



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA – UEPB
CENTRO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SAÚDE – CCTS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

AÉRCIO OLIVEIRA DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO EXPOSTO AO
ATAQUE POR SULFATOS**

ARARUNA- PB

2022

AÉRCIO OLIVEIRA DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO EXPOSTO AO
ATAQUE POR SULFATOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Estadual da Paraíba, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Materiais de construção

Orientador(a): Ana Paula Araújo Almeida

ARARUNA- PB

2022

Ficha catalográfica

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586a Silva, Aercio Oliveira da.
Análise da influência da substituição parcial de cinza de casca de arroz na resistência do concreto exposto ao ataque por sulfatos [manuscrito] / Aercio Oliveira da Silva. - 2022.
62 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Ana Paula Araújo Almeida ,
Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

"Coorientação: Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha ,
Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Análise de estrutura. 2. Material de construção. 3.
Concreto. I. Título

21. ed. CDD 624.171

AÉRCIO OLIVEIRA DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO EXPOSTO AO
ATAQUE POR SULFATOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Estadual da Paraíba, como requisito
para obtenção do título de Bacharelado em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Materiais de construção.

Aprovada em: 31 / 03/ 2022

BANCA EXAMINADORA



Prof(a). Dr(a). Ana Paula Araújo Almeida

(Orientadora)

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Membro da Banca

P

Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha

Campos (Coorientador)

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Membro da Banca

Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A minha gratidão aos meus queridos pais
José e Wanda, pela grande dedicação,
conselhos, incentivo, e companheirismo,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por nunca me abandonar, e sempre estar ao meu lado em todas as ocasiões, mesmo diante de grandes dificuldades, sempre me guiou pelos melhores caminhos, para que eu pudesse realizar meu sonho de concluir o curso de Engenharia Civil.

Aos meus pais, José e Wanda, que sempre estiveram ao meu lado e fizeram de tudo para que esse sonho se tornasse realidade. Me motivaram, ensinaram a agir com humildade, honestidade e educação, nunca mediram esforços para me ajudar nessa caminhada, a eles, minha eterna gratidão.

À minha orientadora, Ana Paula, agradeço por todas as oportunidades a mim oferecidas durante todo o curso, como monitoria, Probex, Pibic e ter me aceitado como orientando. Com certeza, agregou muito no meu conhecimento adquirido no curso. Obrigado por todo apoio na pesquisa, sempre disponível para tirar dúvidas, com paciência e sugestões, contribuíram para termos êxito no trabalho. Foi um prazer trabalhar com a senhora.

À todo corpo docente da UEPB-Campus VIII, obrigado por todo ensinamento transmitido durante a graduação. Ao professor Daniel Baracuy, muito obrigado por aceitar ser meu coorientador, sempre disponível para tirar dúvidas e sugestões para realização dos ensaios. O professor Alan Barbosa, agradeço por ter aceito a compor minha banca.

Aos técnicos de Laboratório, Divaldo, Kaká (carinhosamente chamado) e Wellington, que nos auxiliaram e em todos ensaios necessários.

Aos meus amigos de classe, um abraço a todos, em especial a Gabriel Paz, Vítor Bonfim e Luciano, pela amizade, companherismo, os incentivo em momentos difíceis do curso, forte abraço.

A todos os meus amigos, os quais não posso citar nomes, pois são muitos, obrigado todo incentivo e ajuda durante todo esse período, nossa amizade sempre permanecerá a mesma. Enfim, agradeço a todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para essa conquista.

