a fatores externos e à penetração de agentes químicos agressivos na estrutura do material (SILVA, 2017). Por isso, é importante apresentar a fundamentação teórica a respeito de cada um desses fatores.

2.1 Concreto armado

A construção de habitações durante o período neolítico apresentou técnicas e materiais inusitados, tanto na forma de utilização como nas combinações de materiais que surgiram na época, como o uso da argila com resíduos de vegetais (NAVARRO, 2006). Nesse sentido, um material que os antigos utilizavam em larga escala era a pedra, que foi utilizada durante anos para fins construtivos e, por muito tempo, atendeu fielmente às necessidades populacionais da época.

A pedra é ótimo material de construção, pois é durável e resiste bem a esforços de compressão. Contudo, quando a pedra era usada como viga para vencer vãos de médio porte, esse elemento construtivo era sujeito a forças de tração e se rompia. Quando o homem passou a usar o concreto, a limitação era a mesma. As vigas de eixo reto eram limitadas no seu vão pelo esforço de tração máximo que podia suportar, tração essa que surgia no trecho inferior da viga (BOTELHO, 2018).

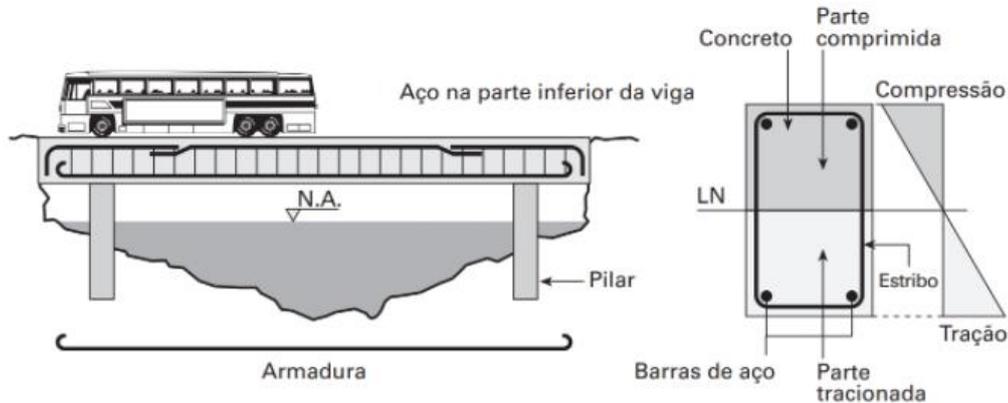
Aos poucos, as exigências construtivas aumentaram e, conseqüentemente, os padrões requeridos. As construções passaram a demandar materiais de maior resistência, maior durabilidade e melhor aparência do que aqueles até então empregados. O concreto armado, por sua vez, atende apropriadamente a essas exigências (BAUER, 2007).

Clímaco (2008) afirma que o uso do concreto é crescente, desde os seus primórdios. Porém, sua baixa resistência à tração acarretou a necessidade de encontrar uma solução para essa deficiência. Diante disso, desenvolveu-se o concreto armado, que associou a pedra artificial a um componente estrutural, a armadura metálica, que aumentava satisfatoriamente a resistência à tração.

Desde então, o concreto armado é muito utilizado na construção civil, pois a combinação dos seus dois componentes, o concreto e o aço, garante a resistência dos elementos estruturais, tanto à compressão quanto à tração (PARIZOTTO, 2017).

Barras de aço são posicionadas na área da seção tracionada e, assim, o concreto fica responsável por resistir aos esforços compressivos, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Esforços na seção transversal de um elemento de concreto armado



Fonte: BOTELHO (2018).

Essa resposta combinada fez com que o concreto armado fosse utilizado desde o século XIX e, que por determinado tempo, foi considerado como um material eterno (NASCIMENTO, 2015). Hoje, o concreto armado ainda é considerado o mais durável e sustentável material estrutural da atualidade de acordo com a Declaração Ambiental de Produto (EPD).

Contudo, apesar de apresentar uma associação inteligente entre diferentes materiais, o concreto armado está sujeito à deterioração. Consequência da ação de diferentes mecanismos de degradação, levam ao desgaste do material, como a corrosão (FÉLIX, 2018).

Para que seja possível que o aço, no interior dos elementos de concreto armado, resista devidamente às solicitações de tração a que for submetido, é de extrema importância que a qualidade do material seja preservada, tanto em relação à composição, quanto em relação à dimensão da área da seção transversal das barras de aço.

2.1.1 Componentes do concreto

Os principais componentes utilizados na produção do concreto convencional são: cimento Portland, água e agregados, gráudo e miúdo (LEITE, 2018).

O cimento é o principal componente do concreto. De acordo com Neville (2019), os principais componentes do cimento são: silicato tricálcico, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S); silicato dicálcico, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S); aluminato tricálcico, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A); e o ferro aluminato tetracálcio, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF).

A composição do concreto, por sua vez, resulta em uma microestrutura heterogênea composta por três fases: a pasta de cimento; o agregado, gráudo e miúdo; e a zona de transição, que é considerada existir em torno de todos os agregados (WU *et al.*, 2020).

2.1.1.1 Cimento Portland

De acordo com Goto *et al.* (2018), o Cimento Portland utilizado atualmente, foi criado pelo construtor Joseph Aspdin. Tal criação desencadeou uma verdadeira revolução na construção, apresentando propriedades inéditas de trabalhabilidade, endurecimento e altas resistências.

Em 1824, o construtor inglês queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as em um pó fino. Percebeu, então, que se obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de Cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (BATTAGIN, 2009).

A utilização do cimento pode ser considerada como uma espécie de “marca” da civilização atual, pois desde o início do século XX tem sido a solução econômica e em grande escala tanto para o problema de moradia e assentamentos humanos, como para a construção de grandes obras da engenharia moderna (MAURY, 2012).

No Brasil, a indústria do cimento tem papel de destaque no desenvolvimento econômico e social: é responsável pela geração de empregos, aquecimento da economia, desenvolvimento de novos produtos e processos, melhoria da qualidade de vida, distribuição de renda, desenvolvimento de diferentes regiões, entres outros (PAIVA, 2019).

O Cimento Portland pode ser definido como um aglomerante hidráulico produzido a partir da moagem do clínquer, composto essencialmente por silicatos de cálcio e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio (CaSO_4), como na forma de gipsita. O clínquer, por sua vez, é obtido a partir da sinterização a altas temperaturas de uma mistura de calcário e argila. Embora o Cimento Portland seja formado essencialmente por vários compostos de cálcio, os resultados das análises químicas de rotina são apresentados em termos de óxidos dos elementos identificados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2014), dentre os compostos do Cimento Portland, seus principais constituintes são os representados no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais constituintes do Cimento Portland

Constituinte	Porcentagem
Silicatos tricálcicos (C_3S)	Entre 42 e 60%
Silicatos dicálcicos (C_2S)	Entre 16 e 35%
Aluminatos tricálcicos (C_2A)	Entre 6 e 13 %
Ferroaluminatos tetracálcicos (C_4AF)	Entre 5 e 10%

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Os autores ainda classificam como secundários os óxidos CaO , CaSO_4 , MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , e algumas impurezas, como K_2O e Na_2O , que normalmente constituem o menor percentual relativo ao cimento.

Pode-se dizer que o cimento é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos e das argamassas no produto final desejado (uma laje, uma viga, um revestimento etc.). Portanto, é de fundamental importância utilizá-lo corretamente. Para isto, é preciso conhecer bem suas características e propriedades, para poder aproveitá-las da melhor forma possível na aplicação que se tem em vista (ABCP, 2002).

2.1.1.1.1 Cimento Portland comum e composto

O primeiro Cimento Portland lançado no mercado brasileiro foi o conhecido CP, correspondendo atualmente ao CP I, um tipo de Cimento Portland comum sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da pega). Ele acabou

sendo considerado na maioria das aplicações usuais como termo de referência para comparação com as características e propriedades dos tipos de cimento posteriormente produzidos (ABCP, 2002).

A única especificação feita é de que ele seja constituído por 95 – 100% de clínquer Portland e 0 – 5% de constituintes secundários, que podem ter características cimentantes ou filler para melhorar a trabalhabilidade ou retenção de água. Outras exigências são que a relação entre CaO e SiO₂ não deve ser menor que 2,0 e que o teor de MgO seja limitado a 5% (NEVILLE, 2013).

Ainda de acordo com a ABCP (2002), a exemplo de países tecnologicamente mais avançados, como os da União Europeia, surgiu no mercado brasileiro em 1991 um novo tipo de cimento, o Cimento Portland composto, cuja composição é intermediária entre os cimentos Portland comuns e os cimentos Portland com adições (alto-forno e pozolânico).

2.1.1.1.2 Cimento Portland de alto-forno e pozolânico

O consumo apreciável de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou mundialmente a busca, pelo setor, de medidas para diminuição do consumo energético. Uma das alternativas de sucesso foi o uso de escórias granuladas de alto-forno e materiais pozolânicos na composição dos chamados cimentos portland de alto-forno e pozolânicos, respectivamente (ABCP, 2020).

