



GABRIEL DIAS GONTIJO DE ANDRADE

**AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE RESÍDUOS
AGRÍCOLAS VISANDO A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO PORTLAND: REVISÃO**

LAVRAS – MG

2022

GABRIEL DIAS GONTIJO DE ANDRADE

**AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS VISANDO A
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND: REVISÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Dr . Keoma Defáveri do Carmo e Silva
Orientador

Me. Eduardo Hélio de Novais Miranda
Coorientador

LAVRAS - MG

2022

GABRIEL DIAS GONTIJO DE ANDRADE

**AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS VISANDO A SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND: REVISÃO**

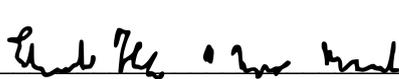
EVALUATION OF THE USE OF ASH FROM AGRICULTURAL AIMING FOR THE PARTIAL
REPLACEMENT OF PORTLAND CEMENT: REVIEW

Monografia apresentada à Universidade
Federal de Lavras, como parte das
exigências do curso de Engenharia Civil,
para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 29 de abril de 2022.
Keoma Defáveri do Carmo e Silva UFLA
Eduardo Hélio de Novais Miranda UFLA
Saulo Rocha Ferreira UFLA



Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva
Orientador



Me. Eduardo Hélio de Novais Miranda
Coorientador

LAVRAS - MG

2022

RESUMO

A fabricação do cimento Portland tem grande influência nas emissões de gases de efeito estufa, sendo responsável direto pelo alto impacto ambiental da indústria da construção civil, representando 5 % das emissões antropogênicas globais de CO₂. Com isso, a substituição parcial do cimento Portland por pozolanas, no caso as cinzas de resíduos agrícolas, se mostra viável a fim de ser um método limpo de disposição de resíduos, trazendo também melhorias em propriedades mecânicas e de durabilidade quando aplicada em concretos e argamassas. Pretendeu-se nesse trabalho reunir e comparar pesquisas que avaliem o potencial de substituição do cimento pelos seguintes produtos: cinza de casca de arroz (CCA), cinza de bagaço de cana de açúcar (CBC), cinza de casca de castanha de caju (CCC) e cinza de palha de trigo (CPT). A influência da adição das cinzas de tais resíduos foi avaliada em relação as propriedades de tempo de pega, porosidade, resistência ao sulfato, resistência à penetração de cloreto e por fim resistência à compressão. Os resultados desse trabalho constatarem o aumento do tempo de início de pega para todas as teores e cinzas avaliadas, além do aumento da durabilidade de concretos e argamassas contra o ataque de sulfato e a penetração de íons cloreto. Enquanto a porosidade se mostrou fortemente influenciada pela finura e pelo processo de moagem na qual a cinza adicionada foi submetida. Quanto a resistência à compressão com 28 dias de cura, a adição de CBC se mostrou viável para todos os teores avaliados, já a CCA tem como seu teor ótimo 7,5 % de adição, garantindo o maior aumento de resistência, a CCC, por outro lado, se mostrou viável para tempos mais longos de cura (56 e 365 dias) e por fim, a CPT ao teor de 10 %, mostrou ganhos de resistência à compressão provenientes da reação pozolânica e efeito filler. Portanto, de maneira geral, a adição de cinzas de resíduos agrícolas se mostrou viável através de ganhos nas propriedades mecânicas e de durabilidade avaliadas.

Palavras-Chave: Pozolanas. Cinza de Casca de Arroz. Cinza de Bagaço de Cana de açúcar. Cinza de Casca de Castanha de Caju. Cinza de Palha de Trigo.

ABSTRACT

The manufacture of Portland cement has a great influence on greenhouse gas emissions, being directly responsible for the high environmental impact of the construction industry, representing 5% of global anthropogenic CO₂ emissions. With this, the partial replacement of Portland cement by pozzolans, in this case, the ash of agricultural residues, proves to be viable in order to be a clean method of waste disposal, also bringing improvements in mechanical properties and durability when applied to concrete and mortars. The aim of this work was to gather and compare researches that evaluate the potential of replacing cement by the following products: rice husk ash (CCA), sugarcane bagasse ash (CBC), cashew nut shell ash (CCC) and wheat straw ash (CPT). The influence of the ash addition of such residues was evaluated in relation to the properties of setting time, porosity, sulfate resistance, chloride penetration resistance and finally compressive strength. The results of this work found an increase in the time initial setting time for all grades and ash evaluated, in addition to an increase in the durability of concrete and mortars against sulfate attack and chloride ion penetration. While the porosity was strongly influenced by the fineness and the milling process in which the added ash was submitted. As for the compressive strength with 28 days of curing, the addition of CBC proved to be viable for all levels evaluated, CCA, on the other hand, has an optimal content of 7.5% of addition, ensuring the greatest increase in resistance, CCC proved to be viable for longer curing times (56 and 365 days) and finally, CPT at 10 %, showed gains in compressive strength from the pozzolanic reaction and filler effect. Therefore, in general, the addition of ash from agricultural residues proved to be viable through gains in the mechanical properties and durability evaluated.

Keywords: Pozzolans. Rice Husk Ash. Sugarcane Bagasse Ash. Cashew Nut Shell Ash. Wheat Straw Ash.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 3 |
| 2.1 | Cimento Portland | 3 |
| 2.1.1 | Hidratação do Cimento Portland | 3 |
| 2.1.2 | Impactos da Produção do Cimento Portland | 4 |
| 2.2 | Pozolanas | 4 |
| 2.2.1 | Classificação das Pozolanas | 5 |
| 2.2.2 | Exigências Químicas e Físicas..... | 6 |
| 2.2.3 | Reação Pozolânica | 8 |
| 2.3 | Resíduos Agrícolas | 9 |
| 2.3.1 | Cinza de Casca de Arroz (CCA)..... | 10 |
| 2.3.2 | Cinza de Bagaço de Cana de açúcar (CBC) | 11 |
| 2.3.3 | Cinza de Casca de Castanha de Caju (CCC) | 12 |
| 2.3.4 | Cinza de Palha de Trigo (CPT)..... | 13 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 15 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 18 |
| 4.1 | Tempo de Pega | 18 |
| 4.2 | Porosidade..... | 20 |
| 4.3 | Resistência ao Sulfato | 22 |
| 4.4 | Resistência à Penetração de Íons Cloreto | 25 |
| 4.5 | Resistência à Compressão..... | 27 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 30 |
| | REFERÊNCIAS..... | 32 |

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias convencionais da produção de concreto foram identificadas como uma das maiores contribuintes para o aquecimento global, gerando um debate acerca da indústria da construção civil por conta do seu alto impacto ambiental. O consumo de concreto atual no planeta é cerca de 1 tonelada para cada habitante. Devido a esse grande consumo, até mesmo pequenas reduções de emissões de gases por tonelada de concreto podem ter um impacto significativo no âmbito global (FLOWER; SANJAYAN, 2007). O principal contribuinte para emissões de gases na fabricação do concreto é o cimento Portland, tendo em vista que a indústria de cimento é responsável por 5 % das emissões antropogênicas globais de CO₂ (GOLEMAN et al., 2019). Para cada 1 tonelada de cimento produzido, 0,8 tonelada de CO₂ é emitido (FLOWER; SANJAYAN, 2007).

Mediante a esses números, há um anseio global na busca de materiais e técnicas alternativas que impactem menos o meio ambiente e um dos métodos promissores descobertos é a substituição parcial do cimento por pozolanas, especialmente as pozolanas agrícolas (IKUMAPAYI et al., 2021). Tais resíduos são amplamente disponíveis no Brasil, por se tratar de uma país de economia baseada na comercialização de *commodities* agrícolas, além de apresentarem baixo custo e boa reatividade. O uso eficaz desses materiais resultaria num método limpo de disposição de grande quantidade de resíduos e que traria melhoria em propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos compósitos que os contém (ATAIE; RIDING, 2016).

O emprego das cinzas de resíduos agrícolas em matrizes cimentícias atende aos quesitos de sustentabilidade, reduzindo a exploração de materiais não renováveis usualmente empregados nos sistemas construtivos através de técnicas sustentáveis e alternativas economicamente viáveis (CONAB, 2020; LINS, 2006). Para isso, deve-se estudar as técnicas de tratamento adequadas e a escolha de cada resíduo para um fim específico afim de otimizar a substituição parcial do cimento (LUHAR et al., 2019).

Em princípio, qualquer cinza vegetal predominantemente siliciosa, que possa ser produzida no estado amorfo e com finura adequada, pode ser utilizada como adição mineral. Sua reatividade vai depender da composição química, fortemente influenciada pelo produto que gerou a cinza, pelo solo e pelo processo de produção da cinza (JOHN et al., 2003).

Neste contexto, algumas das cinzas já estudadas como materiais cimentícios suplementares são as Cinzas de Casca de Arroz (CCA), as Cinzas de Bagaço de Cana de Açúcar (CBC), as Cinzas de Casca de Castanha de Caju (CCC) e as Cinzas de Palha de Trigo (CPT).

Neste trabalho é apresentado os resultados dos estudos de diferentes pesquisadores sobre esses resíduos agrícolas como substituição parcial do cimento Portland destacando sua influência nas propriedades de tempo de pega, porosidade, resistência ao sulfato, resistência à penetração de cloreto e resistência à compressão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cimento Portland

O cimento Portland foi criado na época da Revolução Industrial pelo pedreiro britânico Joseph Aspdin, em 1824. Desde lá, sua utilização é crescente nas grandes obras do mundo, por exemplo, no ano de 2012, sua produção foi de cerca de 12 bilhões de toneladas (LI, 2012).

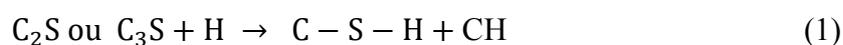
A ASTM C150 (2019) define o cimento Portland como um aglomerante hidráulico que consiste de silicatos de cálcio hidráulicos e que é produzido pela moagem do clínquer. Os clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de um material sintetizado, produzidos quando uma mistura de matérias-primas (calcário, argila, filito, minério de ferro) de composição pré-determinada é aquecida a temperaturas médias de 1450 °C.

2.1.1 Hidratação do Cimento Portland

O contato do clínquer com a água inicia diversas reações químicas, dando origem a numerosas fases hidratadas. A composição mineralógica do clínquer consiste em silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e aluminoferrita tetracálcica. Os principais produtos da hidratação do cimento Portland são: silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio hidratados (etringita) (CHU et al., 2021). O silicato de cálcio hidratado resultante da hidratação do cimento Portland contribui significativamente para macro propriedades do concreto como resistência e durabilidade, e sua composição depende de fatores como a relação água/cimento e temperatura (TANG et al., 2021).

O surgimento de fases hidratadas possui velocidade distintas, o que confere características importantes nas pastas de cimento Portland, como por exemplo enrijecimento e endurecimento, com o consequente aumento de resistência. Diversos fatores podem alterar a velocidade da hidratação do cimento Portland, como a finura do clínquer, a composição química e a quantidade de água envolvida na mistura (COUTINHO, 1973).

Os mecanismos da hidratação do cimento Portland podem ser representados através da Equação 1, que ilustra a reação do silicato dicálcico (C₂S) ou silicato tricálcico (C₃S) com a água (H), dando origem a silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH).



2.1.2 Impactos da Produção do Cimento Portland

Embora o setor cimentício esteja cada vez mais aprimorado, com o uso de novas técnicas e equipamentos que geram menos problemas, a produção do cimento gera impactos no meio ambiente e na saúde humana, em quase todas as suas fases de produção. Há impactos e danos à saúde desde a extração de matéria-prima, que gera degradação e alterações no ambiente natural próximo às fábricas e às áreas de mineração, indo desde a emissão de material particulado até o impacto gerado na fase de clínquerização, com forte emissão de gases de efeito estufa, principalmente o CO₂ (MAURY, 2012).