*“Consagre ao senhor tudo que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos”.*

Provérbios 16:3

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a resistência a compressão aos ataques por sulfatos de concretos com adição de cinza de casca de arroz obtida a partir de tratamento térmico em temperaturas controladas de 400°C e 600°C, visando estabelecer a melhor relação entre os parâmetros avaliados e a resistência a compressão das amostras. A incorporação como adição mineral da cinza de casca de arroz em argamassas e concretos, constitui-se de uma alternativa para solucionar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, além de gerar concretos mais resistentes com porosidade desconectada e mais durável frente a vários meios agressivos. O mais significativo agente agressivo ao concreto de fundações é o sulfato, que tem ocorrência natural nos solos e em suas águas. A execução dos experimentos ocorreu em etapas, cujo inicialmente foi realizado o tratamento térmico da casca de arroz para obtenção das cinzas, em seguida, procedeu-se à caracterização dos agregados, dosagem do concreto e determinação do traço para a adição de CCA na proporção de 3% e 5% em substituição parcial ao cimento para cada temperatura de tratamento. Posteriormente foi realizada a moldagem dos corpos de prova, e o processo de cura. A cura convencional foi empregada para uma das amostras de referência A, e o processo de cura em solução agressiva de sulfato de sódio (Na_2SO_4) foi empregado para as demais amostras (B, C, D, E e F). Na última etapa foi realizado o rompimento dos corpos de prova, através do ensaio de compressão axial, para verificação da resistência a compressão segundo a NBR- 5739:2018. Os resultados mostraram um incremento de 3% para 5% de adição de CCA resultou no aumento da resistência à compressão do concreto. Houve aumento da resistência de 29,33 Mpa para 30,71 Mpa com o aumento da temperatura de queima de 400° para 600°C, para as amostras contendo 5% de CCA. Todas as amostras com adição de CCA apresentaram aumento da resistência média à compressão em relação ao concreto de referência B em 26,32%, 31,51%, 21,70% e 37,70% para as amostras B, C, D, E e F respectivamente.

Palavras-Chave: Cinza de Casca de Arroz. Ataque por Sulfato. Concreto

ABSTRACT

The present work aimed to evaluate the compressive strength to attacks by sulfates of concrete with the addition of rice husk ash obtained from heat treatment at controlled temperatures of 400°C and 600°C, aiming to establish the best relationship between the evaluated parameters and the compressive strength of the samples. The incorporation as a mineral addition of rice husk ash in mortars and concretes constitutes an alternative to solve the problem of ash disposal in the environment, in addition to generating more resistant concretes with disconnected porosity and more durable against various aggressive media. . The most significant aggressive agent to foundation concrete is sulfate, which occurs naturally in soils and their waters. The experiments were carried out in stages, in which initially the heat treatment of rice husk was carried out to obtain the ash, then the characterization of the aggregates, concrete dosage and determination of the trace for the addition of CCA in the proportion of 3% and 5% in partial replacement of cement for each treatment temperature. Subsequently, the molding of the specimens was carried out, and the curing process. Conventional curing was used for one of the reference samples A, and the curing process in an aggressive solution of sodium sulfate (Na_2SO_4) was used for the other samples (B, C, D, E and F). In the last stage, the specimens were broken through the axial compression test, to verify the compressive strength according to NBR-5739:2018. The results showed an increase from 3% to 5% of the addition of CCA resulted in an increase in the compressive strength of the concrete. There was an increase in strength from 29.33 Mpa to 30.71 Mpa with increasing firing temperature from 400° to 600°C, for samples containing 5% of CCA. All samples with the addition of CCA showed an increase in the average compressive strength in relation to the reference concrete B by 26.32%, 31.51%, 21.70% 3 37.70% for samples B, C, D, E and F respectively.

Key Words: Rice Husk Ash. Sulfate Attack. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Secagem da casca de arroz na estufa.	31
Figura 2	Queima da casca de arroz na estufa	31
Figura 3	Obtenção da CCA.	32
Figura 4	Peneiramento da amostra de agregado miúdo.....	33
Figura 5	Processo de cura convencional.	36
Figura 6	Mistura das cinzas com o cimento.	37
Figura 7	Ambiente saturado com óxido de cálcio (cal).....	37
Figura 8	Ambiente de agressividade (sulfato de sódio).	38
Figura 9	Ensaio Slump test.....	38
Figura 10	Tabela 2 da NBR 7211:2005.....	43
Figura 11	Amostra de referência.	48
Figura 12	Amostra de 3% de CCA.....	48
Figura 13	Amostra de 5% de CCA.....	48
Figura 14	Corpo de prova posicionado na prensa.	50
Figura 15	Corpo de prova rompido	50