2.1.1.1.3 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

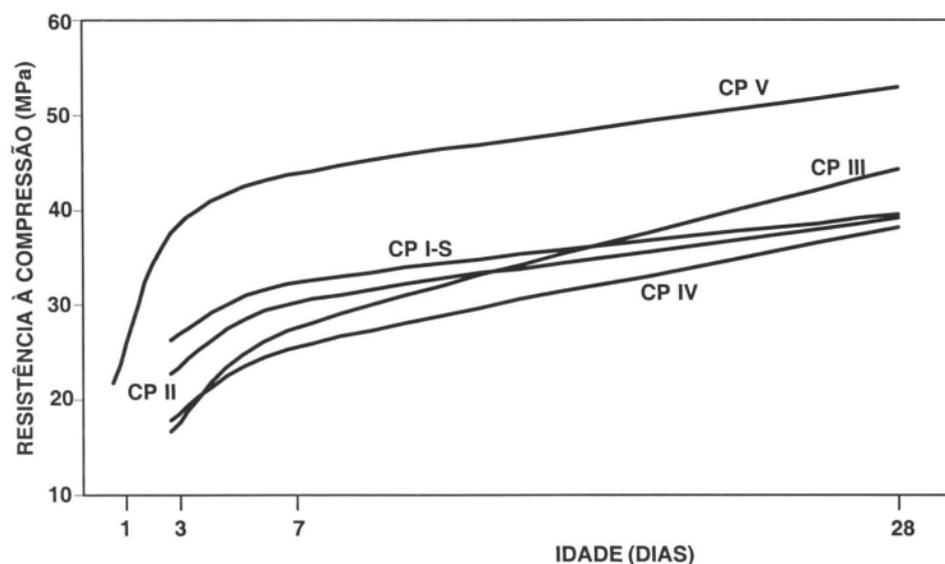
O Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), tem a peculiaridade de atingir altas resistências nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade (ABCP, 2002).

Este tipo de cimento tem aplicação importante em concretos especiais, como o concreto de alta resistência inicial. Como explica Schmidt (2017), esse tipo de concreto é de grande valia para indústrias de estruturas ou peças pré-moldadas, em

estruturas convencionais ou protendidas, na fabricação de tubos e artefatos de concreto, pois além de chegarem a níveis mais elevados de resistência quando comparado ao concreto convencional, geram maior produtividade, devido a sua capacidade de cura rápida, levando em média de 3 a 7 dias, e redução de custos de produção.

Os tipos de cimento interferem diretamente em propriedades do concreto, tanto fresco quanto endurecido. A Figura 2 ilustra o comportamento da resistência do concreto ao longo do tempo para os diferentes tipos de cimento.

Figura 2 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de Cimento Portland



Fonte: ABCP (2002).

2.1.1.1.4 Cimento resistente a sulfatos

Este cimento tem baixo teor de C_3A de maneira a evitar o ataque por sulfatos externos ao concreto. Caso contrário, a formação de sulfoaluminato de cálcio e gipsita pode causar a desagregação do concreto devido ao maior volume dos compostos resultantes. Os sais mais ativos são os sulfatos de magnésio e sódio, sendo que o ataque por sulfatos é bastante acelerado quando acompanhado por ciclos de molhagem-secagem, por exemplo, em estruturas marinhas sujeitas a marés ou respingos (NEVILLE, 2013).

Para alcançar a resistência a sulfatos, o teor de C_3A nos cimentos resistentes a sulfatos é limitado a 3,5%, e o teor de SO_3 é limitado a 2,5%. No restante,

deve atender às especificações do cimento Portland comum. Nos Estados Unidos, quando o limite de expansão por sulfatos não for especificado, o teor de C_3A é limitado a 5% e o teor total de C_4AF somado ao dobro do teor de C_3A é limitado a 25%. O teor de sulfato de cálcio também é limitado a 2,3% quando o teor de C_3A for 8% ou menor (NEVILLE, 2013).

2.1.2 Material pozolânico

A adição de minerais na matriz cimentícia se tornou algo cada vez mais comum nos produtos nacionais, fundamentalmente por apresentarem diversos benefícios em relação à durabilidade das estruturas (CALADO, 2018).

O crescente aumento de estruturas com manifestações patológicas precoce, impõe a necessidade de melhorar o planejamento desde os projetos, passando pela fiscalização, execução até a manutenção, pois o alto custo de reparo/recuperação e os transtornos causados influenciam na durabilidade (AGRA; LOBO; MONTEIRO, 2017).

As pozolanas são produtos que possuem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, presente no cimento, formando compostos hidratados, estáveis e resistentes. Esse material é resultado do resfriamento brusco de lavas ou cinzas vulcânicas, fazendo com que a sílica presente não tenha tempo de cristalizar-se, permanecendo amorfa e, assim, reativa na presença do hidróxido de cálcio do cimento (RIBEIRO, 2015).

Ainda segundo Ribeiro (2015) é possível citar como influência das pozolanas nas propriedades do cimento:

- Maior resistência ao ataque por sulfatos;
- Menor tendência à segregação para uma mesma consistência.
- Menor calor de hidratação;
- Menor resistência mecânica inicial a pequenas idades, porém, maior resistência em idades avançadas;
- Menor tendência à lixiviação da cal por águas puras e ácidas;
- Prevenção contra a expansão devida à reação álcalis-agregado;
- Maior retração por secagem.

2.1.3 Durabilidade de estruturas de concreto armado

A NBR 6.118 (ABNT, 2014) define durabilidade como sendo capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Ainda de acordo com a NBR 6.118 (ABNT, 2014), vida útil é definida como:

Entende-se o período durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais (ABNT, 2014).

Portanto, a durabilidade do concreto é verificada a partir da sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão e outras condições de serviço (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Apesar do concreto ser um dos materiais mais utilizados na construção civil, no passado, a preocupação com sua durabilidade era deixada em um segundo plano, pois acreditava-se ser um material com vida útil ilimitada (LEITE, 2018).

Diante disso, as edificações, que são concebidas para durar muitos anos, devido à falta de manutenção, aumento da demanda populacional ou mudanças nas características urbanas onde estão inseridas, sua vida útil muitas vezes é reduzida (KRUGER, 2017).

Portanto, como grande parte das estruturas estão sujeitas à agressividade ambiental, um concreto durável tem de apresentar a capacidade de suportar intempéries, ataques químicos, abrasão, e outros mecanismos de degradação durante a vida útil projetada (LIU *et al.*, 2020).

Uma estrutura possui uma boa durabilidade quando consegue manter seu desempenho pelo tempo de vida útil projetado, sob a ação de fatores de degradação, sejam eles físicos como fissuração causada pela cristalização de sais nos poros, abrasão, exposição a temperaturas extremas, ação de intempéries; ou químicos como a lixiviação da pasta de cimento devido a soluções ácidas, reação álcali-agregado, ataque por sulfato e corrosão das armaduras. É importante salientar que nenhum material é indefinidamente durável, visto que as interações com o meio ambiente, as

propriedades dos constituintes e a microestrutura se modificam com o passar do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para que o concreto tenha a durabilidade estabelecida por norma é preciso estar atento a alguns pontos importantes relacionados principalmente ao período de concretagem. Uma das características que ajudam a aumentar a durabilidade do concreto é a qualidade e homogeneidade do material utilizado na obra, quanto mais uniforme, melhor serão as propriedades, portanto, o ideal para se evitar problemas, é utilizar concreto usinado sempre que possível (CONCRETO USINADO, 2019).

Outro fator importante é o cobrimento das armaduras, a NBR 6.118 (ABNT, 2014) estabelece os valores mínimos de acordo com a classe de agressividade ambiental, isso ajuda a garantir que os agentes agressivos do ar tenham maior dificuldade em penetrar o concreto e atingir a armadura, este é um dos pontos mais importantes em relação a durabilidade, e muitas vezes é negligenciado pelos construtores (CONCRETO USINADO, 2019).

No Quadro 2, verifica-se as classes de agressividade do ambiente, definidas pela NBR 6.118 (ABNT, 2014).

Quadro 2 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequena
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevada
		Respingos de maré	

Fonte: ABNT (2014).

Observa-se que quanto maior o risco de deterioração, maior a agressividade, e, portanto, existem parâmetros a serem estabelecidos de acordo com a norma NBR 6.118 (ABNT, 2014) para cada classe.

2.2 Patologias do concreto armado

De acordo com Costa *et al.* (2020), na construção civil, a manifestação patológica se dá diante dos defeitos ou a falta de atendimento às funções, para as quais uma determinada edificação foi projetada. Ainda de acordo com Costa *et al.* (2020), para cada manifestação patológica, há uma maneira diferente de tratamento; assim como na medicina, em que há procedimentos diferentes para cada tipo de doença.

Apesar desses avanços tecnológicos envolvidos na construção civil, as patologias ainda estarão presentes devido a uma construção não durar para sempre e está sempre precisando de reparos e manutenções. O máximo que se pode fazer é prolongar a vida útil da construção com a periodicidade das manutenções, sabendo identificar de modo geral a partir de laudos fornecidos por profissionais competentes da área (FERREIRA; LOBÃO, 2018).