Para se produzir uma tonelada de cimento Portland são emitidos aproximadamente uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (JOHN, 2000). No Brasil, segundo o mesmo autor, a indústria cimenteira representa 7 % das emissões de CO₂. Portanto, há uma necessidade da busca de alternativas de menor impacto ambiental devido aos problemas relacionados à emissão de gases tóxicos, à redução dos custos de construção, elevada quantidade de matéria prima consumida e a preocupação com o esgotamento dessas reservas naturais (CINCOTTO, 1988).

O uso de adições minerais na composição de material cimentício visa diminuir a extração de matéria prima para a produção do cimento Portland e dar destino aos subprodutos agroindustriais que, normalmente, são tratados como simples rejeitos. A redução de emissão de CO₂, de consumo de energia e muitas vezes de custo, é proporcional à quantidade de adição mineral utilizada na mistura em substituição ao cimento (ISAIA; GASTALDINI, 2004).

2.2 Pozolanas

Os materiais mais utilizados na substituição parcial do cimento Portland são as pozolanas, que possuem composição similar ao cimento, sendo constituídas de compostos sílico-cálcico-aluminosos, substituindo-o parcialmente se apresentarem, preferencialmente, estrutura amorfa (ISAIA; GASTALDINI, 2004).

Os materiais pozolânicos são definidos, segundo a NBR 12653 (1992), como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente moídos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Para serem incorporados ao concreto ou argamassas, esses materiais devem passar por um processo de britagem, moagem, classificação por tamanho e, dependendo da utilização, é necessária ativação para uma maior superfície específica (CINCOTTO, 2007).

As pozolanas podem ser divididas, conforme sua origem, entre as de procedência natural ou artificial. Os materiais pozolânicos naturais podem ainda ser subdivididos em dois grupos principais: os derivados de rochas vulcânicas (escórias vulcânicas, pedra-pomes, etc.) ou os materiais de origem sedimentar. Já as pozolanas artificiais são materiais provenientes de tratamento térmico, seja argilas calcinadas ou termicamente ativadas, ou subprodutos industriais com atividade pozolânica. (cinzas de casca de arroz, sílica ativa, etc.) (AL-SWAIDANI; KHWIES, 2018).

2.2.1 Classificação das Pozolanas

A classificação dos materiais pozolânicos é feita, como citado anteriormente, com base na origem desses materiais. As classificações apresentadas tanto na NBR 12653 (1992), bem como na ASTM C 618 (2005) tem validade em território nacional.

A Tabela 1 apresenta a classificação dos materiais pozolânicos quanto à sua origem, segundo a NBR 12653 (1992) e a ASTM C 618 (2005). A NBR 12653 (1992) subdivide os materiais pozolânicos nas classes N, C e E. A classe N diz respeito às pozolanas naturais ou artificiais, compreendendo materiais vulcânicos, cherts silicosos, terras diatomáceas (material resultante da fossilização das algas unicelulares com uma camada de sílica) e argilas calcinadas (material proveniente da calcinação de argilas submetidas a temperaturas entre 500 °C e 900 °C). A classe C compreende as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, e a classe E corresponde as pozolanas cujos requisitos diferem das classes anteriores. A ASTM C 618 (2005) subdivide os materiais pozolânicos entre as classes N, F e C. A classe N corresponde as pozolanas cruas ou calcinadas, provenientes de terras diatomáceas, quartzo de opalina e xistos, além de turfos vulcânicos e argilas. A classe F engloba as cinzas volantes oriundas da incineração de carvão betuminoso ou antracito, que apresentem atividade pozolânica. Por último, o material de classe C é a cinza resultante de carvão betuminoso ou lignina, que apresente propriedades pozolânicas e cimentantes. Algumas cinzas volantes de classe C podem apresentar porcentagens de hidróxido de cálcio superiores a 10 %.

Tabela 1 - Classificação dos materiais pozolânicos.

| Classe | NBR 12653 (1992) | ASTM C 618 (2005) |
|---------------------------------|---|--|
| N | Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. | Pozolanas cruas ou calcinadas, provenientes de terras diatomáceas, quartzo de opalina e xistos, turfos vulcânicos e argilas. |
| C (NBR 12653) F (ASTM C 618) | Pozolanas produzidas pela combustão de carvão mineral oriundo de usinas termoeletricas. | Cinzas volantes oriundas da incineração de carvão betuminoso ou antracito, que apresentem atividade pozolânica. |
| E | Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores. | Cinza resultante de carvão betuminoso ou lignina, que apresente propriedades pozolânicas e cimentantes. |

Fonte: NBR 12653 (1992) e ASTM C 618 (2005).

2.2.2 Exigências Químicas e Físicas

A NBR 12653 (1992) também especifica exigências mínimas químicas e físicas para os materiais pozolânicos. Quanto as exigências químicas, são estabelecidos parâmetros diferentes para cada classe de pozolana (N, C ou E), tais quais: a porcentagem mínima de SiO_2 (sílica) + Al_2O_3 (alumina) + Fe_2O_3 (hematita), a porcentagem máxima de SO_3 (óxido sulfúrico), o teor de umidade máximo e perda ao fogo (ambos em %), e por fim, a porcentagem máxima de álcalis disponíveis em Na_2O . Tais especificações estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Exigências químicas para materiais pozolânicos.

| Exigências Químicas | | | | |
|---|----------------|---|----------|----------|
| Propriedades | Unidade | Classes de materiais pozolânicos | | |
| | | N | C | E |
| SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | % mín | 70,0 | 70,0 | 50,0 |
| SO ₃ | % máx | 4,0 | 5,0 | 5,0 |
| Teor de umidade | % máx | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| Perda ao fogo | % máx | 10,0 | 6,0 | 6,0 |
| Alcális disponíveis em Na ₂ O | % máx | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

Fonte: NBR 12653 (1992).

As exigências físicas estabelecidas pela NBR 12653 (1992) também são apresentadas segundo as diferentes classes de materiais pozolânicos. O primeiro parâmetro físico estipula a porcentagem de material retido na peneira de 45 µm. Os próximos parâmetros determinam o índice de atividade pozolânica mínima com o cimento aos 28 dias (em %), e o índice de atividade pozolânica em reação com a cal aos 7 dias (em MPa), e por fim, é determinado a porcentagem máxima de água requerida no processo. Tais especificações foram agrupadas e apresentadas na Tabela 3.

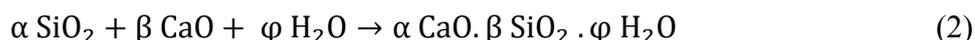
Tabela 3 - Exigências físicas para materiais pozolânicos.

| Exigências Físicas | | | | |
|--|----------------|---|----------|----------|
| Propriedades | Unidade | Classes de materiais pozolânicos | | |
| | | N | C | E |
| Material retido na peneira de 45 µm. | % máx | 34,0 | 34,0 | 34,0 |
| Índice de atividade pozolânica com o cimento aos 28 dias. | % mín | 75,0 | 75,0 | 75,0 |
| Índice de atividade pozolânica em reação com a cal aos 7 dias. | MPa | 6,0 | 6,0 | 6,0 |
| Água requerida. | % máx | 115,0 | 110,0 | 110,0 |

Fonte: NBR 12653 (1992).

2.2.3 Reação Pozolânica

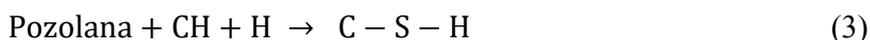
A reação pozolânica se caracteriza pelo consumo lento do hidróxido de cálcio (CH) livre, após hidratação do cimento anidro, pelo material pozolânico, gerando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Essa reação pode ser simplificada representada pela Equação 2.



As pozolanas, sejam elas naturais ou artificiais, devem ter como constituinte preponderante a sílica (SiO₂), que reage com a cal (CaO) para formar o C-S-H, contribuindo para a resistência mecânica do sistema cimentício. Pode conter também alumina e óxido de ferro responsáveis pela formação de sílico-aluminatos e aluminatos, com contribuição menos

expressiva para a resistência mecânica, além de óxidos de metais alcalinos e óxido de cálcio (CINCOTTO, 2007).

A reação apresentada na Equação 3, ilustra o comportamento do cimento Portland na presença de material pozolânico, presente em estado amorfo ou em forma de estrutura cristalina fraca substituindo parcialmente o cimento, o que provoca interação com o hidróxido de cálcio e água, formando compostos estáveis com poder aglomerante tais como o C-S-H.



Algumas adições minerais podem ser classificadas como cimentantes ou como pozolânicas, enquanto outras podem ser tanto cimentantes quanto pozolânicas, quanto ao seu mecanismo de ação (MEHTA, 1994). Qualquer uma dessas adições, independente da origem, podem vir a necessitar de um processamento adicional (por exemplo, britagem ou moagem) para se adequarem como materiais pozolânicos para uso em matrizes cimentícias. As adições minerais ditas cimentantes não necessitam do CH presente no cimento Portland para formar C-S-H. No entanto, sua hidratação apresenta-se normalmente lenta e os produtos cimentantes formados são insuficientes para utilização do material com fins estruturais (LIMA, 2008).

2.3 Resíduos Agrícolas

Um das pozolanas mais pesquisadas na literatura são os resíduos agrícolas. A presença de altos teores de sílica nas cinzas destes resíduos, em alguns casos com elevado índice de pozolanicidade, pode viabilizar a utilização desses produtos como adições minerais em materiais cimentícios, como concretos e argamassas (MEHTA, 1994).

A reciclagem desses resíduos apresenta-se hoje como uma oportunidade para a preservação do meio ambiente e para a redução do custo e do consumo de energia na produção de materiais e componentes de construção. O mercado da construção civil, pelo expressivo volume físico de materiais que incorpora, é o mercado mais propício para reciclagem de novos resíduos (SILVA; SOUZA, 1995).

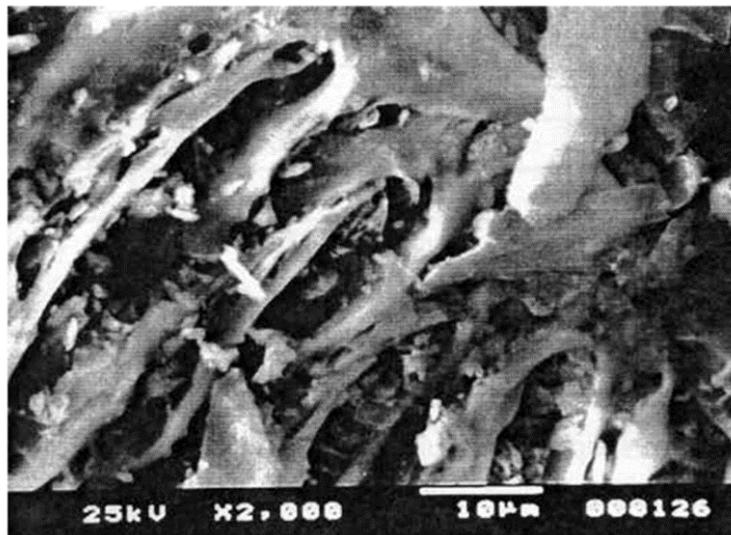
As cinzas são resíduos gerados por processos agroindustriais, ou se originam da queima de outros resíduos, devido a reincorporação desses no processo. Como exemplo destes materiais, têm-se a casca do arroz, resíduo incinerado para obtenção de energia e que gera a cinza da casca do arroz, um outro subproduto com alta pozolanicidade (LIMA, 2008).

Não menos importante é o fato de que a utilização de resíduos, particularmente as cinzas, permite alterar as características dos aglomerantes, especialmente do cimento Portland, tornando possível a melhoria de seu desempenho em aplicações específicas (JOHN et al., 2003).