LISTA DE TABELA

Tabela 1	Parâmetros físicos e químicos do cimento CP II-F-32.	32
Tabela 2	Massas específicas e unitárias utilizadas no traço.....	35
Tabela 3	Teor de umidade do agregado miúdo.....	40
Tabela 4	Composição granulométrica do agregado miúdo.....	40
Tabela 5	Classificação da areia de acordo com o módulo de finura.	41
Tabela 6	Consumo de água em l/m ³	44
Tabela 7	Obtenção do volume compactado seco do agregado graúdo, em função do módulo de finura da areia pelo diâmetro do agregado graúdo	45
Tabela 8	Proporção com substituição parcial de CCA.....	46
Tabela 9	Valores do ensaio do Slump test das amostras.....	47
Tabela 10	Determinação do índice de atividade pozzolânica (IAP).....	49
Tabela 11	Resistência a compressão da amostra de referência submetida a cura convencional.....	51
Tabela 12	Resistência a compressão das amostras com adição de CCA submetidas a cura em solução agressiva.....	51
Tabela 13	Relação entre resistência média das amostras e temperatura de queima	53

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Módulo de finura do agregado miúdo.....	33
Equação 2	Umidade do agregado miúdo.	34
Equação 3	Resistência média a compressão.	43
Equação 4	Consumo de cimento.....	44
Equação 5	Consumo de brita.....	45
Equação 6	Volume de areia.	45
Equação 7	Consumo de areia.....	46
Equação 8	Índice de atividade pozolânica.....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Retido acumulado (%) x Aberturas das peneiras (mm).....	42
Gráfico 2	Resistência das amostras.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCA	Cinza de Casca de Arroz
A	Corpo de prova de referência submetido a cura convencional
B	Corpo de prova de referência submetido a cura do projeto
C	Corpo de prova com substituição parcial de 3% de CCA obtido a 400°C
D	Corpo de prova com substituição parcial de 5% de CCA obtido a 400°C
E	Corpo de prova com substituição parcial de 3% de CCA obtido a 600°C
F	Corpo de prova com substituição parcial de 5% de CCA obtido a 600°C
NBR	Norma Brasileira
DNER	Departamento nacional de estradas e rodagens
ABNT	Associação Brasileira de normas técnicas
IAP	Índice de atividade pozolânica
ABCP	Associação Brasileira de cimento Portland
MF	Módulo de finura
Sd	Desvio padrão
Fck	Resistência a compressão característica do concreto
Fc,m	Resistência média a compressão do concreto
a/c	Fator água/cimento
Fc,28	Resistência média a compressão aos 28 dias

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo Geral.....	19
3.2 Objetivos Específicos	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 Concreto.....	20
3.2 Durabilidade e vida útil do concreto	20
3.3 Resistência a compressão	22
3.4 Ataque por sulfatos	22
3.5 Cinza de casca de arroz como adição pozolânica.....	25
3.6 Influência da temperatura de queima na pozolanicidade das cinzas.....	27
3.7 Concreto com adição de CCA.....	27
4. Materiais e métodos	29
4.1 Sequência de execução da pesquisa	29
4.2 Tratamento térmico da casca de arroz para obtenção da cinza.....	30
4.3 Matéria – prima.	32
<i>4.3.1 Cimento.....</i>	<i>32</i>
<i>4.3.2 Agregado miúdo (areia) – Granulometria.....</i>	<i>33</i>
<i>4.3.3 Agregado miúdo (areia) – Teor de umidade.....</i>	<i>33</i>
4.4 Índice de atividade pozolânica.....	34
4.5 Dosagem do concreto.	34
4.6 Moldagem dos corpos de prova.	35