Atualmente, em função de diversos fatores, o estudo de problemas patológicos na construção civil vem crescendo. Isto se deve ao fato de que, até pouco tempo atrás, pensava-se que as estruturas de concreto durariam indefinidamente (BASTOS; MIRANDA, 2017).

O diagnóstico é o entendimento dos fenômenos, trata-se das múltiplas relações de causa e efeito e entendimento dos principais motivos de ocorrência a partir de dados conhecidos, tentando-se determinar a possível origem do problema por meio do seu efeito (DO CARMO, 2016).

Bastos *et al.* (2017) afirma que grande parte das pontes construídas apresentam problemas patológicos decorrentes da falta de manutenção e de inspeção das construções, afetando as condições de serviço e funcionamento da obra e as condições de segurança estrutural. Já Sampaio (2017) explica que a maioria dessas patologias é oriunda do mau planejamento ou má execução do serviço.

Em sua grande maioria, as patologias têm sido tratadas com descaso pelos construtores, executando reparos superficiais, sem resolver as causas, e com muita preocupação pelos moradores, exigindo grandes reformas e reforços às vezes não justificados (SAMPAIO, 2017).

2.2.1 Fatores químicos e físicos de degradação do concreto

O concreto é um material forte e quimicamente muito inerte, que pode durar por séculos. Entretanto, a relativa imaturidade da construção de concreto como tecnologia tem implicado em boa parte do conjunto de prédios de concreto ter experimentado problemas inesperados com o inadequado desempenho de durabilidade dentro do tempo útil de projeto (DYER, 2015).

Algumas manifestações patológicas são vistas nas construções civis em virtude de não se ter um bom projeto e cuidados na execução. Antes da elaboração do concreto, é importante analisar o ambiente no qual serão construídas as estruturas de concreto e os materiais que comporão o concreto, porque eles podem possuir agentes agressivos que podem comprometer a resistência mecânica e química da estrutura de concreto, ocasionando sua degradação e comprometendo assim sua vida útil (LEITE; GIRARDI, 2018).

Paralelo à afirmativa de Dyer (2015), faz-se importante o conhecimento a respeito das formas de degradação do concreto, dentre as físicas, destaca-se:

2.2.1.1 Fatores físicos

2.2.1.1.1 Permeabilidade

Permeabilidade é a facilidade com a qual líquidos ou gases podem se movimentar através do concreto. Essa propriedade é de interesse para a estanqueidade de estruturas destinadas à contenção de líquidos e para o ataque químico (NEVILLE, 2013).

A permeabilidade, pode ser justificada pela quantidade de poros no concreto. A deterioração do concreto, assim como a corrosão de suas armaduras está ligada a estruturas desses poros. Quando a quantidade de poros é aumentada, a resistência do concreto é reduzida quando submetida a ações químicas e físicas (DA SILVA, 2018). Ou seja, a porosidade do concreto está intimamente relacionada com a durabilidade e desempenho das edificações (ALMEIDA, 2020). Portanto, melhor atenção quando se trata da porosidade do concreto. Matematicamente, a porosidade mede a correlação entre o volume de poros e o total da amostra, sendo uma

propriedade adimensional e expressa em formato decimal ou de porcentagem (MEDEIROS, 2015), conforme descrito pela Equação 1, em que ϕ_t se refere à porosidade total, V_p corresponde ao volume de poros e o V_t é volume total.

$$\phi_t = \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

Visto que a porosidade do concreto é um fator determinante para sua durabilidade, é importante realizar análises mais aprofundadas com o intuito de controlá-la e por consequência reduzir a penetração de agentes prejudiciais às estruturas.

2.2.1.1.2 Capilaridade

A água é um elemento essencial para construção civil em diversas etapas construtivas, mas nem sempre promove só benefícios. Os efeitos da umidade em alvenaria em contato com o solo são de difícil estudo e controle, pois a água que sobe no revestimento, vem da umidade natural do solo. Do ponto de vista físico, considera-se que há três mecanismos fundamentais de fixação de umidade: higroscópica, condensação e capilaridade (SANTANA; ALEIXO, 2017).

O meio mais frequente de agentes agressivos entrarem em contato com o concreto é através dos poros, que possuem como vetor a água através do mecanismo de absorção capilar (HELENE, 1993).

De acordo com Bertolini (2010), quando uma solução aquosa tem contato com a superfície porosa do concreto, em estado não saturado, ocorre uma absorção dessa solução gerada pelo efeito de uma depressão causada por meio da “ação capilar”, que permite a subida do líquido através dos poros do material. Esse processo é demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema representativo da capilaridade



Fonte: Bertolini (2010).

O estudo da infiltração por capilaridade é, portanto, de extrema importância para com a finalidade de prevenir a entrada de substâncias agressivas transportadas pela água para dentro dessas estruturas e pode representar um aumento significativo de durabilidade.

2.2.1.2 Fatores químicos

Além dos fatores físicos, é importante também o conhecimento à cerca dos fatores químicos de degradação do concreto, visando maior durabilidade das estruturas, como exemplo, destaca-se o ataque por sulfatos, um dos principais fatores de degradação química.

O concreto atacado por sulfatos tem uma aparência característica, de cor esbranquiçada, com a deterioração normalmente começando pelas bordas e cantos, seguida por fissuração e lascamento do concreto. A razão para essa aparência é que a essência do ataque por sulfatos é a formação de sulfato de cálcio (gesso) e sulfoaluminato de cálcio (etringita), com ambos os produtos ocupando um volume maior que os compostos que eles substituíram, resultando em expansão e ruptura do concreto endurecido (NEVILLE, 2013).

2.3 A indústria do café e a contribuição com a geração de resíduos no Brasil

O Brasil é considerado o maior produtor de café do mundo, visto que em 2018 foi responsável pela produção de 3.556.638 toneladas de café em grãos (IBGE, 2018). Os estados de Minas Gerais (1.900.970), Espírito Santo (811.080), São Paulo (342.760), Bahia (248.605), Rondônia (136.251) e Paraná (65.170) se destacaram em 2018 com maior quantidade produzida, em toneladas (IBGE, 2018).

Em contrapartida, a quantidade de resíduos gerada é proporcional à sua produção. No beneficiamento dos grãos a quantidade de resíduo (principalmente casca) constitui aproximadamente 50% da produção (BAQUETA, 2016).

Para cada tonelada de grãos do café produzidos, aproximadamente uma tonelada de palhas são geradas durante o processamento a seco, enquanto para o processamento úmido e semiúmido esta quantidade de resíduos passa para 2 toneladas (SOARES, ALVES, 2020).

Os resíduos provenientes da cafeicultura são materiais constituídos basicamente de celulose, hemicelulose e lignina, havendo alteração em suas quantidades nas diferentes composições na constituição química da casca, polpa e o pergaminho, o que leva estes elementos a apresentarem características peculiares que os tornam diferentes (BRUM, 2007).

Assim, devido à alta produtividade brasileira de grãos de café, o apresenta-se como um material com elevado potencial prejudicial ao meio ambiente.

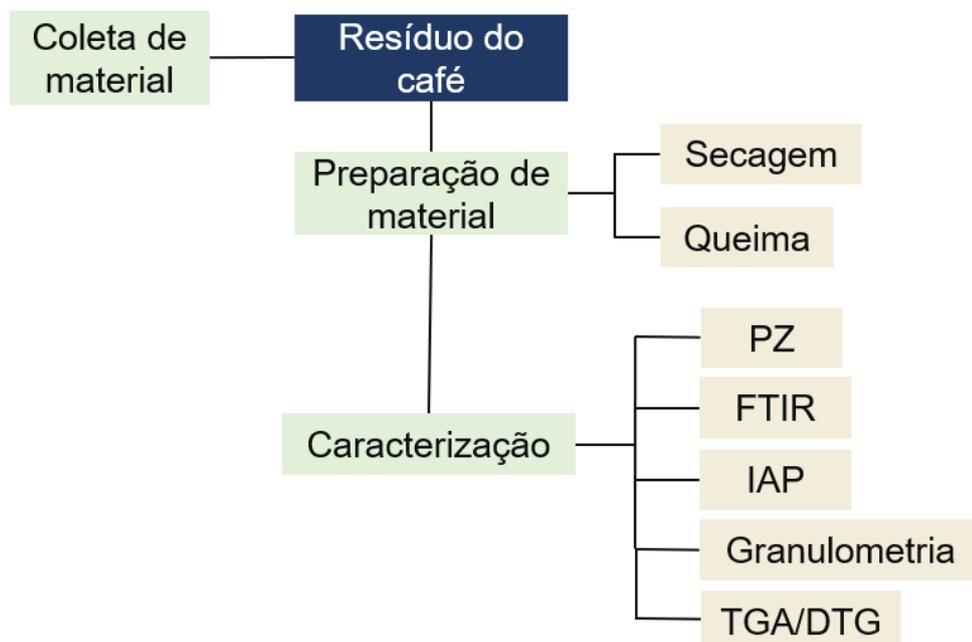
3 PARTE EXPERIMENTAL

A pesquisa é ambientada em Fortaleza-CE. Contudo, a coleta do resíduo ocorreu no município de Eusébio – CE. Os procedimentos relacionados à caracterização dos materiais foram executados no laboratório do Grupo de Química de Materiais Avançados (GQMat), da Universidade Federal do Ceará (UFC); e no Laboratório de Materiais de Construções do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (Nuteq), também localizado na UFC. Quanto aos procedimentos, o estudo é experimental, que consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

A tipologia da pesquisa é de natureza aplicada e classificada, quanto aos fins, como explicativa. Quanto aos procedimentos, o estudo é experimental e propõe a avaliação da atividade pozolânica das cinzas do resíduo de café da indústria 3corações. Tal pesquisa, apresenta qualitativa, baseada na observação e interpretação dos ensaios realizados.