2.3.1 Cinza de Casca de Arroz (CCA)

O resíduo agrícola mais estudado, atualmente, como adição mineral em materiais cimentícios é a cinza da casca de arroz (CCA), obtida da queima das cascas do arroz. A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura, com alto teor de sílica, composta de aproximadamente 50 % de celulose, 30 % de lignina e 20 % de sílica de base. Quando queimada, a lignina e a celulose podem ser removidas, resultando na CCA, que possui uma estrutura celular e porosa (MEHTA, 1992). A Figura 1 ilustra a estrutura da cinza da casca de arroz queimada a 560 °C por 2 horas através de uma micrografia eletrônica de varredura.

Figura 1: Micrografia eletrônica de varredura da CCA



Fonte: Silveira e Ruaro (1995).

As empresas beneficiadoras de arroz são as principais consumidoras da casca como combustível para a secagem do cereal. Porém, na maioria dos casos, tais empresas não possuem processos para aproveitamento e descarte adequados das cinzas produzidas. Essas são geralmente depositadas em terrenos baldios ou lançadas em cursos d'água, ocasionando poluição e contaminação de mananciais (LIMA, 2008). No Brasil, a produção de arroz é da ordem de 12 milhões de toneladas por ano, levando a uma disponibilidade de 480.000 toneladas anuais de cinza (ROSA, 2005).

A técnica de queima da CCA pode resultar em cinzas de variadas propriedades. A sílica nas cinzas sofre transformações estruturais, dependendo das condições da combustão. De 550 °C a 800 °C, originam-se cinzas amorfas, e temperaturas superiores a 800 °C ocorre a cristalização. Tais polimorfos de sílica (materiais com mesma composição química, porém com arranjos distintos) têm propriedades diferentes, cujas especificações corretas são importantes para produzir cinzas para uso final específico (BONDIOLI et al., 2010). Devido ao seu alto teor de sílica, com um tratamento a uma temperatura adequada, a CCA pode resultar num material amorfo com estrutura porosa e área específica de até 50.000 m²/ kg, mesmo com partículas relativamente grandes. (NEVILLE, 1997).

No Brasil, a grande maioria dos trabalhos sobre o uso de cinzas de casca de arroz como material pozolânico foi realizada com cinzas residuais oriundas da queima da casca em beneficiadoras do cereal. Em alguns casos, a temperatura de queima era controlada para evitar a formação de sílica cristalina. Nos demais, os estudos foram realizados com cinzas obtidas de queimas sem um controle efetivo do tempo e da temperatura de queima (PRUDÊNCIO Jr et al., 2003).

2.3.2 Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar (CBC)

A cinza do bagaço de cana de açúcar também vem sendo largamente estudada como adição em materiais cimentícios, principalmente pelo aumento da geração desse resíduo em função da alta produção de álcool combustível e de açúcar nos últimos anos. Atualmente, o Brasil é responsável pela produção de cerca de 60 % do álcool etílico consumido no planeta e é o maior produtor mundial de açúcar (LIMA, 2008).

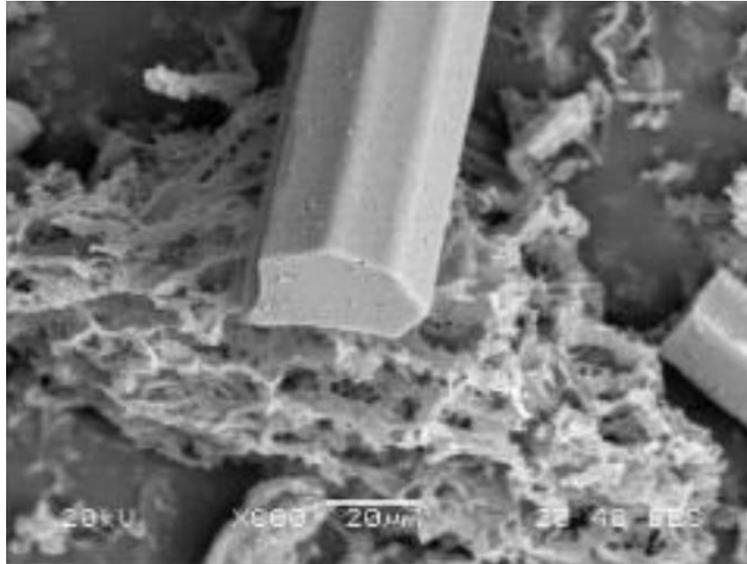
A cinza de bagaço de cana (CBC) é um resíduo originado da queima de bagaço em caldeiras nas indústrias de cana / álcool. Nessas indústrias, os caules da cana são triturados para extrair o suco e o resíduo restante fibroso é chamado de bagaço (SOUZA et al., 2011). A geração de cinzas residuais, provenientes da queima do bagaço, e sua disposição, que na maioria das vezes é o descarte na natureza sem um manejo eficiente, representa um dos maiores problemas das indústrias sucroalcooleiras. (SOUZA et al., 2007).

Uma comparação das composições químicas de CBC relatadas na literatura mostram variações em propriedades das cinzas devido às diferenças na condição do solo onde a cana foi cultivada. As cinzas têm uma concentração muito alta de sílica e contêm óxidos de alumínio, ferro, álcalis e alcalinoterrosos em quantidades menores (BLOND et al., 2011).

Uma imagem de CBC produzida a 600 °C por 3 horas é apresentada na Figura 2, onde se constata a presença de partículas prismáticas, com arestas bem definidas em contraste com

partículas de estrutura celular e alta porosidade. A elevada porosidade da cinza é consequência da liberação de matéria orgânica durante a queima do bagaço (CORDEIRO et al., 2009).

Figura 2: Micrografia eletrônica de varredura da CBC.



Fonte: Cordeiro et al. (2009).

2.3.3 Cinza de Casca de Castanha de Caju (CCC)

Outros resíduos estudados como substituintes ao cimento são os gerados da cultura do caju. O caju é formado pelo pedúnculo e pelo fruto do cajueiro, a castanha de caju, de onde se origina o principal produto de consumo, a amêndoa. A obtenção da amêndoa começa pelo processo de decorticação, a separação da amêndoa e da casca. Tal separação é feita em tanques de cardol, os quais são aquecidos pelo calor gerado em caldeiras, ao passarem por serpentinas a temperaturas de aproximadamente $800 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (PAIVA et al., 2000).

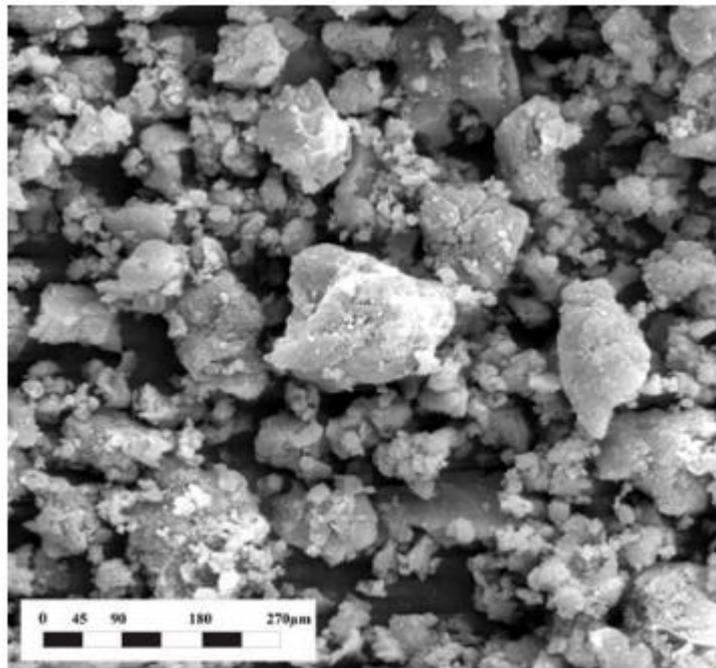
Os subprodutos dessa etapa são as amêndoas, de alto valor de mercado, e as cascas encharcadas de cardol, com alto teor combustível. Comparativamente, o poder calorífico deste resíduo é equivalente ao de outros produtos utilizados para o mesmo fim, como a casca da semente de algodão, casca de amendoim, serragem e outros. Essas cascas, resíduos da produção, são incorporadas novamente ao processo e geram calor nas caldeiras para a decorticação de novas castanhas (AGOSTINI-COSTA et al., 2000).

A cinza de castanha de caju é o resíduo colhido no fundo da grelha das caldeiras, resultante da queima das cascas, cujo resfriamento se faz lentamente. Atualmente, a CCC é utilizada como adubo em plantações de caju e uma pequena parte é destinada a aterros sanitários comuns (LIMA; ROSSIGNOLO, 2010). A cinza representa aproximadamente 5 % do peso da

castanha inicial, e com a atual produtividade da cajucultura, a geração dessas cinzas é de aproximadamente 15 mil toneladas por ano (LIMA; ROSSIGNOLO, 2010).

A Figura 3 ilustra a estrutura da CCC com aumento de 1000 vezes através de uma micrografia eletrônica de varredura. Nota-se que as partículas possuem aspecto lamelar, com camadas sobrepostas e pequenas partículas aderidas à superfície, formando grãos de tamanhos e formatos variados (LIMA, 2008).

Figura 3: Micrografia eletrônica de varredura da CCC.



Fonte: Lima e Rossignolo (2010).

A CCC apresenta a vantagem de não necessitar de calcinação, em relação à possibilidade de aproveitamento como adição mineral, uma vez que é resultado final do processo de produção da amêndoa do caju. Esse fato a coloca em posição de vantagem sobre outras cinzas, haja vista que os processos de queima e calcinação demandam energia e geram gases que poluem o meio ambiente (LIMA, 2008).

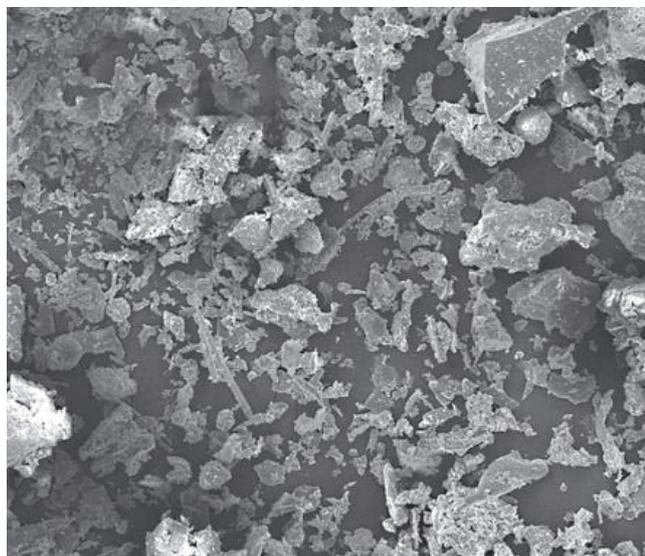
2.3.4 Cinza de Palha de Trigo (CPT)

Assim como a cana de açúcar e o arroz, o trigo é uma das maiores safras de cereais e uma das principais fontes de alimento para 2,5 bilhões de pessoas em todo o mundo. A produção global estimada de trigo de 2016 a 2017 foi de 750 milhões de toneladas (FAO, 2017).

A palha de trigo consiste nos caules que restam depois dos grãos de trigo serem ceifados, e geralmente é tratada como resíduo agrícola, não havendo manejo ou descarte adequado. Portanto, na maioria das vezes o resíduo é queimado, contribuindo para a poluição do ar e danos à saúde pública (AMIN et al., 2019). Recentemente, muitos pesquisadores investigaram o papel da CPT como um potencial material cimentício suplementar ao cimento. Nota-se que a eficiência pozolânica da CPT depende de sua composição, que muda de uma região para outra devido à variação das condições do solo e do clima, além de sua origem, temperatura de calcinação e a finura.