4.6.1	<i>Corpos de prova de referência</i>	35
4.6.2	<i>Corpos de prova com substituição parcial de CCA</i>	36
4.7	Processo de cura das amostras.	37
4.8	Ensaio Slump test.	38
4.9	Ensaio de Resistência à compressão axial	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	Teor de umidade do agregado miúdo	40
5.2	Caracterização granulométrica do agregado miúdo	40
5.3	Dosagem do concreto	43
5.4	Ensaio do Slump test	46
5.5	Índice de atividade pozolância	49
5.6	Ensaio de resistência a compressão axial	50
6.	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

Segundo Filho et al (2015), a durabilidade do concreto está relacionado com as especificações dos materiais utilizados e ao ambiente de agressividade do entorno ao qual estará sujeito durante a vida útil. A utilização de materiais inapropriados para garantir o desempenho de concretos expostos a ambientes agressivos, poderá resultar na degradação prematura da estrutura. Na prática, inúmeras obras de engenharia que são expostas à ambientes agressivos apresentam degradação precoce, remetendo a falha na utilização de materiais que não garantem a adequada funcionalidade e durabilidade.

O mais significativo agente agressivo ao concreto de fundações é o sulfato, que tem ocorrência natural nos solos e em suas águas (MILITITSKY et al, 2005). O ataque por sulfatos ao concreto pode se manifestar por expansão ou fissuração, podendo levar ao aumento da permeabilidade do concreto, problemas estruturais e iniciar processos de corrosão das armaduras (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Diferentes materiais são adicionados à matriz cimentante para aumentar à resistência aos sulfatos, como por exemplo, escória de alto forno, cinza volante, sílica ativa, metacaulim, fíler calcário, entre outros (SENHADJI, 2014). Filho et al (2015), estudou o ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio com adições minerais e observou que a substituição parcial do cimento Portland CP V - ARI por adições minerais, em teores de 10% em massa, propiciou a redução da expansão resultante conforme ensaio acelerado preconizado pela NBR 13583/2014.

A incorporação como adição mineral da cinza da casca de arroz em argamassas e concretos constitui-se de uma alternativa para solucionar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, além gerar concretos mais resistentes, com porosidade desconectada e mais durável frente a vários meios agressivos, resultando também no desenvolvimento de um material de maior valor agregado por promover melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos (ZHANG e MALHOTRA, 1996).

A composição química da cinza da casca de arroz (CCA) é basicamente sílica e sua atividade, está diretamente relacionada ao processo de combustão da casca. Fatores associados à queima da casca de arroz, como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência e ambiente, determinam o teor e estrutura da sílica, a superfície específica e a quantidade de impurezas na pozolana, o que influencia sobremaneira sua reatividade (Cordeiro, Filho e Fairbairn, 2009).

Para MEHTA (1999), quando resíduos agrícolas são utilizados para obtenção de

materiais pozolânicos a temperatura de queima deve oscilar entre 400°C e 800°C, com o objetivo de evitar a formação de cristais de sílica, otimizando assim as propriedades reativas das cinzas obtidas nos processos.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência ao ataques por sulfatos de concretos com substituição parcial da cinza da casca de arroz obtida a partir tratamento térmico a temperaturas controladas, visando estabelecer a melhor relação entre a temperatura de queimadas cinzas e as propriedades do concreto.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento da resistência a compressão aos ataques por sulfatos de concreto com substituição parcial da cinza de casca de arroz obtida a partir de tratamento térmico a temperaturas controladas.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter cinzas de casca de arroz a partir de queima sob temperaturas de 400°C e 600°C;
- Realizar a dosagem do concreto para produção de corpos de prova, com substituição parcial do cimento por cinzas da casca do arroz, nos percentuais de 3% e 5% de cinzas de casca de arroz obtidas a diferentes temperaturas;
- Expor dos corpos de prova ao ataque de solução agressiva de sulfato de sódio;
- Determinar a resistência a compressão do concreto convencional e do concreto com as substituições parciais;
- Avaliar a relação entre os parâmetros analisados (temperatura de obtenção das cinzas e porcentagem da cinza adicionada) e o desempenho concreto obtido frente ao ataque por sulfato de sódio.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Concreto