A Figura 9 apresenta o fluxograma referente à metodologia que será executada nesta pesquisa.

Figura 4 – Fluxograma das etapas deste estudo



Fonte: Autor.

3.1 Produção de cinzas do resíduo da indústria do café

O resíduo utilizado neste estudo consiste no subproduto da torra do café, que foi coletado nas instalações industriais da empresa 3Corações® (Figura 10), localizada na Rua Santa Clara, número 10, no município de Eusébio - CE.

Figura 5 - Local de armazenamento do resíduo nas instalações da empresa 3Corações®



Fonte: autor.

Após a coleta, o material foi lavado (Figura 10A) com água corrente, fornecida pela empresa de abastecimento local, Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (Cagece). Assim, a água utilizada para a lavagem do resíduo atende aos padrões de potabilidade da água (BRASIL, 2022). Em seguida, foi realizada a secagem (Figura 10B) em estufa por 5 dias, a aproximadamente 105 °C, gerando um material compactado (Figuras 11C e D).

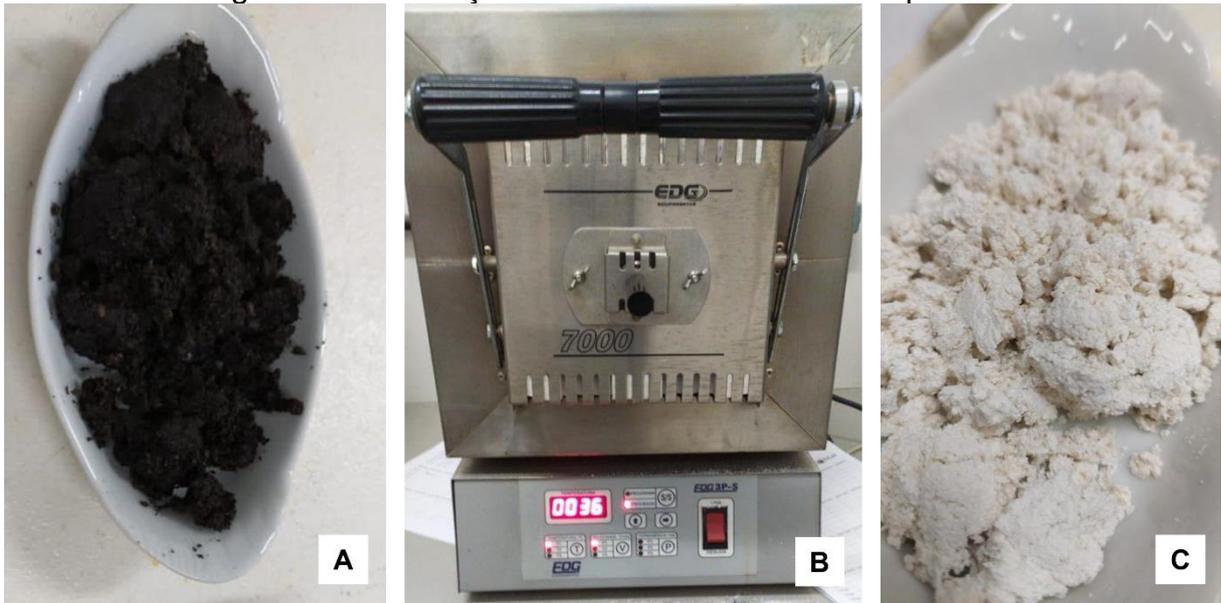
Figura 6 – Etapas relacionada à (A) lavagem do resíduo com água corrente, utilizando uma peneira, seguida da (B) secagem em estufa. O processo de lavagem e secagem resultou em um material compactado (C e D).



Fonte: autor.

Por fim, o material foi macerado em almofariz de porcelana, com auxílio de pistilo, para diminuir o tamanho dos grãos, e foi transferido para um recipiente refratário (Figura 12a). Em seguida, submeteu-se o resíduo à calcinação em forno elétrico mufla (Figura 12B), do modelo EDGCON 10P, sem circulação forçada de ar. A queima ocorreu em dois patamares de 3 h cada um, com taxa de aquecimento de 10°C/ min, conforme descrito no estudo de Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009): no primeiro patamar, a queima foi a uma temperatura de 350 °C; e, no segundo, a uma temperatura de 600 °C. O processo de calcinação consiste na queima do material a fim de eliminar a matéria orgânica e produzir os óxidos formadores das cinzas. Assim, obteve-se o produto em com as características observadas na Figura 11C.

Figura 7 – Calcinação em estufa do material compactado



Fonte: autor.

Realizou-se, então, a moagem em moinho de bolas planetário, modelo Pulverisette 6, do fabricante Fritsch (Figura 13). Essa etapa é importante porque promove a fragmentação da amostra com a diminuição do tamanho de partícula, um parâmetro que influencia diretamente na atividade pozolânica do material.

Figura 8 – Moinho de bolas planetário utilizado para moer o resíduo por meio do impacto de alta energia das bolas de moagem em tigelas rotativas



Fonte: autor.

3.2 Caracterização das cinzas do resíduo de café

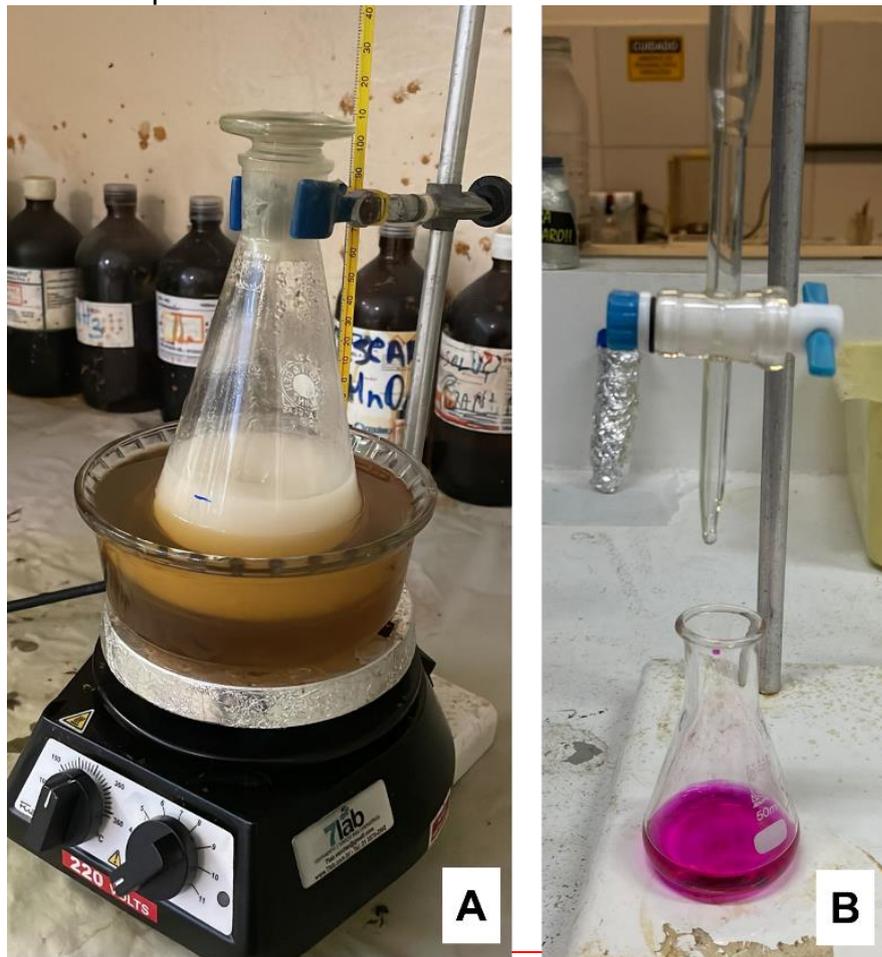
Para a caracterização da CRC, as medidas de caracterização físico-química foram realizadas nos laboratórios da Universidade Federal do Ceará. Estas foram:

- Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), realizada no laboratório multiusuário do Departamento de Química Orgânica e Inorgânica da UFC;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), associada à Espectroscopia por energia dispersiva de raios-x (EDS), realizadas no Departamento de geologia da UFC;
- Termogravimetria (TGA), realizada na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa);
- Potencial Zeta (PZ) e granulometria realizadas na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa); e
- Índice de Atividade Pozolânica (IAP), realizado no laboratório do GQMA.