A cinza de palha de trigo (CPT) é obtida através da incineração do produto da palha de trigo, a uma temperatura estabilizada de 900 °C por um período de 6 horas num forno mufla. A cinza resultante é coletada e moída usando uma máquina de abrasão de Los Angeles por duas horas (AL-AKHRAS, 2013). Outros pesquisadores como Biricik, et al. (2000) queimaram a palha de trigo em temperaturas de 570 °C e 670 °C durante 5 horas, obtendo na CPT queimada a 670 °C melhores resultados quanto ao comportamento pozolânico. Ataie e Riding (2013) investigaram a temperatura ótima de queima e duração, chegando a uma temperatura de 500 °C e duração de 12 horas. Portanto, é evidente as divergências nas pesquisas quanto ao tratamento térmico dado as cinzas da palha de trigo (AMIN et al., 2019). O tratamento térmico se faz necessário devido ao alto teor de carbono encontrado na CPT, que com o tratamento correto, tende a diminuir, alterando também a coloração das amostras para uma cor menos escura do que da amostra bruta. (PAVYLÍKOVÁ et al., 2017). A Figura 4 ilustra a estrutura da CPT queimada a 700 °C durante 2 horas, em que notam-se partículas grandes ocasionadas pela presença de fase amorfa sintetizada junto com a fase cristalina.

Figura 4: Micrografia eletrônica de varredura da CPT.



Fonte: Pavylíková et al. (2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguinte revisão bibliográfica foi realizada através de buscas por pesquisas científicas on-line através do banco de dados do Science Direct e com o auxílio do mecanismo de pesquisa do Google Acadêmico e do conteúdo gratuito do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A busca foi realizada em inglês e se deu por meio do nome das propriedades seguidas da sigla de cada cinza, como por exemplo: initial setting time rha, porosity rha, sulfate attack rha, chloride resistance rha, compressive strength rha, e assim por diante. O primeiro filtro aplicado foi o de pesquisas que pertenciam a área da Engenharia Civil. Os artigos foram avaliados inicialmente através da leitura de seus títulos e resumos, e por fim, do texto completo, afim de selecionar os que avaliavam as propriedades que são objeto de estudo dessa revisão. Para CCA e CBC foram encontrados 5 artigos, um para cada propriedade, enquanto para CPT foram encontrados 3 artigos, e para CCC 2 artigos, totalizando 15 artigos.

Com isso, foi possível reunir e comparar os diferentes dados encontrados nas fontes de consulta através de gráficos e avaliar trabalhos que realizaram os mesmos testes e ensaios para cinzas de resíduos diferentes. Devido a versatilidade do uso de resíduos agrícolas, a busca foi limitada a estudos que tratavam da substituição do cimento Portland, excluindo a substituições de agregados e afins. Por fim, a busca foi limitada a pesquisas publicadas entre o ano de 2000 até o presente momento. O fato de não encontrar testes para algumas cinzas acabou trazendo uma discrepância à quantidade de trabalhos disponíveis para a comparação de cada cinza de resíduo. A Tabela 4 apresenta o portfólio bibliográfico de cada resíduo abordado e quais palavras-chaves utilizadas na pesquisa.

Tabela 4 – Portfólio bibliográfico (continua)

| Resíduo | Palavras-Chave | Artigos |
|---|--|---|
| CCA | rice husk ash; RHA; initial setting time; porosity; sulfate attack; chloride resistance; compressive strength | KHAN, W.; SHAHZADA, K.; BIBI, T.; ISLAM, S.; KHAN, S. Performance Evaluation of Khyber Pakhtunkhwa Rice Husk Ash (RHA) in Improving Mechanical Behavior of Cement. <i>Construction and Building Materials</i> . p. 101-108, 2018. |
| | | DAKROURY, A.E.; GASSER, M.S. Rice husk ash (RHA) as cement admixture for immobilization of liquid radioactive waste at different temperatures. <i>Journal of Nuclear Materials</i> , p. 7–18, 2008. |
| | | SAKR, K. Effects of Silica Fume and Rice Husk Ash on the Properties of Heavy Weight Concrete. <i>Journal of Materials in Civil Engineering</i> . v. 11, p. 565-581, 2006. |
| | | GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. <i>Construction and Building Materials</i> . p. 1675–1683, 2008. |
| | | REDDY, K. R., HARIHANAND, M.; MURALI, K. Strength performance of high-grade concrete using rice husk ash (RHA) as cement replacement material. <i>Materials Today: Proceedings</i> . v. 128. p. 57-65, 2021. |
| CBC | sugarcane bagasse ash; SCBA; initial setting time; porosity; sulfate attack; chloride resistance; compressive strength | ARIF, E.; CLARK, M.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. <i>Construction and Building Materials</i> , v. 106, p. 294–301, 2016. |
| | | TANTAWY, M.; EL-ROUDI, A.; SALEM, A. Immobilization of Cr(VI) in bagasse ash blended cement pastes. <i>Construction and Building Materials</i> . v.30, p. 140-153, 2012. |
| | | SUBRAMANIYAN, K.S.; SIYARAJA, M. Assessment of sugarcane bagasse ash concrete on mechanical and durability properties. <i>Advances in Natural and Applied Sciences</i> , v. 10, n. 9, p. 253, 2016. |
| | | RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. <i>Materials & Design</i> . v. 34, p. 45-50, 2012. |
| BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M. Influence of Different Processing Methods on the Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. <i>Cement and Concrete Composites</i> . p. 32-45, 2015. | | |

Tabela 4 – Portfólio bibliográfico (conclusão)

| | | |
|-----|--|---|
| CCC | cashew nut shell ash; CNSA; initial setting time; sulfate attack; compressive strength | MENDU, J. K.; PANNEM, R. M. Assessment of mechanical properties of cashew nut shell ash blended concrete. <i>Innovative Infrastructure Solutions</i> . n. 1, p. 34–38, 2021. OYEBISI, S. O.; TOBIT, I.; ONIYIDE, D. Performance evaluation of cashew nutshell ash as a binder in concrete production. <i>Case Studies in Construction Materials</i> . p. 676-681, 2019. |
| CPT | wheat straw ash; WSA; initial setting time; porosity; sulfate attack; compressive strength | JANKOVSKÝ, O. Study on pozzolana activity of wheat straw ash as potential admixture for blended cements. <i>Ceramics. Silikaty</i> , 2017. BIRICIK, H.; AKOZ, F.; IHAN, I.B.; TULGAR, A.N. Study of pozzolanic properties of wheat straw ash. <i>Cement and Concrete Research</i> . v. 29, p. 637–643, 2000. BHEEL, N.; IBRAHIM, M. H. W.; ADESINA, A.; KENNEDY, C.; SHAR, I. A. Mechanical performance of concrete incorporating wheat straw ash as partial replacement of cement. <i>Journal of Building Pathology and Rehabilitation</i> . p. 1-7, 2021. |

Fonte: Do Autor (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

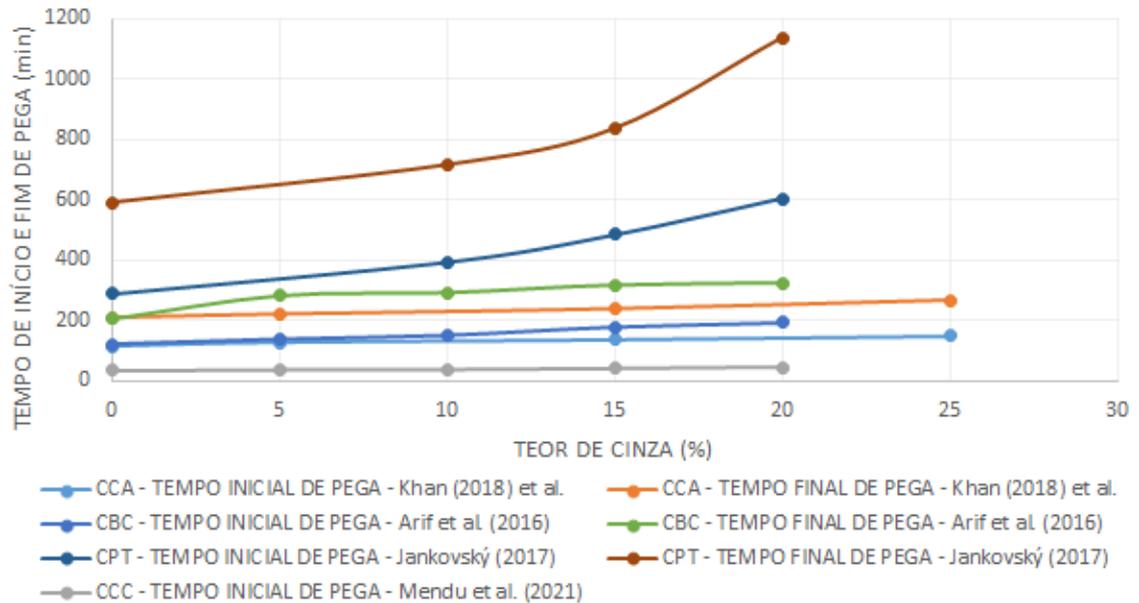
É importante ressaltar que os resultados tratados a seguir têm a intenção de apenas avaliar e ilustrar o impacto da adição de cada cinza quando comparada à sua amostra de controle, levando em consideração que os diferentes artigos não empregam necessariamente o mesmo traço, dosagem, teores de adição, etc. Logo, será apresentada a visão dos pesquisadores a respeito de suas respectivas cinzas e suas justificativas dentro de cada uma de suas pesquisas para os resultados obtidos e sempre que pertinente serão apresentadas as diferenças entre trabalhos.

4.1 Tempo de Pega

O tempo de pega se refere às etapas do processo de solidificação ou enrijecimento da pasta de cimento, e conseqüentemente, do concreto produzido a partir do cimento Portland. A norma brasileira NBR NM 65 (2003) estabelece o tempo de início de pega como, em condições normalizadas, o intervalo de tempo transcorrido desde a adição de água no cimento até o momento em que a agulha do aparelho de Vicat penetra na pasta até uma distância de 4 ± 1 mm da placa base. Já para o fim da pega, a norma define que este tempo ocorre quando a agulha estabiliza a 0,5 mm na pasta.

A Figura 5 ilustra os tempos de início e fim de pega para os diferentes resíduos agrícolas estudados. Nota-se que a substituição parcial do cimento Portland pelas quatro cinzas ocasionou, em todos os casos, o aumento do tempo de início de pega se comparado à amostra de controle. A adição de cinza que ocasionou o maior tempo de início de pega é a CPT no teor de 20 %, que aumentou em cerca de 315 min o tempo se comparado a amostra sem adição, causando um aumento de 80 %, totalizando 605 min. Já a cinza que provocou o menor aumento no tempo de início de pega foi a CCC no teor de 5 %, aumentando apenas 3 min se comparada a amostra de controle, equivalente a 9% de aumento, e um tempo de início de pega total de 38 min. Avaliando o teor de 15 % (o único em comum dos estudos) é possível determinar que a CCA provocou um acréscimo de 20 % no tempo de início de pega, assim como adição de CCC, sendo esses dois resíduos os que menos retardaram o enrijecimento do cimento. Já a adição de CBC aumentou em 48 % o tempo de início de pega, enquanto a CPT aumentou 67 % do tempo de início de pega.

Figura 5: Tempo de pega de diferentes resíduos agrícolas.



Fonte: Do Autor (2022).

O aumento do tempo de pega conforme o percentual de cinza na pasta aumenta, pode ser explicado, segundo Khan et al. (2018) pela menor velocidade do calor na reação, induzindo a uma evaporação da água da pasta. Já Jankovský (2017) justificou o significativo aumento no tempo de início de pega, causado pela adição de CPT à mistura, pela lentidão da reação pozolânica, se comparada com a reação de hidratação do cimento Portland puro. Arif et al. (2016) atribuíram a porosidade e angularidade das partículas de CBC, e consequentemente, maior demanda de água, como fator primordial para aumento do tempo de início de pega conforme aumenta-se o percentual de cinza. Além de também mencionar características individuais e variáveis provenientes do sistema caldeira/forno no qual a cinza foi gerada e que influenciam na reatividade dessa cinza como um todo.