O concreto é o principal componente utilizado na construção civil, é um material composto por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita), podendo conter também adições e aditivos químicos, com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas. Esses elementos quando misturados, formam uma liga que poderá ser moldada de diferentes formas e diversas aplicações. Essa mistura pode ser feita manualmente ou com o uso de betoneiras no próprio canteiro de obra, denominado de concreto (in loco), e podem também ser preparados em usinas de concreto, denominado de concreto usinado ou pré-misturado (Couto *et al*, 2013).

É o material mais utilizado na atualidade, mesmo não sendo tão resistente quanto o aço, ele possui excelente resistência à água. Diferente da madeira e do aço comum, a sua capacidade de resistir à ação da água, sem apresentar deterioração séria, faz do concreto o material ideal para estruturas com finalidade de controlar, estocar e transportar água. Na antiguidade, as primeiras aplicações do concreto foi em aquedutos e muro de contenção, construídos pelos romanos (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Então as razões para o uso do concreto são imensas, como: a facilidade com que os elementos estruturais do concreto podem ser executados, variando suas formas e tamanhos; mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obra (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Podem ser utilizados em diversas áreas da construção civil, como edifício de pavimento, barragens, reservatórios, canais, paredes de contenção, pavimentos, pontes e canais, etc.

3.2 Durabilidade e vida útil do Concreto

Visto que o concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, questões importantes sobre sua durabilidade e vida útil são levantadas. A ocorrência de erros durante à sua produção, pode ocasionar problemas futuros como manifestações patológicas prematuras que modifiquem o tempo útil que foi estimado em projeto, podendo causar sérios riscos à segurança da estrutura. Grande parte das estruturas de concreto tem em seu projeto uma vida útil estimada de 50 anos, e estruturas de grande porte, como pontes, são projetadas para uma vida útil de até 100 anos. Mas, sabemos que muitas estruturas expostas em ambientes agressivos apresentaram sinais de deteriorização, podendo ocasionar problemas para a durabilidade da estrutura (CAVALARO *et al*, 2015).

A vida útil prevista para uma estrutura de concreto é de 40 a 50 anos, sendo que podem subsistir por centenas de anos. Alguns autores especificam que um concreto tem sua vida útil encurtada, quando são expostos à ambiente corrosivo, variando de 15 a 20 anos, e em casos muito graves, em menos de 5 anos já é necessário manutenção. Tais intercorrências geram custos, tornando-se um problema econômico visível (JIPING e XUESONG, 2010).

Segundo a NBR 6118/2013, deve-se projetar a segurança, estabilidade e conservação da estrutura durante o período de vida útil, levando-se em consideração as condições ambientais previstas na época do projeto, ou seja, a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais, devem ser previstas pelo projetista e contratante no início da elaboração do projeto.

A durabilidade do concreto é a capacidade de resistir às ações de ataques químicos, intempéries, abrasão ou outro tipo de deteriorização. Um concreto durável é aquele que conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando for exposto no ambiente de projeto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A questão da durabilidade do concreto é de responsabilidade de seis partes, onde é necessário uma cooperação e esforços de todos. A primeira parte é o proprietário, que no projeto deve especificar as suas expectativas presentes e futuras no uso da estrutura. A segunda parte fica por perto do projetista arquitetônico, onde ele irá definir os detalhes e materiais especificados. Já o autor do projeto estrutural fica com a terceira parte, responsável pela definição das geometrias da estrutura, especificar os materiais e indicar as manutenções preventivas futuras. O quarto é responsável pela tecnologia que será empregada no concreto, como as características dos materiais, traços e a metodologia de execução, sempre trabalhando e, conjunto com os autores do projeto arquitetônico e estrutural. A quinta parte é de responsabilidade do executor da construção, onde ele irá definir as metodologias que irá complementar a construção, respeitando sempre o que está previsto no projeto. E por fim, a sexta parte é fica por conta do usuário da estrutura, que ficará responsável em obedecer às condições de uso, operação e manutenção preventiva que foi especificada no projeto (HELENE, 1997).