3.2.1 Determinação do IAP das CRC

Para a determinação da reatividade pozolânica das cinzas avaliadas, foi utilizado o método de Chapelle, descrito por Quarcioni e colaboradores (2015). Em um Erlenmeyer, adicionou-se 1 g de CRC, 1g de óxido de cálcio (CaO) e 250 mL de água. O recipiente foi imediatamente fechado e aquecido a $90 \pm 5^\circ\text{C}$ em banho-maria, com agitação magnética por 16 ± 2 horas (Figura 14 A). Após arrefecimento, a solução foi filtrada, utilizando um papel de filtro, e coletou-se uma alíquota de 50 mL, para a determinação da alcalinidade com ácido clorídrico (HCl) 0,1 M (Figura 14 B). É importante que as etapas de filtração e de titulação sejam realizadas o mais rápido possível, para evitar a absorção de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico.

Figura 9 - Etapas para determinação da reatividade pozolânica da CRC: aquecimento sob agitação da solução contendo CRC e CaO (A); e titulação com HCl para indicar a alcalinidade remanescente.



Fonte: autor.

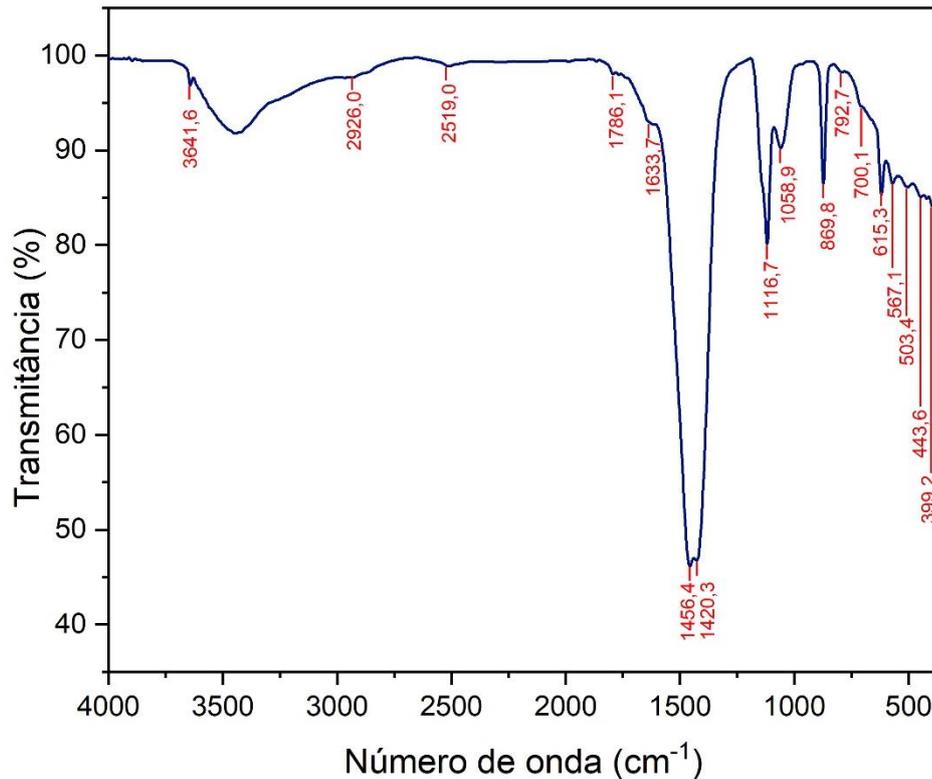
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, o material produzido a partir da queima controlada do resíduo da indústria de café foi identificado como CRC. A temperatura da queima e a moagem foram fatores importantes, pois o método de processamento influencia diretamente no desempenho pozolânico das cinzas. Essa temperatura influencia no teor de carbono e a forma estrutural da sílica presente nas cinzas, que fornece distintos valores de área de superfície específica.

Assim, existe a relação direta das condições de queima para o aumento da área superficial que é proporcional à medida que a temperatura está em torno de 600°C. A partir daí observa-se uma significativa queda superficial específica em decorrência da formação cristalina das partículas das cinzas até a temperatura de 900°C, diminuindo a reatividade das cinzas. Por outro lado, a menor reatividade das cinzas ocorre quando produzidas entre 400°C e 500°C. Isso acontece devido às fases ativas e em decorrência do elevado teor de carbono encontrado nessas amostras (SOARES, 2017).

O espectro de absorção na região do infravermelho, na região de 4000 – 400 cm^{-1} (Figura 15), indica que a cinza do resíduo de café após o processo de queima apresenta bandas características de materiais constituídos de silicatos. Observa-se uma banda larga e de baixa intensidade relativa em números de onda aproximadamente entre 3000 e 3600 cm^{-1} , atribuídos às vibrações de estiramento da ligação Si-OH e grupo funcional OH de água adsorvida. Além disso, o espectro apresenta um “ombro” aproximadamente em 1633,7 cm^{-1} , que pode ser atribuído à deformação do grupo H-O-H. Isso indica que, apesar da queima, ainda há água presente na amostra (WORATHANAKUL, 2009).

Figura 10 – Espectro de absorção na região do infravermelho

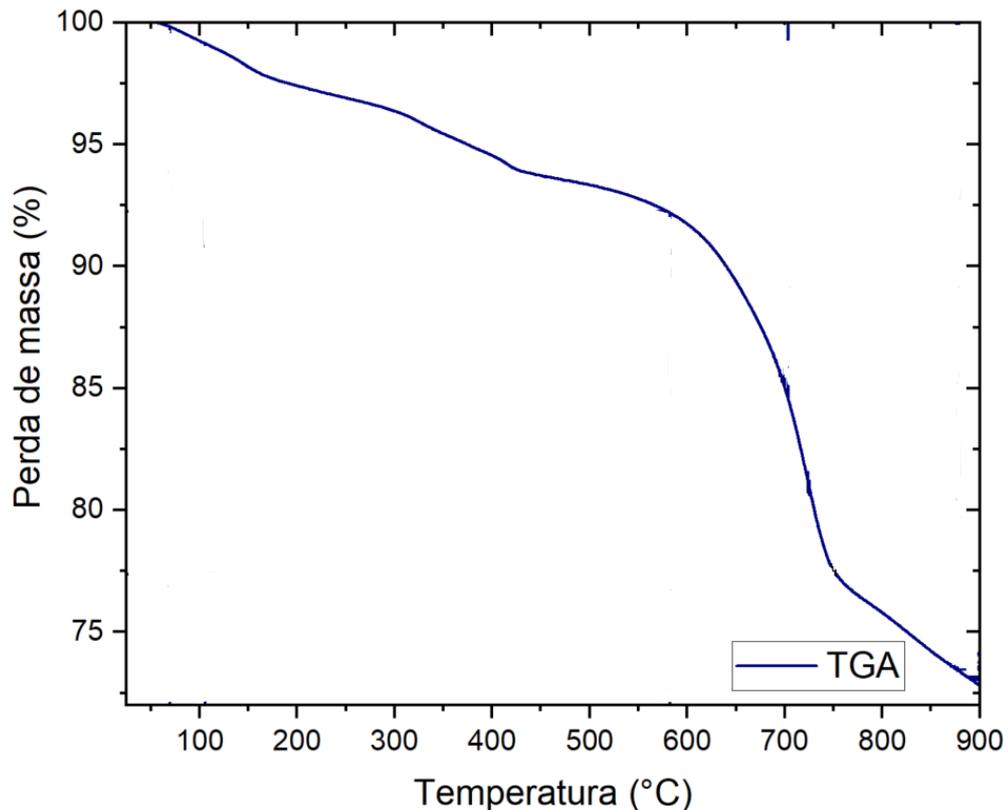


Fonte: autor.

A banda de maior intensidade relativa encontra-se entre 1420,3 e 1456,4 cm^{-1} . As bandas em 1116,7 cm^{-1} correspondem ao alongamento assimétrico Si-O em tetraedros. As bandas em 869,8 cm^{-1} e 615,3 cm^{-1} nas cinzas são indicativas da presença de mulita, uma estrutura constituída por alumina e sílica. A banda em torno de 1066 cm^{-1} às ligações de Si-O e Al-O. As bandas em 700,1 cm^{-1} e 443,6 cm^{-1} corresponderam à vibração de flexão Si-O-Si/ Si-O-Al e Al-O/ Si-O, respectivamente (DARMAYANTI, 2019).

A Figura 16 apresenta a curva obtida por análise térmica da CRC produzida a partir da queima da matéria orgânica. A curva termogravimétrica do material submetido a um programa de temperatura indica que, de 25 a 900 °C, a CRC perdeu 27,18% da massa total. Observa-se o primeiro evento térmico entre 25 e 150°C, correspondendo à perda de 2,05%, que pode ser atribuída à eliminação de água superficial da amostra.

Figura 11 - Curva termogravimétrica da CRC



O segundo evento indica a perda de 3,43% da massa das cinzas e ocorre entre 200 e 424 °C, que pode ser relacionado à perda de água intersticial, eliminação de substâncias voláteis ou matéria orgânica, remanescente do processo de queima. Isso se explica devido ao fato de o processo de combustão da cinza de resíduos vegetais ser extremamente complexo pelo grande número de reações simultâneas e pela difusão de substâncias voláteis (ARAUJO *et al.*, 2006).