As diferentes condições de cada ensaio têm influência no tempo de pega, e devem ser destacadas afim de contextualizar cada pesquisa avaliada. Khan et al. (2018) avaliaram a adição da CCA ao cimento Portland convencional tipo 1 da fábrica de cimento Cherat, localizada no Paquistão, e utilizaram como método de combustão da cinza uma queima contínua a temperatura de 800 °C durante 5 horas, ocasionando o aparecimento de cristobalita na cinza, além de uma proporção água cimento, por peso, de 0,48. A cinza contém 79,84 % de SiO₂ em sua composição química, sendo este o óxido mais predominante. Já Arif et. al (2016) avaliaram a adição de CBC ao cimento Portland convencional tipo 1 fabricado pela Sunstate Cement, com condições de combustão em patamares de temperaturas entre 570 °C e 870 °C durante 6 horas.

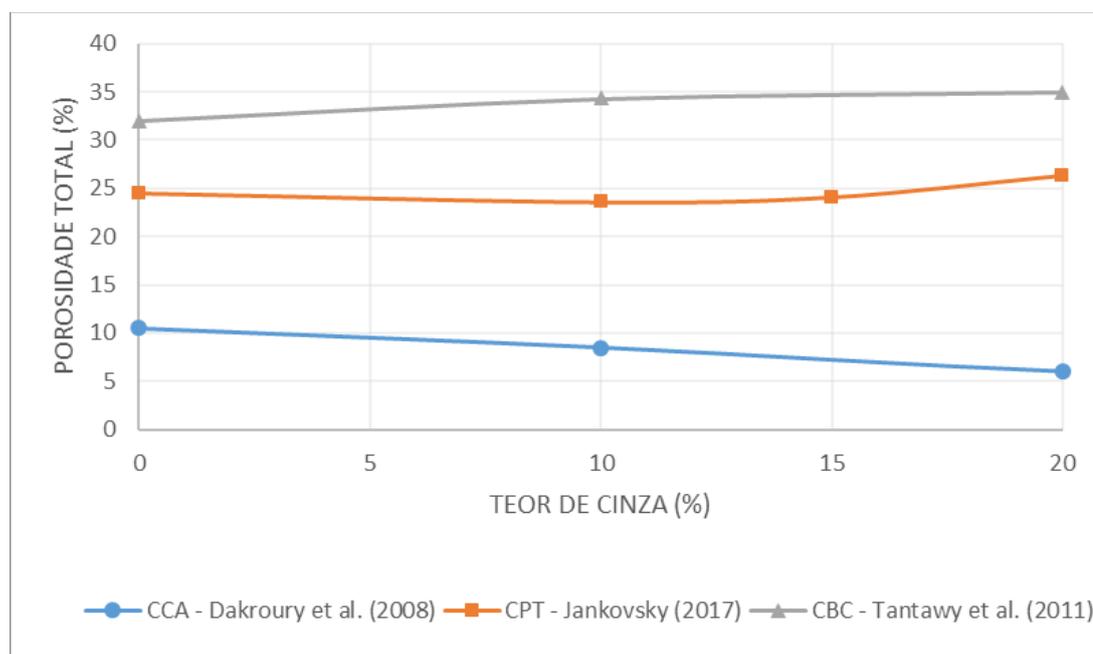
A proporção água cimento utilizada, por peso, foi de 0,6 e a composição química da CBC adicionada apresentava predominância de 78,5 % de SiO₂. Jankovský (2017) avaliou a adição de CPT ao cimento Portland tipo 1 produzido na fábrica Radotín Českomoravský após queima de 2 horas a 700 °C, seguida de moagem por 15 minutos em um moinho de discos vibratório. A proporção água cimento utilizada foi de 0,4 e a composição química da cinza apresentou porcentagem de 52,4 % de SiO₂. Por fim, o trabalho de Mendu et al. (2021) pesquisou a respeito da adição de CCC ao cimento Portland convencional tipo 1 produzido pela Ultra-Tech, a cinza passou por uma queima descontrolada inicial, sendo levada à mufla em sequência para queima a 600 °C por 2 horas. A composição química da cinza apresentou 37,67 % de SiO₂, sendo a cinza que apresentou menor quantidade dentre as avaliadas, e a proporção água cimento utilizada em todos os teores foi de 0,5. As diferentes proporções água cimento utilizadas por cada pesquisador influenciam diretamente nos resultados obtidos, tendo em vista que, segundo Mendu et al. (2021) a tendência conforme se aumenta a proporção água cimento é que o tempo de pega inicial também se prolongue.

4.2 Porosidade

O concreto é um material com certa porosidade, sendo impossível que seus vazios sejam totalmente preenchidos, o que interfere em sua durabilidade. A quantidade de água na hidratação do cimento quando superior à necessária, ao evaporar, deixa vazios; que diminuem os valores absolutos de cimento e água que entram em reação. A conexão desses vazios no concreto torna-o permeável à água, que por fim o torna suscetível as intempéries e a ação de agentes atmosféricos (PETRUCCI, 1998).

A Figura 6 ilustra a relação entre a porosidade e a adição de diferentes cinzas de resíduos em teores distintos. É possível notar o comportamento inicial em comum das pesquisas de Jankovský (2017) e Dakroury et al. (2008), com o decréscimo de porosidade conforme aumenta-se o teor de CPT e CCA, respectivamente, na mistura, enquanto para a CBC houve um acréscimo para todos teores avaliados. A adição que mais diminuiu a porosidade da mistura foi a CCA no teor de 30 %, que fez com que a porosidade diminuísse cerca de 6 %. Já adição que mais aumentou a porosidade em relação a amostra de controle foi a CBC ao teor de 20 %, provocando um acréscimo de 3 %. Avaliando o teor de 10 % de adição (comum as três pesquisas) é possível constatar que a CCA diminui em 2 % a porosidade total da mistura, enquanto a CBC aumentou em 2,3 % a porosidade da pasta de cimento. Por fim, a CPT provocou a diminuição de 0,9 % na porosidade quando adicionada ao teor de 10 %.

Figura 6: Relação entre teor de cinza e porosidade total.



Fonte: Do Autor (2022).

O comportamento da CPT na pesquisa de Jankovský (2017) pode ser explicado pela finura da cinza adicionada ao cimento Portland se comparada as outras pesquisas, o que fica evidente pela diferença de tempo de moagem na qual a CPT foi submetida (15 minutos), enquanto Dakroury et al. (2008) realizaram a moagem da CCA por 2 horas, acarretando num aumento significativo de área de superfície específica da cinza e consequentemente maior preenchimento de vazios na mistura. Os resultados de Tantawy et al. (2011) também podem ser explicados pelo processo de moagem ao qual a cinza foi submetida, tendo em vista que o tamanho médio das partículas de CBC adicionadas é três vezes maior que o tamanho médio das partículas de CCA utilizadas por Dakroury et al. (2008). Há um consenso entre pesquisadores, da influência do processo de moagem em que as partículas das cinzas são submetidas, reforçando o empacotamento entre as cinzas e os grãos de cimento, preenchendo assim os vazios e consequentemente diminuindo a permeabilidade da mistura (ANTIOHOS et al., 2014). Tantawy et al. (2011) ainda citam como fator para o aumento da porosidade o aumento na quantidade de água de amassamento necessária e a redução no teor de clínquer conforme é adicionado CBC na mistura.

As outras diferenças significativas entre cada pesquisa podem ter influência na porosidade de cada cinza avaliada, por isso cabem serem destacadas. A pesquisa de Dakroury et al. (2008) foi realizada sob condições de combustão de apenas alguns minutos em um forno de controle à temperatura de 800 °C, e a composição química da CCA adicionada ao cimento

Portland apresentou 87,2 % de SiO₂. As partículas de CCA têm tamanho médio 46 % menor do que as do cimento Portland convencional tipo 1 utilizado, e a proporção água cimento foi alterada conforme os teores aumentavam, para a amostra de controle a proporção era de 0,3, já para 10 % de adição a proporção utilizada foi 0,4 e para 20 % de adição a proporção água cimento foi de 0,45. Jankovský (2017) avaliou a adição de CPT após queima de 2 horas a 700 °C, seguida de moagem por 15 minutos em um moinho de discos vibratório, como citado anteriormente. A proporção água cimento utilizada foi de 0.4 para todos os teores e a cinza continha predominantemente SiO₂, no percentual de 52,4 %. Já Tantawy et al. (2011) queimou a CBC entre 700 °C e 800 °C por 3 horas num forno mufla, a composição química da cinza apresentava 75,23 % de SiO₂, e a proporção água cimento utilizada foi de 0,3. Essas diferentes condições levam a reatividades distintas que comprometem os produtos da reação pozolânica, além da proporção água cimento ser fator fundamental para a quantidade de vazios resultantes da hidratação do cimento Portland.

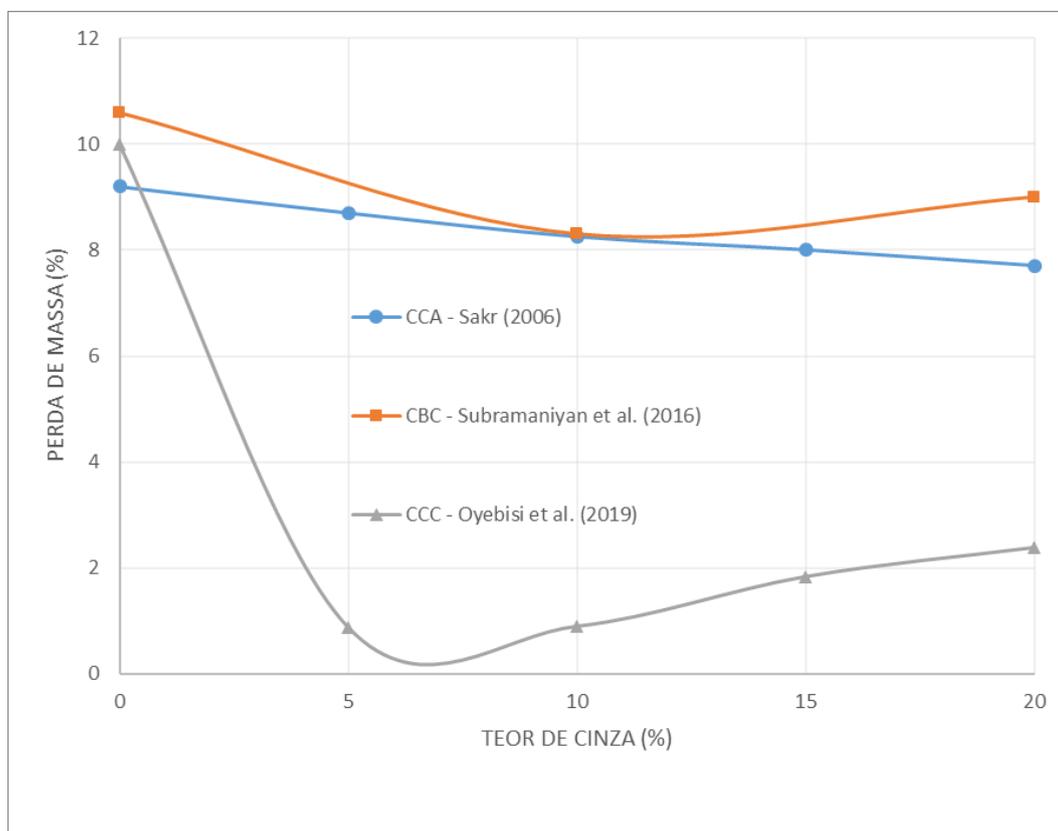
4.3 Resistência ao Sulfato

A degradação do concreto como resultado da reação entre os compostos de cimento hidratado existentes no concreto e os íons sulfatos oriundos de uma fonte externa e carregados pela água pode assumir duas manifestações distintas, a expansão do concreto ou a perda progressiva de resistência, rigidez e massa. As duas manifestações podem ocorrer concomitantemente, sendo que a predominância de uma delas é função da concentração da origem dos íons sulfatos, assim como do teor e constituição química do cimento (FILHO, 1994).