Segundo a NBR 15575-1:2013 o tempo que compreende o início do uso de um produto e o momento em que ele deixa de desempenhar às exigências que foi pré-estabelecidas pelo usuário, esse período é denominado de vida útil.

3.3 Resistência do Concreto à compressão

A resistência a compressão do concreto é a propriedade mais importante do concreto, sendo a mais valorizada entre engenheiros e projetistas, onde a grande parte dos elementos de concreto são projetados para suportar forças de compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A resistência a compressão é a tensão máxima necessária para que ocorra ruptura. A ruptura ocorre mesmo sem apresentar sinais visíveis externos, ou seja, o corpo de prova é considerado rompido quando ele não suporta uma carga maior, devido ao estado de fissuração interna (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Uma propriedade importante que influencia diretamente na resistência do concreto é o fator água/cimento (a/c). Se durante a produção do concreto não houver controle de umidades dos materiais, o concreto será sempre fabricado com diferentes relações a/c, e com isso, possuirá diferentes valores a resistência a compressão (RECENA, 2002).

Para se obter a resistência a compressão do concreto, se faz uso da NBR 5739/2007, onde ela descreve um método de ensaios de corpos de provas cilíndricos de concreto. O ensaio é consiste basicamente em colocar o corpo de prova cilíndrico em prensa, e ela aplicará um carregamento a uma velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ Mpa/s, até que ocorra o rompimento do corpo de prova.

3.4 Ataque por Sulfatos

A durabilidade das estruturas geralmente leva em conta características próprias como qualidade e natureza dos constituintes (agregados, cimento, água e outros), relação água/cimento ou água/aglomerante, uso de aditivos ou até o processo de cura (LIMA, 2005). No entanto, é de grande importância levar em consideração também as características do meio ambiente onde a estrutura estará alocada para se ter o conhecimento da presença de possíveis agentes agressivos que podem levar a redução do tempo de vida útil do concreto (LIMA E SILVA, *et al*, 2018).

A deteriorização do concreto ocorre principalmente por efeitos físico-químicos, tendo origens diversas. Dentre os meios agressivos aos quais as estruturas estão expostas, o ataque por sulfatos é um desses meios e o mecanismo pode ocorrer pelo contato entre estruturas de concreto e ambientes que contenham sulfato, tais como solos e águas subterrâneas que possuem em determinada concentração, sulfato de magnésio ($MgSO_4$), sulfato de sódio (Na_2SO_4) e sulfato de potássio (K_2SO_4) (SILVA *et al*, 2017).

A estrutura pode ainda sofrer degradação se entrar em contato com sulfato de amônio

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ que pode estar presente em terras e águas agrícolas, ácido sulfúrico H_2SO_4 liberado por indústrias, ou ácido sulfúrico biogênico presente nos esgotos domésticos (redescoletoras e ETEs), poços de mineração, rios e pântanos que tenham matéria orgânica em processo de decomposição. Todos os sulfatos levam a deterioração do concreto mas o mecanismo e o grau de ataque dependem do tipo presente no meio (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Em relação ao ataque por sulfatos, na maioria dos estudos, duas fases são identificadas: na primeira, ocorre um período de dormência, onde pouca ou nenhum efeito resultante é quantificado e, na segunda, há uma significativa expansão. O período de dormência é caracterizado pelo tempo em que ocorre o preenchimento dos poros do material expansivo formado, já no período de propagação, acaba ocorrendo uma diminuição da resistência à compressão e de dureza superficial (Filho *et al*, 2015).