O último e maior evento térmico observado corresponde à perda de aproximadamente 19,47% do material que ocorre em uma faixa de temperatura entre 577,7 e 900 °C. Essa perda, possivelmente, trata-se da decomposição do material.

Esses resultados de perda de massa em função do aquecimento podem ser relacionados com os valores de perda ao fogo. Como a partir de aproximadamente 600 °C a amostra apresenta maior perda de massa, o método de queima adotado revela-se muito adequado para a remoção de carbono e compostos voláteis presentes na cinza (CORDEIRO *et al.*, 2009).

Contudo, a estabilidade térmica diminui significativamente à medida que a temperatura de aquecimento aumenta. De acordo com Malhotra e Mehta (2006) e com

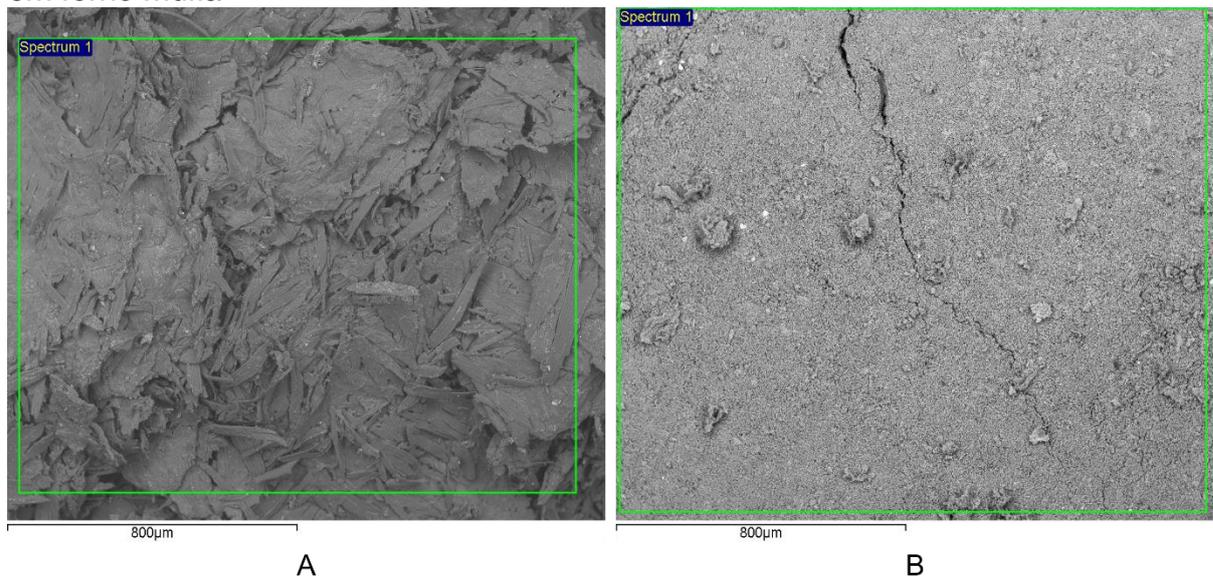
a NBR 12653 (ABNT, 1992), uma cinza pozzolânica deve apresentar perda ao fogo máxima de 6%.

Para concluir se a baixa resistência térmica da CRC é resultado da temperatura de queima ou da composição inadequadas, é necessário fazer uma análise térmica mais detalhada, envolvendo técnicas como Análise Térmica Diferencial (DTA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).

Um fator que pode ter contribuído para a baixa resistência térmica da CRC é a temperatura de queima que foi escolhida com base nos estudos de Cordeiro (2009). Essa temperatura varia de acordo com o tipo de resíduo, sendo influenciada inclusive pelas condições de armazenagem e período do ano. Por isso, faz-se necessário avaliar a temperatura ideal no caso do resíduo de café especificamente.

A Figura 17 se refere às micrografias da cinza, antes (A) e depois (B) da queima. Observa-se que o material apresenta alta heterogeneidade, não sendo possível estimar o tamanho médio dos grãos. Por isso, foi necessário realizar a moagem da amostra.

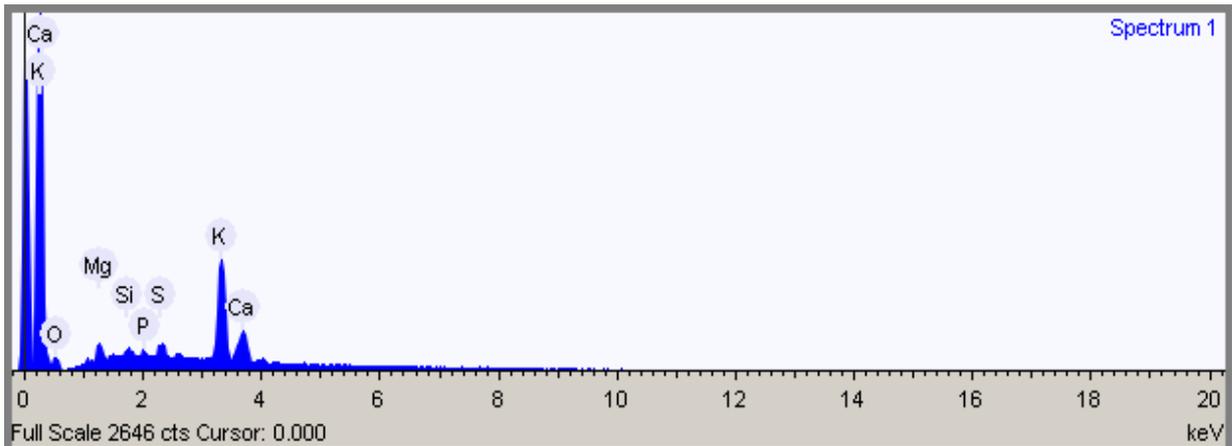
Figura 12 – Micrografias do resíduo de café antes (A) e após (B) o processo de queima em forno mufla



Fonte: autor.

A medida de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) para determinar o efeito da queima na composição da amostra. Os resultados são observados nas Figuras 18 e 19, bem como nas Tabelas 1 e 2.

Figura 13 – EDS do resíduo de café antes do processo de queima em mufla



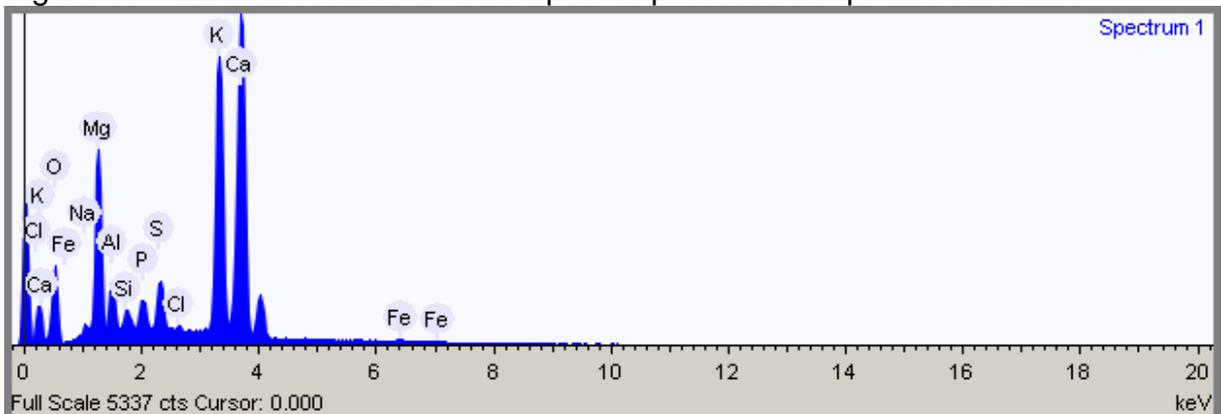
Fonte: autor.

Tabela 1 – Composição do resíduo de café antes do processo de queima em mufla

Elementos	Massa percentual (%)	Fórmula
Magnésio	5,327	MgO
Silício	2,106	SiO ₂
Fósforo	2,208	P ₂ O ₅
Enxofre	4,349	SO ₃
Potássio	40,635	K ₂ O
Cálcio	15,578	CaO
Oxigênio	29,797	-

Fonte: autor.

Figura 14 – EDS do resíduo de café após do processo de queima em mufla



Fonte: autor.

Tabela 2 – Composição do resíduo de café antes do processo de queima em mufla

Elementos	Massa percentual (%)	Fórmula
Sódio	0,671	Na ₂ O
Magnésio	9,285	MgO
Alumínio	2,363	Al ₂ O ₃
Silício	0,952	SiO ₂
Fósforo	1,627	P ₂ O ₅
Enxofre	2,740	SO ₃
Cloro	0,345	
Potássio	20,370	K ₂ O
Cálcio	29,016	CaO
Ferro	0,892	FeO
Oxigênio	31,738	-

Fonte: autor.