A Figura 7 ilustra os resultados obtidos para a resistência ao ataque de sulfato para as três pesquisas, relacionando os teores de adição de cada cinza e a respectiva perda de massa. É possível notar que as pesquisas obtiveram resultados com o mesmo comportamento inicial, com uma maior resistência ao sulfato conforme é adicionada a cinza, havendo um aumento conforme o teor ultrapassa 10 %. O menor valor entre as três pesquisas se deu na adição de 5 % de CCC que ocasionou a perda de massa de apenas 0,87 %, equivalente a uma redução de 9,23 % se comparada a amostra de controle. Enquanto o maior valor (fora as amostras de controle) foi ocasionado pela adição de 5 % de CCA, reduzindo 0,5 % do valor de referência. Avaliando o teor comum às três pesquisas (10 %) é possível perceber uma diminuição de 0,95 % de perda de massa devido a adição de CCA, enquanto a adição de 10 % de CBC diminuiu em 1,6 %. Por fim, a adição de CCC diminuiu em 9,11 % a perda de massa do cubo de concreto ensaiado, sendo a cinza que garantiu a menor perda de massa entre as pesquisas. Logo, é possível

constatar que as três pesquisas em quaisquer teores avaliados comprovam o aumento da resistência ao sulfato quando comparados à sua amostra de controle.

Figura 7: Relação entre teor de cinza e perda de massa.



Fonte: Do Autor (2022).

As pesquisas de Sakr (2006), Subramaniyan et al. (2021), e Oyebisi et al. (2019) investigaram a resistência do concreto (com adições de CCA, CBC, e CCC, respectivamente) ao sulfato, imergindo cubos de 100 mm em uma solução de 5% de $MgSO_4$. Foi constatado que a ruptura nas três pesquisas ocorre devido à resistência à compressão dos cubos em decorrência de um ataque de sulfato. Sakr (2006) constatou que a adição de 15 % de CCA ao concreto quando imerso numa solução de sulfato por 28 dias fez com que a resistência à compressão do corpo de prova diminuísse consideravelmente menos do que o concreto sem adição, considerando assim, 15 % seu teor ótimo de adição. Já Oyebisi et al. (2019) justificaram a significativa redução com a adição de CCC ao comportamento pozolânico do material que refina os poros do concreto, dilui a alita e remove a portlandita convertendo-a em um material cimentício, dando assim ao concreto com adição de CCC mais resistência ao ataque de sulfato do que o concreto convencional.

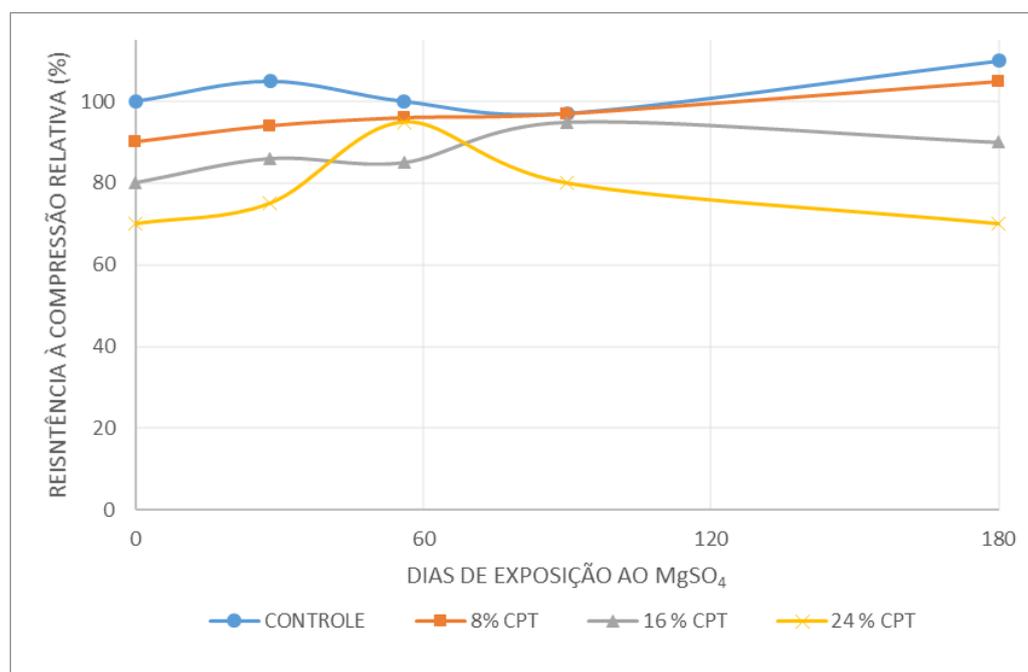
Tais pesquisadores limitaram o teor de adição de cinza afim de não influenciarem em outras propriedades avaliadas conjuntamente nas pesquisas. Segundo Wang et al. (2021) o aumento ilimitado da quantidade de cinza adicionada junto ao cimento Portland pode afetar outras propriedades de resistência, e, portanto, deve ser estudada mais afundo para futuras constatações.

Apesar das três pesquisas seguirem os mesmos ensaios normatizados, há diferença entre eles quanto ao método de preparo de cada cinza. Uma dessas diferenças, e que influencia diretamente nos resultados, é a condição de queima. Sakr (2006) realizou a queima da CCA na temperatura de 600 °C durante 3 horas, e utilizou uma proporção água cimento de 0,4. A composição química da cinza utilizada apresentava 87% de SiO₂, e foi adicionada ao cimento Portland convencional tipo 1 para a produção de um concreto de alta performance através da adição também de um superplastificante de 15 % de dosagem máxima afim de manter a trabalhabilidade constante sem adicionar água a mistura e sem prejudicar a resistência á compressão do concreto. Já Subramaniyan et al. (2021) optaram pela queima da CBC no intervalo entre 600 °C e 800 °C durante 2 horas, a proporção água cimento foi de 0,4 para todos os teores e a cinza adicionada ao cimento Portland convencional tipo 1 apresentava composição química com predominância de 76,67 % de SiO₂. Por fim, Oyebisi et al. (2019) realizaram a queima num forno a gás a uma temperatura de 750 °C durante 5 horas para obter a CCC. A proporção água cimento utilizada foi de 0,5 e o cimento Portland avaliado na pesquisa continha adição de calcário, tendo em sua composição química o percentual de 64,5 % de CaO. A cinza adicionada apresentava composição química com predominância de 63,87 % de SiO₂. Tais fatores afetam diretamente propriedades como a permeabilidade do concreto, que irão refletir nos resultados de resistência a íons sulfato, como por exemplo a adição de calcário utilizada por Oyebisi et al. (2019) que pode ter contribuído efeito físico de empacotamento entre as partículas, mesmo tendo a maior proporção água cimento.

A Figura 8 apresenta, neste contexto, resultados quando à perda de resistência à compressão devido ao ataque de sulfato para argamassas contendo diferentes teores de CPT. Biricik et al. (2000) realizaram o ensaio por um tempo de exposição de 180 dias em 40.000 mg/L de MgSO₄. É possível perceber que, com exceção da amostra com 24 % de CPT que permaneceu com a mesma resistência, as adições aumentaram a resistência à compressão das argamassas se comparadas à resistência inicial. A adição de 8 % e 16 % de CPT aumentou a resistência das argamassas em relação ao primeiro dia de exposição ao sulfato em 15 e 10 %, respectivamente. A amostra de controle teve um aumento de 10 % de resistência à compressão.

Ainda pode-se notar que a amostra com 8 % de adição de CPT foi a que menos sofreu quedas de resistência à compressão durante os 180 dias, seguindo um crescimento linear. Birick et al. (2000) optaram pela queima em condições controladas a uma temperatura de 670 °C por 5 horas e em seguida realizaram a moagem, que fez com que a área de superfície específica determinada da cinza fosse o dobro do cimento Portland convencional utilizado. A CPT incorporada às argamassas apresentava 73,06 % de SiO₂ em sua composição química.

Figura 8: Relação entre tempo de exposição ao sulfato e resistência à compressão relativa.



Fonte: Biricik et al. (2000).

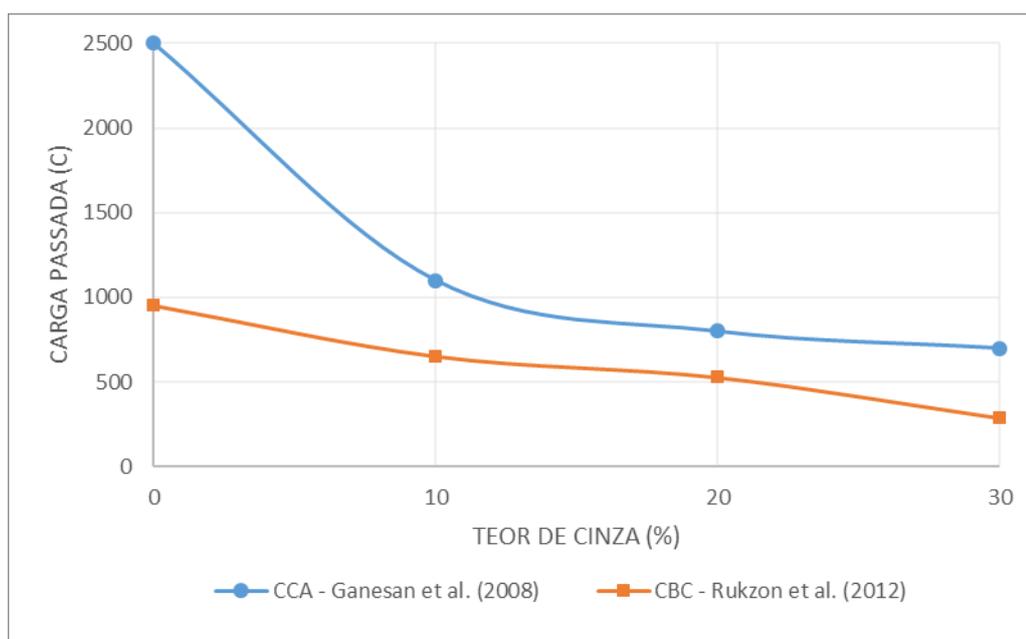
4.4 Resistência à Penetração de Íons Cloreto

O ataque por íons cloretos no concreto se dá através da destruição da camada protetora das armaduras, permitindo, na presença de ambiente úmido, que os íons de cloreto se fixem ao redor das armaduras e originem a corrosão provocando a perda de seção transversal da armadura, formação de óxidos e hidróxidos que provocam fissurações na camada de cobrimento e ruptura na ligação entre o concreto e armadura (SISTONEN, 2009).

A Figura 9 apresenta os resultados das pesquisas de Ganesan et al. (2008) e Rukzon et al. (2012), quanto a adição de CCA e CBC, respectivamente, e a quantidade de carga passada para diferentes teores de cinza. Os ensaios foram realizados conforme a ASTM C1202 (2019) e nota-se que a substituição parcial do cimento Portland pela cinza dos dois resíduos provocou a diminuição na quantidade de carga transportada no ensaio. A adição de 10 % de CCA reduziu

em 56 % a quantidade de carga passada, enquanto a adição de 10 % de CBC reduziu em 32 %. Para o teor de 20 % a CCA reduziu em 68 % a quantidade de carga, já a adição de CBC reduziu em 48 %. Por fim, o teor de 30 % de CCA reduziu 72 % da quantidade de carga, e a adição de CBC reduziu em 70 %. Portanto, notamos que conforme o teor de cinza na mistura aumenta, há menos penetração de íons cloretos, reduzindo assim o fluxo elétrico linearmente.