Segundo (CALLEJA, 1980; CEB, 1989; METHA, 1993) a água é o principal agente de degradação das estruturas do concreto, sendo o veículo de transporte principal para os íons agressivos, e sua movimentação através da estrutura pode ter efeitos deletérios. Bauer (1994) diz que existe dois mecanismos de atividade de água com sulfatos sobre o concreto: reação química e mecânica de microfissuração. As reações químicas originam-se produtos com características de expansão, causando fissurações, onde essas reações são causadas pelos constituintes do concreto com a água sulfatada. Já a ação mecânica de microfissuração provoca deterioração do concreto, onde ocorre a cristalização dos sais através da evaporação da água.

Segundo Bauer (1994) o reconhecimento de solos que possuem agentes agressivos é feito por meio da coloração. Solos que variam suas cores entre castanho ao castanho-amarelo, são conhecidos como solos normais. Já os que possuem uma coloração escura, que varia de cinza a negra, são considerados solos duvidosos.

Em matrizes de cimentícias, o ataque por sulfatos pode se manifestar na forma de expansão e fissuração, implicando na redução progressiva da resistência mecânica e da massa física; ao fissurar, o elemento cimentício torna-se mais suscetível à penetração de íons sulfatos no seu interior, acelerando a deterioração (METHA e MONTEIRO, 2014).

A porosidade e a permeabilidade são propriedades importantes que afetam a durabilidade do concreto e, conseqüentemente, a impermeabilidade é uma das propriedades essenciais em concretos para que apresentem bom desempenho. Se não houver como minimizar a agressividade do meio ao qual o concreto está exposto, é de suma importância a redução da permeabilidade e da absorção capilar de água da matriz cimentícia (TIBONI, 2007).

O processo completo de deterioração do ataque por sulfatos envolve três etapas: (a) difusão dos íons agressivos para o interior da matriz cimentícia, que é função da porosidade e permeabilidade; (2) reações químicas entre o íon sulfato e certos constituintes hidratados do cimento (portlandita, monossulfoaluminato e outros aluminatos hidratados) formando espécies químicas que resultam em expansão (etringita e gipsita) e (c) fissuração da matriz, algumas vezes associada à reação química de descalcificação do C-S-H, resultando em perda de resistência e desintegração. Paralelamente a este processo de deterioração pode ocorrer uma ação danosa oriunda da cristalização de sais (SILVA, CABRAL E OLIVEIRA, 2017). Os sais de sulfato geralmente encontrados na natureza são:

- Sulfato de alumínio: possui fórmula molecular $Al_2(SO_4)_3$, é frequentemente utilizado como agente coagulante em sistemas de tratamento de água e esgoto, assim como na manufatura de papéis e na indústria têxtil;
- Sulfato de amônio: possui fórmula molecular $(NH_4)_2SO_4$, é um composto inorgânico comumente usado na agricultura como fertilizante, desta forma, solos e águas subterrâneas próximas às zonas de agricultura podem conter concentrações elevadas de sulfato de amônio;
- Sulfato de cálcio: possui fórmula molecular $CaSO_4$, este composto serve como matéria prima na fabricação de giz escolar e gesso. Na natureza pode se apresentar como um composto mineral na forma de cristal de anidrita e gipsita;
- Sulfato de cobre: possui fórmula molecular $CuSO_4$, em sua forma penta-hidratado, tem função fungicida e, quando misturado com cal, é utilizado para controle de fungos na agricultura. É também utilizado como algicida no tratamento de águas;
- Sulfato de ferro: possui fórmula molecular $FeSO_4$, comumente utilizado como corante, todavia, a exposição ao ar de minerais como a marcassita e a pirita, ambos FeS_2 , podem, por oxidação, formar sulfato de ferro, podendo estar presentes em águas subterrâneas, solos e agregados (BAUER, 1994);
- Sulfato de magnésio: fórmula molecular $MgSO_4$ é comumente encontrada em solos e águas subterrâneas devido ao seu uso na agricultura e jardinagem, pois é empregado como corretor da deficiência de magnésio dos solos. Pode ser encontrado também em efluentes industriais e águas marinhas;
- Sulfato de potássio: formulação molecular K_2SO_4 , é um composto químico muito utilizado como adubo químico e fertilizante, com isso, é comumente encontrado em solos e águas subterrâneas; Sulfato de sódio: possui fórmula molecular Na_2SO_4 , é um