Os resultados indicam que houve a formação de óxidos. A presença de considerável teor de potássio e sódio (álcalis) nas cinzas pode ser um fator negativo quanto ao emprego como adição em pasta cimentícia, pois são componentes que precisam reagir com a sílica para não sofrerem reações álcali-agregado, que causam manifestações patológicas.

Por outro lado, a alumina e o ferro influenciam positivamente na pega, além de contribuir para a conservação de energia, redução de CO₂ e retardar a corrosão do aço. Por fim, o cálcio e o magnésio são importantes para a liga do cimento inerte

De acordo com Felix, Almeida e Debacher (2006), os óxidos metálicos, em meio aquoso, apresentam superfícies eletricamente carregadas, provocando uma distribuição iônica na região próxima a superfície e dando origem a formação de uma dupla camada elétrica. Essa dupla camada é formada pela superfície carregada, os contra-íons e os co-íons em uma forma difusa no meio. Como consequência, surge um potencial elétrico que inicia na superfície carregada e decai exponencialmente até tornar-se constante. Este potencial é chamado de potencial zeta, localizado entre a superfície carregada e a solução. Variando-se o pH do meio pode-se medir a propensão de uma superfície em tornar-se neutra, positiva ou negativamente carregada.

A 25 °C, o valor de potencial zeta encontrado para as cinzas foi de $+8,75 \pm 1,24$ mV. Comumente, minerais formados basicamente por aluminatos e silicatos apresentam valores negativos de potencial zeta (FELIX, 2007). Esse valor próximo a zero, porém positivo, indica que os cátions constituintes da CRC estão relativamente expostos. Isso corrobora com os resultados apresentados na Tabela 2, que indica a presença de Na^+ , Mg^{2+} , K^+ e Ca^{2+} na amostra. Esses íons determinam o potencial zeta das cinzas. Os grupos aluminato e silicato têm cargas diferentes em função do pH e podem sofrer interações com vários íons. De acordo com os resultados de EDS, pode-se afirmar que as cinzas apresentam menor teor aluminatos e silicatos em relação aos cátions. Assim, os cátions prevalecem na superfície da amostra, levando a um acúmulo de cátions na camada dupla, dando a essas cinzas volantes um potencial zeta ligeiramente positivo (GUNASEKARA, 2015).

Outro parâmetro importante é o tamanho médio das partículas das adições ativas. As cinzas avaliadas apresentaram um tamanho médio de 1524,814 nm ou 1,52 μm , aproximadamente. De acordo com Cordeiro e colaboradores (2009), este valor está abaixo da faixa típica de tamanho de partículas de grande parte dos cimentos Portland produzidos no Brasil, com diâmetros compreendidos entre 3 e 30 μm .

Considerando que os resíduos sólidos agrícolas têm potencial aplicação no processo de cogeração de energia em usinas do país, garantir um destino adequado para os rejeitos da queima desses materiais é uma problemática relevante. Os resultados de EDS indicam que o aproveitamento dos resíduos da indústria de café, quando submetidos à queima, é possível devido à relativamente alta porcentagem de sílica e de outros óxidos nas cinzas.

Além disso, no que diz respeito à atividade pozolânica, avaliada pelo método de Chapelle modificado, as CRC apresentam valor de fixação igual a 944,0 mg/g (mg de CaO por g de cinza). Esse valor de atividade é expressivamente superior ao valor mínimo atribuído a materiais pozolânicos (330 mg/g) (CORDEIRO et al., 2009).

5 CONCLUSÃO

Este estudo possibilitou avaliar a transformação de um resíduo sólido, produzido em grande escala em vários países, em um material capaz de melhorar as propriedades de matrizes cimentícias. Nesse sentido, a proposta era a produção de uma adição mineral sustentável com reatividade pozolânica.

Os resultados de caracterização indicaram que as condições de queima e de moagem do resíduo avaliado forneceram características similares com as de materiais pozolânicos quanto à composição química. Contudo, a baixa resistência térmica apresentada pelo material produzido indica que a temperatura ideal de queima deve ser investigada. Uma possibilidade é que o aquecimento a 600°C não gerou cinzas nas melhores condições para atender à Norma.

As micrografias obtidas por MEV indicaram a importância de o material, mesmo após a etapa de queima, passar por um processo de moagem. A distribuição de tamanho das partículas do produto de moagem mostra o diâmetro reduzido das CRC. Esse é um fator importante que influencia positivamente na atividade pozolânica das partículas.

Os espectros de FTIR indicam a presença de óxidos de alumínio e de silício (silicatos), presentes em materiais com razoável índice de atividade pozolânica. Por outro lado, observados nos dados coletados na medida de EDS, a presença de potássio e sódio nas cinzas pode promover reações indesejáveis no concreto adicionado dessas cinzas.

Além disso, as CRC apresentaram elevada reatividade pozolânica, que pode ser atribuída à composição química, ao reduzido tamanho das partículas e à resistência térmica das partículas produzidas.

Com base nesses resultados, espera-se que, na prática, a produção desse material pode ser ajustada de forma a ser capaz de promover o efeito químico adequado na composição do cimento, de forma a aumentar sua resistência mecânica.

Contudo, em estudos futuros, espera-se avaliar a composição das CRC por técnicas que permitam quantificar os óxidos formados e avaliar a amorficidade da sílica presente em sua microestrutura, bem como se apresentam fases cristalinas inertes ou fase vítrea reativa, por meio de técnicas como Difração de Raios-x e Fluorescência para óxidos. Além disso, é necessário verificar a viabilidade técnica das

CRC por meio de ensaios que avaliem o efeito dessas cinzas no cimento. Esses ensaios devem avaliar as propriedades da pasta cimentícia adicionada de CRC no estado fresco (reologia, tempo de pega e teste de abatimento); no estado endurecido, para verificar o aumento da resistência mecânica (resistência à compressão, permeabilidade e teste com Ultrassom); e ensaios de ataque químico, para avaliar se as CRC conferem aumento de resistência química ao cimento hidratado.

Portanto, os resultados deste estudo conduzem à conclusão de que CRC apresenta características promissoras no que diz respeito à aplicação como adição mineral com atividade pozolânica, mas que as condições de queima devem ser avaliadas.

REFERÊNCIAS

AGRA, Tiago Manoel da Silva; LOBO, Eduardo.; MONTEIRO, Eliana. Difusão de íons cloreto em cimentos de escória de alto-forno e pozolânico. **Revista de engenharia e Pesquisa Aplicada**. Recife, 2017.

ALMEIDA, D. de *et al.* Porosidade do concreto versus forma do agregado graúdo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, 2020.

ANDRADE SILVA DE, Flávio. **Avaliação dos mecanismos de degradação do concreto por ataque de ácido sulfúrico**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica-Rio, Gávea, 2017.

AQUINO, Jamilly Ferreira de. **Incorporação de cinzas de resíduos agrícolas como adição mineral com atividade pozolânica em matrizes cimentícias-uma revisão da literatura**. 2021.

ARAÚJO, Adriano Antunes de Souza *et al.* Determinação dos teores de umidade e cinzas de amostras comerciais de guaraná utilizando métodos convencionais e análise térmica. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 42, n. 2, p. 269-277, 2006.

ARAÚJO, J. A. D. **Avaliação da durabilidade quanto ao ataque por cloretos em concretos produzidos com adição de tecnil**. Pau dos ferros, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do Cimento Portland**. São Paulo, 2002.

BAQUETA, Michel Rocha. **Extração e caracterização de compostos do resíduo casca de café**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

BARRETTO, T. C. M.; PARENTE, I. M. D. S. **Distintas formas de corrosão das armaduras de estruturas em concreto armado: uma revisão**. São Paulo: Intercorr, 2018.

BASTOS, H. C. N.; MIRANDA, M. Z. **Principais patologias em estruturas de concreto de pontes e viadutos: manuseio e manutenção das obras de arte especiais**. Belo Horizonte: Construindo, 2017.

BATTAGIN, A. **Uma breve história do Cimento Portland**. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo. Disponível em: www.abcp.com.br. Acesso em: 09 nov. de 2021.

BAUER, L.A. F. **Materiais de construção: concreto, madeira, cerâmica, metais, plásticos, asfalto - novos materiais para construção civil**. 5. ed., v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: Patologia, Reabilitação e Prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BEUSHAUSEN, H.; TORRENT, R.; ALEXANDER, M. G. **Performance-based approaches for concrete durability**: State of the art and future research needs. *Cement and Concrete Research*, v. 119, 2019.

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. **Concreto armado - Eu te amo**. Editora Blucher, 2018.

BRUM, Sarah Silva. **Caracterização e modificação química de resíduos sólidos do beneficiamento do café para produção de novos materiais**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

CALADO, Marcelo Alexandrino et al. **A influência de pozolana na mitigação da corrosão de armaduras em compósitos cimentícios**. Recife, 2018.

CANDIDO, Luis Carlos; FIGUEIREDO, Karoline Vieira. **Análise do Impacto das Patologias na Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado**. *Boletim do Gerenciamento*, v. 12, n. 12, p. 59-66, 2020.