Figura 9: Relação entre teores de cinza e quantidade de carga passada.



Fonte: Do Autor (2022).

Segundo Rattanachu et al. (2020) a reação pozolânica, e consequente aumento de C-S-H, faz com que a adsorção física do íon cloreto seja melhorada e a estrutura dos poros gradualmente densa reduz o caminho de difusão do íon cloreto. Rukzon et al. (2012) justificam a diminuição na quantidade de carga passada pela finura das partículas de CBC, consideravelmente mais finas que as de cimento Portland convencional, o que acarreta na segmentação dos poros dilatados dando origem a locais de nucleação para os produtos da reação pozolânica na pasta. Ganesan et al. (2008) justifica os valores mais altos de carga passada pelo concreto com adição de CCA à quantidade de carbono presente na cinza, o que pode ter contribuído para a permeabilidade do meio à íons cloreto. Não foram encontradas pesquisas que investigam a resistência à penetração de cloreto para a CCC e CPT através de testes rápidos de permeabilidade ao cloreto (RCPT) o que impediu a comparação com os estudos de Ganesan et al. (2008) e Rukzon et al. (2012).

As principais diferenças entre os preparos das cinzas se dão às condições de queima. Ganesan et al. (2008) realizaram uma queima não controlada no intervalo de 300 °C a 450 °C convertendo a casca de arroz em cinza, entretanto, a cinza apresentava grande quantidade de carbono em sua composição química mesmo após o tratamento térmico realizado sob condições controladas, o que poderia influenciar os resultados de penetração de íons cloreto, permitindo sua permeabilidade no meio. A CCA foi adicionada ao cimento Portland convencional tipo 1 numa proporção água cimento de 0,53, e continha em sua composição 87,32 % de SiO₂. Já Rukzon et al. (2012) estabeleceu a temperatura de queima constante em 500 °C durante 3 horas, e definiu para todos os teores de CBC a proporção água cimento de 0,3, por se tratar de um concreto de alto desempenho desenvolvido a partir de cimento Portland convencional tipo 1 e com a adição de um superplastificante para manter a trabalhabilidade alta. A CBC avaliada apresentava predominantemente 65 % de SiO₂ e 3,9 % de CaO. Os menores valores de carga passada podem ser atribuídos a menor permeabilidade do concreto contendo CBC, tendo em vista que se trata da amostra com menor proporção água cimento, o que pode ser explicado pela menor quantidade de água disponível para evaporar e deixar vazios no concreto deixando-o mais permeável à penetração de íons cloreto.

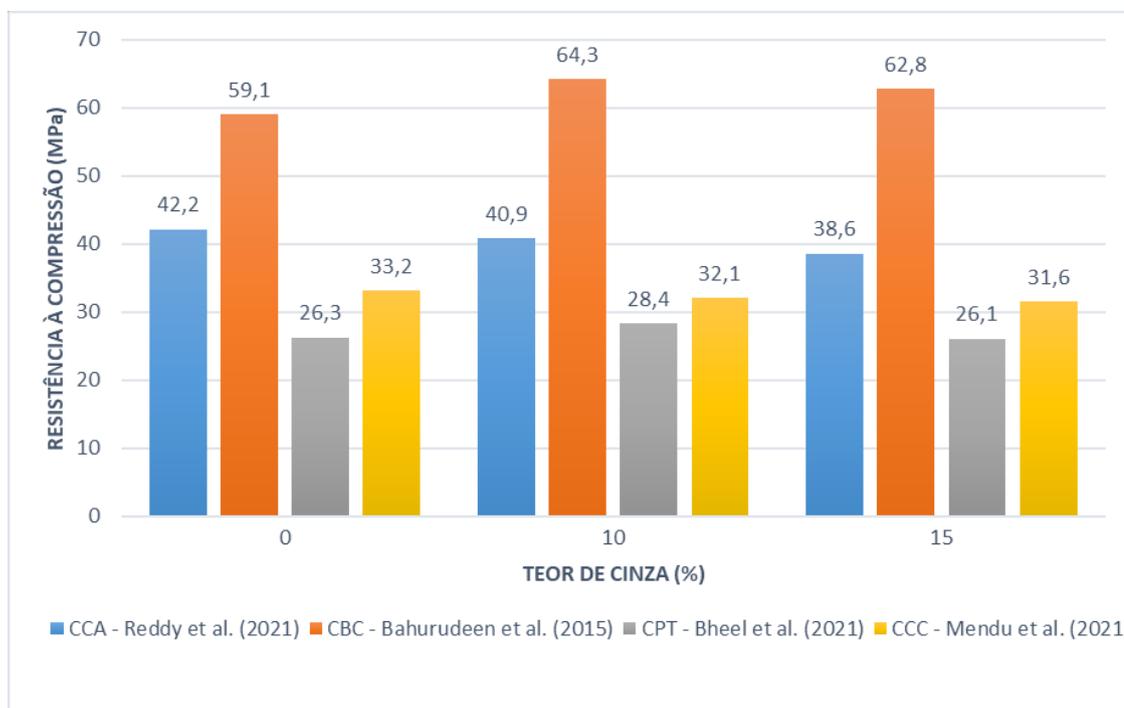
4.5 Resistência à Compressão

A compressão é um esforço axial, sendo assim, no ensaio de compressão, os corpos de prova são submetidos a uma força axial, distribuída de modo uniforme em toda a seção transversal do corpo de prova, que tende a provocar o encurtamento do corpo.

A Figura 10 ilustra resultados de resistência à compressão, para uma cura de 28 dias, de diferentes pesquisas relacionando os teores de cinza investigadas com os ganhos de resistência à compressão com as adições. O maior valor de resistência à compressão se deu devido a adição de 10 % de CBC, resistindo 64,3 MPa, enquanto o menor valor obtido se deu com a adição de 15 % de CPT, resistindo 26,1 MPa. Podemos notar que duas das cinzas avaliadas tiveram quedas nos valores de resistências à compressão para os três teores determinados, sendo elas a CCA e a CCC, enquanto as outras duas cinzas, CBC e CPT, tiveram um ganho de resistência ao teor de 10 % seguido de uma queda no teor de 15 %. Avaliando o teor de 10 % para todas as cinzas e comparando-as com as amostras de controle, notamos que a CCA provocou o decréscimo de 3 % na resistência à compressão, enquanto a CBC causou o acréscimo de 8,8 %, já a CPT aumentou em 8 %, por fim, a adição de CCC diminuiu em 3,3 % a resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados. Para o teor de 15 % notamos que a CCA diminuiu em 8,5 % a resistência à compressão em relação a amostra de controle, enquanto a CBC causou

um acréscimo de 6,2 %, a CPT reduziu em 0,7 % e por último a adição de 15 % de CCC reduziu em 4,8 % a resistência à compressão.

Figura 10: Relação entre teor de cinza e resistência à compressão no concreto.



Fonte: Do autor (2022).

As pesquisas de Reddy et al. (2021) e Mendu et al. (2021), que apresentaram resultados de redução na resistência a compressão para os teores avaliados, apontaram como seus teores ótimos os percentuais de 7,5 % de CCA e 15 % de CCC respectivamente. A adição de 7,5 % de CCA resultou no aumento de 3 % na resistência à compressão com 28 dias de cura, se comparada a amostra de controle, sendo este o maior valor obtido na pesquisa. Já a adição de 15 % de CCC, que reduziu a resistência à compressão aos 28 dias em relação à amostra de controle, com 56 dias de cura provoca um aumento significativo de 22 %, e aos 365 dias um aumento de 44,6 %, se mostrando uma adição viável para tempos mais longos de cura. Segundo Bheel et al. (2021) o menor valor de resistência à compressão obtido para a adição de CPT pode ser associado com a amostra com a maior proporção água cimento, que juntamente com os agregados graúdos, reduzem a quantidade de cimento Portland por volume de concreto. Já o acréscimo obtido no teor de 10 % de CPT foi justificado pelo efeito filler e pela reação pozolânica proveniente da CPT, entretanto, para teores maiores que 10 % há uma limitação na quantidade de hidróxido de cálcio para reagir com a sílica e dar origem aos produtos dessa reação, comprometendo a resistência à compressão. Por fim, a pesquisa de Bahurudeen et al.

(2015) constatou que a adição de CBC melhorou a resistência à compressão até mesmo para 3 dias de cura e teve resultados melhores que o concreto feito a partir de cimento Portland convencional em todos os teores até 25 %.

Os diferentes métodos aplicados pelos pesquisadores quanto a queima dos resíduos e preparo das amostras influenciam na resistência à compressão e merecem ser destacados. Reddy et al. (2021) optaram por uma queima controlada em temperaturas variando de 50 °C a 800 °C por 24 horas, seguido de 48 horas esfriando até a cinza estabilizar em temperatura ambiente. Esse método foi aplicado afim de conseguir a sílica majoritariamente em sua fase amorfa. A CCA obtida da queima possui em sua composição química 86,94 % de SiO₂, e foi adicionada ao cimento Portland convencional tipo 1 numa proporção água cimento de 0,39 para todos os teores. Já Bahurudeen et al. (2015) realizaram a queima da CBC a temperaturas controladas entre 500 °C e 550 °C seguindo os valores ótimos obtidos por Cordeiro et al. (2009). A composição química do bagaço de cana apresenta em sua composição 72,95 % de SiO₂ e foi adicionada ao cimento Portland convencional tipo 1 com proporção água cimento de 0,45 para todos os teores avaliados. Foi notado que a presença de partículas fibrosas residuais na CBC adicionada ao concreto causaram redução na atividade pozolânica da amostra, e que a maior atividade pozolânica se deu através da moagem até a finura de 300 m²/kg. Bheel et al. (2021) queimaram a CPT sem controle de temperatura durante 10 horas e logo em sequência deixaram 24 horas esfriando. A composição química da CPT apresenta 67,34 % de SiO₂, e foi adicionada ao cimento Portland convencional tipo 1 na proporção água cimento de 0,5, inicialmente com a mistura seca entre os aglomerantes e agregados, com a adição de água logo em seguida. Por fim, Mendu et. al (2021) adicionaram CCC ao cimento Portland convencional tipo 1, a cinza passou por uma queima descontrolada inicial e depois por uma queima controlada a 600 °C por 2 horas. A composição química da cinza apresentou 37,67 % de SiO₂, e a proporção água cimento utilizada em todos os teores foi de 0,5.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões apresentados no tópico acima, as seguintes conclusões foram obtidas.

1. A adição de cinza de resíduos agrícolas aumentou o tempo de início de pega para todos os resíduos e teores avaliados, sendo esse aumento proporcional a quantidade de cinza adicionada, o que pode ser atribuído a uma maior demanda hídrica da mistura. A CPT e CBC são as cinzas que mais retardam o enrijecimento da pasta, enquanto a CCA e CCC se comportam de maneira semelhante, retardando o enrijecimento em menor proporção.

2. A CBC, que se trata da cinza com a menor finura dentre os resíduos avaliados, aumentou a porosidade para todos os teores analisados, enquanto a CCA, submetida a 2 horas de moagem, diminuiu a porosidade para todos os teores. Tal fato pode ser explicado pelo preenchimento dos vazios pelas partículas mais finas ocasionando, conseqüentemente, uma menor permeabilidade. A CPT obteve desempenho intermediário entre as três cinzas, com uma diminuição na porosidade seguida de um aumento percentual.

3. As três cinzas de resíduos avaliadas no concreto (CCA, CBC e CCC) se mostraram eficazes no aumento da resistência ao sulfato em relação ao concreto feito a partir do cimento Portland convencional, enquanto a CPT, avaliada junto a argamassas, em 2 dos 3 teores ensaiados, aumentou a resistência à compressão das argamassas se comparadas à resistência inicial durante 180 dias de exposição ao sulfato.

4. Adições de CCA e CBC apresentam uma maior resistência à penetração de íons cloreto conforme o teor de adição aumenta, reduzindo o fluxo elétrico linearmente.

5. A adição de CBC se mostrou viável para cura do concreto de 28 dias aumentando a resistência à compressão nos teores avaliados, já a CCA tem como seu teor ótimo 7,5 % de adição, garantindo o maior aumento de resistência à compressão em 28 dias, a CCC, por outro lado, se mostrou viável para maiores tempos de cura (56 e 365 dias) resultando em significativos ganhos de resistência e por fim, a CPT ao teor de 10 % mostrou ganhos de resistência à compressão relacionados a reação pozolânica e efeito filler.

É possível concluir que a adição de cinzas de resíduos agrícolas se mostra viável principalmente pelos ganhos nas propriedades relacionadas a durabilidade como resistência ao sulfato e resistência a penetração de cloreto, além de serem eficiente no retardamento do enrijecimento do cimento.

Recomenda-se mais estudos a respeito do teor ótimo de cada cinza de resíduo, visando aplicações específicas em concretos e argamassas. Tendo isso em vista, sugere-se para

pesquisas a serem realizadas futuramente a avaliação da influência do teor de CCC na porosidade da mistura cimento-cinza e testes rápidos de permeabilidade ao cloreto para a CCC e CPT afim de avaliar a resistência à penetração de íons cloreto causada pela adição de cinza.

REFERÊNCIAS

AGOSTINI-COSTA, T. S.; SANTOS, J. R.; GARRUTI, D. S.; FEITOSA, T. Caracterização, por cromatografia em camada delgada, dos compostos fenólicos presentes em pedúnculos de caju. **Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos**, v. 18, n. 1, p. 129-137, 2000.

AL-AKHRAS, N. M. Durability of Wheat Straw ash Concrete to Alkali-Silica Reaction. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials**, v. 166, p.65-70, 2013.

AL-SWAIDANI, AREF M.; KHWIES, WAED T. Applicability of Artificial Neural Networks to Predict Mechanical and Permeability Properties of Volcanic Scoria-Based Concrete. **Advances in Civil Engineering**, v. 3, n. 1, p. 88-103, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 1202/2019**. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 618/2005**. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C150/2019**. Standard Specification for Portland Cement. ASTM, 2019.

AMIN, M. N.; MURTAZA, T.; SHAHZADA, K.; KHAN, K.; ADIL, M. Pozzolanic Potential and Mechanical Performance of Wheat Straw Ash Incorporated Sustainable Concrete. **Sustainability Conference**. v. 5, p.65-70, 2019.

ANTIOHOS, S.; PAPADAKIS, V.G.; TSIMAS, STAMATIS. Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. **Cement and Concrete Research**. v.1, p.77-83, 2014.

ANWAR, M., MIYAGAWA, T.; GAWEESH, M. Using rice husk ash as a cement replacement material in concrete. **In the Proceedings of the 2001 First International Ecological Building Structure Conference**. p. 671- 684, 2001.

ARIF, E.; CLARK, M.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 294–301, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**. Cimento Portland. Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ATAIE, F.F.; RIDING, K.A. Influence of agricultural residue ash on early cement hydration and chemical admixtures adsorption. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 274–281, 2016

ATAIE, F.F.; RIDING, K.A. Thermochemical pretreatments for agricultural residue ash production for concrete. **J. Mater. Civ. Eng**, 25, 1703–1711, 2013.

BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M. Influence of Different Processing Methods on the Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. **Cement and Concrete Composites**. p.32-45, 2015.

BHEEL, N.; IBRAHIM, M. H. W.; ADESINA, A.; KENNEDY, C.; SHAR, I. A. Mechanical performance of concrete incorporating wheat straw ash as partial replacement of cement. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. p. 1-7, 2021

BIRICIK, H.; AKOZ, F.; IHAN, I.B.; TULGAR, A.N. Study of pozzolanic properties of wheat straw ash. **Cement and Concrete Research**. v. 29, p. 637–643, 2000.

BLOND, J.S.L. et al. Generation of crystalline silica from sugarcane burning. **Journal of Environmental Monitoring**, p. 1459-1470, 2010.

BONDIOLI, F.; BARBIERI, L.; FERRARI, A. M.; MANFREDINI, T. Characterization of rice husk ash and its recycling as quartz substitute for the production of ceramic glazes. **Journal of the American Ceramic Society**. v. 93, n. 1, p. 121–126, 2010

CHU, D. C.; KLEIB, J.; AMAR, M.; BENZERZOUR, M.; ABRIAK, N. Determination of the degree of hydration of Portland cement using three different approaches: Scanning electron microscopy (SEM-BSE) and Thermogravimetric analysis (TGA). **Case Studies in Construction Materials**. v. 4, p. 17-21, 2021.

CINCOTTO, M. A. **Materiais pozolânicos**. 2007. PCC/EPUSP. 2007.

CINCOTTO, M. A. **Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. Tecnologia das edificações**. São Paulo: PINI, 1988.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2019/2020**. 2020.

CORDEIRO et al. Caracterização de cinza do bagaço de cana de açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**. v. 32, n. 1, pp. 82-86, 2009.

CORDEIRO, G. C.; et al. Avaliação da reatividade da cinza residual do bagaço de cana de açúcar com cimento Portland e cal. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. **Anais eletrônicos...** Olinda, Brasil : IBRACON. CD-ROM, 2005.

COUTINHO A.S, **Fabrico e propriedades do betão**. Laboratório de Engenharia Civil, v. 1, p. 610, Portugal, 1973.

DAKROURY, A.E.; GASSER, M.S. Rice husk ash (RHA) as cement admixture for immobilization of liquid radioactive waste at different temperatures. **Journal of Nuclear Materials**, p.7–18, 2008.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Weath**. Rome. 2017.

FILHO, L. C. P. da S. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: Análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica**. UFRGS, (Construção), p. 1–136, 1994.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 12, n. 5, p. 282–288, 2007.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**. p. 1675–1683, 2008.

- GOLEMAN, D.; BOYATZIS, R.; MCKEE, A.. Toward a Sustainable Cement Industry. **Journal of Chemical Information and Modeling**. v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2019.
- HU, L.; HE, Z.; ZHANG, S. Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement. **Journal of Cleaner Production**. v. 21, n. 3, p. 98–123, 2020.
- IKUMAPAYI, C. M.; ARUM, C.; ALANEME, K. K. Reactivity and hydration behavior in groundnut shell ash based pozzolanic concrete. **Materials Today: Proceedings**. v. 38, p. 508–513, 2021.
- ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**. v. 4, n. 2, p. 19–30, 2004.
- JANKOVSKÝ, O. Study on pozzolana activity of wheat straw ash as potential admixture for blended cements. **Ceramics**. Silikaty, 2017.
- JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**. Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento. 113 p. Tese Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- JOHN, V. M.; et al. Cinzas e aglomerantes alternativos. **In: Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Editora da UNICAMP, p. 145-190. Campinas, 2003.
- KANNAN, V. Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**. v. 4, p. 117–139, 2018.
- KHAN, W.; SHAHZADA, K.; BIBI, T.; ISLAM, S.; KHAN, S. Performance Evaluation of Khyber Pakhtunkhwa Rice Husk Ash (RHA) in Improving Mechanical Behavior of Cement. **Construction and Building Materials**. p. 101-108, 2018.
- LI, V. C. Can concrete be bendable?: The notoriously brittle building material may yet stretch instead of breaking. **American Scientist**. v. 100, n. 6, p. 484–493, 2012.
- LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju**. p. 139, 2008.
- LIMA, S.F.; ROSSIGNOLO, J.A. Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios. **Acta Scientiarum: Technology**, 2010.
- LINS, L. N. **Estudo da aplicação da casca de café na indústria da construção**. Universidade Federal Fluminense, 2006.
- LUHAR, S.; CHENG, T. W.; LUHAR, I. Incorporation of natural waste from agricultural and aquacultural farming as supplementary materials with green concrete: A review. **Composites Part B: Engineering**. v. 175, 2019.
- MAURY, M. B. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**. v. 3, n. 1, p. 75–95, 2012.
- MEHTA, P. K. Rice Husk Ash-A Unique Supplementary Cementing Material. **Proceedings of the International Symposium on Advances in Concrete Technology**. Athens, Greece. 1992.

- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.
- MENDU, J. K.; PANNEM, R. M. Assessment of mechanical properties of cashew nut shell ash blended concrete. **Innovative Infrastructure Solutions**. n. 1, p. 34–38. 2021.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.
- OYEBISI, S. O.; TOBIT, I.; ONIYIDE, D. Performance evaluation of cashew nutshell ash as a binder in concrete production. **Case Studies in Construction Materials**. p.676-681. 2019.
- PAIVA, F. F. A.; GARRUTI, D. S.; SILVA NETO, R. M. **Aproveitamento industrial do caju**. Fortaleza: Embrapa/Sebrae, 2000.
- PAVYLÍKOVÁ, M. et al. **Study on pozzolana activity of wheat straw ash as potential admixture for blended cements**. n. 1, p. 75–97 2017
- PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. v.13. Ed. Globo. São Paulo, 1998.
- PRUDÊNCIO Jr, L. R.; et al. **Cinza da casca de arroz**. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Coleção Habitar. v.4, ANTAC, Porto Alegre, 2003.
- RATTANACHU, P.; TOOLKASIKORN, P.; TANGCHIRAPAT, W.; CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C. Performance of Recycled Aggregate Concrete with Rice Husk Ash as Cement Binder. **Cement and Concrete Composites**. 2020.
- REDDY, K. R., HARIHANAND, M.; MURALI, K. Strength performance of high-grade concrete using rice husk ash (RHA) as cement replacement material. **Materials Today: Proceedings**. v. 128. p. 57-65. 2021
- ROSA, G. R. **Anuário Brasileiro de Arroz 2005**. Santa Cruz do Sul. Ed Três. Gazeta Santa Cruz, 136p, 2005.
- RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials & Design**. v. 34, p 45-50, 2012.
- SAKR, K. Effects of Silica Fume and Rice Husk Ash on the Properties of Heavy Weight Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 11, p 565-581, 2006.
- SILVA, M. G. E SOUZA, F. L. S. Proposta de Utilização de Resíduos da Indústria de Celulose/papel e Entulho de Obra em Componentes de Construção. Rio de Janeiro: **Anais... ENTAC-95**, v. 2, 1995.
- SILVEIRA, A. A.; RUARO, P. **A adição de cinza de casca de arroz em concretos: estudo da influência do tipo de cinza na resistência à compressão e na microestrutura do concreto**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- SISTONEN, E. **Service life of hot-dip galvanised reinforcement bars in carbonated and chloride-contaminated concrete**. v. 1, p. 34-51, 2009
- SOUZA G. N.; et al. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana de açúcar. **49o Congresso Brasileiro do Concreto**, São Paulo, SP: IBRACON. 2007.

SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B.; LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**. v. 92, n. 10, p. 2774–2780, 2011.

SUBRAMANIYAN, K.S.; SIYARAJA, M. Assessment of sugarcane bagasse ash concrete on mechanical and durability properties. **Advances in Natural and Applied Sciences**, vol. 10, no. 9, p. 253, 2016.

TANG, S.; YANG, W., ZHICHEN, G.; XIAOFEI, X.; WENZHI, Y., HUBAO, A.; JINGTAO, C. Structure, Fractality, Mechanics and Durability of Calcium Silicate Hydrates. **Fractal and Fractional**. n. 2, p.47. 2021.

TANTAWY, M.; EL-ROUDI, A.; SALEM, A. Immobilization of Cr(VI) in bagasse ash blended cement pastes. **Construction and Building Materials**. v.30, p. 140-153. 2012.

WANG, J.; XIAO, J.; ZHANG, Z.; HAN, K.; HU, X.; JIANG, F. Action mechanism of rice husk ash and the effect on main performances of cement-based materials: A review. **Construction and Building Materials**. 2021.