CARMO, P. O. do. **Patologia das construções**. Santa Maria, Programa de atualização profissional – CREA – RS, 2016.

GUNASEKARA, Chamila *et al.* Zeta potential, gel formation and compressive strength of low calcium fly ash geopolymers, **Construction and Building Materials**, Volume 95, p. 592-599, 2015.

CORROSÃO de armadura: O que causa e como amenizar esse dano. Tecnosil. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/corrosao-de-armadura-o-que-cause-e-como-amenizar-esse-dano/>. Acesso em: 27 set. 2021.

COSTA, I. M. D.; DE AMORIM, M. A. B.; FRAGA, Y. S. B. **Patologia das construções**: estudo de caso em condomínio residencial. 2020.

DEL-MASSO, Maria Cândida Soares; COTTA, Maria Amélia de Castro; SANTOS, Marisa Aparecida Pereira. Ética em Pesquisa Científica: conceitos e finalidades. **Redefor Educação Especial e Inclusiva, Texto II**. São Paulo: Unesp, p. 1-16, 2012.

DUARTE, Lucas Gil. **Avaliação da atividade pozolânica de resíduos agroindustriais em suspensões cal: resíduo**. 2022.

DYER, THOMAS. **A durabilidade do concreto**. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna, p. 536, 2015.

FÉLIX, E. F. **Modelagem da deformação do concreto armado devido à formação dos produtos de corrosão**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

FELIX, Tais. **Análise dos parâmetros eletrocinéticos superficiais de minerais contaminantes do carvão pela determinação do Potencial Zeta**. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Departamento de Química, 2007.

FERREIRA, J. B.; LOBÃO, V. W. N. Manifestações patológicas na construção civil. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 5, n. 1, p. 71, 2018.

FIALHO, R. F.; SEIBT, B. H.; CARRIJO, S. A. Um estudo sobre a despassivação da armadura com ênfase na causadora por carbonatação do concreto. *In: COLÓQUIO ESTADUAL DE PESQUISA MULTIDISCIPLINAR (ISSN-2527-2500) & CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA MULTIDISCIPLINAR, 2019. Mineiros. Anais, 2019. Mineiros, 2019.*

FRAUCHES-SANTOS, C. *et al.* A corrosão e os agentes anticorrosivos. **Revista virtual de química**, v. 6, n. 2, p. 293-309, 2014.

DE FREITAS, Aurilaine Ávila et al. Bioconcreto: Uma revisão de sua aplicação na construção civil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, 2021.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6ª edição. Rio de Janeiro: Gen, 2011.

GOTO, H.; RIBEIRO, J. P. C.; CENTOFANTE, R. **Materiais da Construção**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

GUZZO, G. **Avaliação do comportamento do concreto convencional e do concreto de ultra-alto desempenho frente à contaminação por cloretos**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

HELENE, P. do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, v. 231, p. 14, 1993.

HILAL, A. A. Microstructure of concrete. **High Performance Concrete Technology and Applications**, [S.L.], v. 1, p. 3-24, 5 out. 2014. InTech.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2018. **Estatística da Produção Agrícola. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Acesso em: 10 abr. 2022.

KRÜGER, P.; PEREIRA, E.; CHINELATTO, A. S. Influência do agregado reciclado na durabilidade do concreto: Uma revisão da bibliografia. **Revista Técnico-Científica**, v. 1, 2017.

LEITE, Alex Macêdo. **Avaliação do uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais**. 2018. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

- LEITE, H. R.; GIRARDI, R.; HASTENPFLUG, D. Durabilidade do Concreto: Análise dos Requisitos dos Materiais Constituintes. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, n. 8, p. 14-25, 2018.
- LIU, B. *et al.* Mechanical and permeability properties of polymer-modified concrete using hydrophobic agent. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 31, p. 101337, set. 2020.
- MAGALHÃES, Juliana Araújo de; FÉLIX, Dainane Damasceno. Estudo e avaliação do desempenho de concreto dosado pelo método de Faury. **Coletânea Melhores Artigos de TCC Graduação**. Salvador, 2018.
- MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente**, Brasília, 2012.
- MEDEIROS, M. H. F. de; RÉUS, G. C.; PONTES, C. V. Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica. **Revista Técnico-Científica**, v. 1, n. 12, 2018.
- MEDEIROS, W. B. B. **Estudo da permeabilidade de meios porosos com solução polimérica**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K.; *Pozzolanic and Cementitious Materials*, 1st ed., Gordon and Breach Publishers: Amsterdam, 1996.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2014.
- MEIRA, Alexandra Rocha; OLIVEIRA, R. de. O usuário da habitação no contexto da APO. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 98, 1998. **Anais**. v. 98, 1998.
- MIRANDA, L. R. M. de. **Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de Cimento Portland por adições minerais**. 2018. Dissertação (mestrado)—Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2018.
- NASCIMENTO, F. B. C. do **Corrosão em armaduras de concreto**. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, v. 3, n. 1, p. 177-188, 2015. Acesso em: 26 set. 2021.
- NASCIMENTO, K. F. S. D; OLIVEIRA, T. M. D. C. Aproveitamento das cinzas de caroço de açaí na produção de concreto sustentável analisando sua durabilidade. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA. **Anais**. Maceió, 2018.
- NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013.

OLIVEIRA, Dione da costa; SOUZA, Rafael Eler de. Produção de bloquetes em concreto verde com adição de palha de café. **Pensar Acadêmico**, v. 15, n. 1, p. 109-119, 2017.

PAIVA, Jonas Medeiros de *et al.* **Avaliação do controle de qualidade da matéria prima na fabricação de Cimento Portland**. Mossoró, 2019.

PARIZOTTO, Liana. **Concreto armado**. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático**. São Paulo: LTC, 2000.

PONTES, C. V. *et al.* **Procedimento para detectar a penetração de cloretos com nitrato de prata em concreto carbonatado**. Revista ALCONPAT, v. 11, n. 2, p. 76–88-76–88, 2021.

POSSAN, E. *et al.* CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p. 147-161, 2017.

QUARCIONI, V. A. *et al.* Indirect and direct Chappelle's methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, v. 8, n. 1, p. 1 – 7, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000100002>. Acesso em: 20 abr. 2022.

QIU, Q. A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: fundamentals and characterization techniques. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 247, p. 118503, jun. 2020.

REAL, L. V. *et al.* Método colorimétrico por aspersion de nitrato de prata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte. **Revista Alconpat**, v. 5, n. 2, p. 151-161, 2015.

REGANATI, B. Durabilidade das Estruturas de Concreto. **Concreto Usinado**. 2019. Disponível em: <https://www.concretousinado.com.br/noticias/durabilidade-concreto/>. Acesso em: 21 jul. 2019.

RODRIGUES, F. P. M. **Fenolftaleína**. Disponível em: <http://www.peritos.eng.br/ferramentas/fenolftaleina/>. Acesso em: 26 out. 2021.

SAMPAIO, G. G. da S. *et al.* Patologias em paredes de concreto. **Revista de trabalhos acadêmicos Universo São-Gonçalo**, v. 1, n. 1, 2017.

SANTANA, Bruna Vieira de; ALEIXO, Isabella Venâncio. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimentos com diferentes aditivos impermeabilizantes**. UNICEUB. Brasília, 2017.

SCHMIDT, J. **Estudo comparativo das resistências mecânicas do concreto de alta resistência inicial com substituição parcial do Cimento Portland por metacaulim**. 2017.

SILVA, F. F. da *et al.* Estudo da influência de cal hidratada na permeabilidade do concreto. **Revista Eletrônica TECCEN**, v. 11, n. 1, 2018.

SIQUEIRA, Tabata Morozini. **Análise da microestrutura de concretos e argamassas produzidos com a substituição parcial de agregados naturais por resíduos de cerâmica vermelha**. Trabalho de Conclusão de Curso. Paraná, 2021.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. São Paulo: AMGH, 2013.

SOARES, Maria; ALVES, Vanessa N. Avaliação do Potencial Adsorptivo da Palha de Café Frente a Íons Metálicos. *Revista Processos Químicos*, v. 14, n. 27, p. 59-66, 2020.

SOUSA, P. A. de; GOMES, T. Estudo dos efeitos da carbonatação na vida útil de pontes de concreto armado. **Engineering Sciences**, v. 6, n. 2, p. 1-11, 2018.

TOKUDOME, N. **Carbonatação do Concreto**. Cimento Itambé, 2009. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/carbonatacao-do-concreto/>. Acesso em: 09 nov. 2021.

TOLENTINO, N. M. de C. **Processos químicos industriais: Matérias-primas, técnicas de produção e métodos de controle de corrosão**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2015.

WU, L.; JU, X.; LIU, M.; GUAN, L.; MA, Y.; LI, M. Influences of multiple factors on the chloride diffusivity of the interfacial transition zone in concrete composites. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 199, p. 108236, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108236>

ZAMPA, G. N. **Ensaio de fenolftaleína para detectar Carbonatação no concreto**. Disponível em: <https://www.engenheirocivillondrina.com.br/ensaio-fenolftaleina-carbonatacao-concreto/>. Acesso em: 09 nov. 2021.