composto muito utilizado em diversas aplicações industriais como processamento de celulose, assim como, na produção de vidros, detergentes e corantes para tecido. Pode ser oriundo do mineral mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), e é um dos sais de sulfatos mais comuns encontrados em solos, lagos, rios e águas subterrâneas.

Os produtos de hidratação do cimento Portland mais suscetíveis ao ataque externo por sulfatos são o hidróxido de cálcio e os compostos hidratados que contêm alumina. Deste modo, é conveniente utilizar materiais ligantes que reduzam as quantidades finais de, ao menos, um destes compostos, transformando-os em produtos de hidratação mais resistentes (NEVILLE, 2013). A utilização de adições minerais na composição do material ligante, em substituição parcial ao cimento, altera a microestrutura da matriz hidratada e interfere na porosidade, na distribuição do tamanho dos poros e na interconectividade dos mesmos, o que dificulta as trocas de umidade, íons e gases com o meio e a redução das fissuras de origem térmica em função da redução do calor de hidratação (DAL MOLIN, 2005). Independente dos tipos de adições minerais (inertes, cimentantes e pozolânicas), todas elas provocam efeitos físicos na cinética da hidratação do cimento, através do efeito de diluição e de nucleação heterogênea. E as adições ativas (cimentantes e pozolânicas) além do efeito físico, elas exercem efeito químico com a formação de C-S-H secundário (FILHO *et al*, 2015).

3.5 Cinza de Casca de Arroz Como Adição Pozolânica

A maioria das adições minerais são subprodutos industriais sem valor econômico que quando não utilizadas, acabam se transformando em agentes poluentes de aquíferos e do solo (TIBONI, 2007). Tais resíduos tornam-se viáveis na constituição de compósitos à base de cimento quando possuem a propriedade de reagir com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), e formar um outro produto, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o qual é o maior responsável pela resistência das pastas de cimento. Esta capacidade é característica das pozolanas é chamado efeito pozolânico (LIBORIO 2004).

Grande parte das adições minerais utilizadas pela indústria cimentícia é de resíduos industriais ou agroindustriais, o que aumenta ainda mais os benefícios ambientais do uso desses resíduos, seja através da redução do consumo de energia no processo de fabricação do cimento, ou pela diminuição da emissão de CO_2 na atmosfera (VASCONCELOS, 2013). Mehta e Monteiro (2014) diz que a adição de materiais com propriedades pozolânicas no concreto melhora a questão da trabalhabilidade, durabilidade à fissuração ao ataque químico e proporcionam um concreto com alto desempenho e resistência.

A NBR 11172 (ABNT, 1990) define o termo adição como, produtos de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características. As adições minerais são classificadas de acordo com as propriedades físicas e químicas em, materiais pozolânicos, materiais cimentantes e materiais não-reativos ou fíler (DAL MOLIN, 2005). A norma NBR 12653 (ABNT, 1992) e a ASTM C 618 (1978), definem o material pozolânico, como silicoso ou sílico- aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente como hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, a temperaturas ambientes, para formar compostos com propriedades cimentantes.

A NBR 12653 classifica os materiais pozolânicos quanto à sua origem, em pozolanas naturais e pozolanas artificiais. As pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica ou sedimentar e as pozolanas artificiais são materiais provenientes de tratamento térmico (argilas calcinadas ou termicamente ativadas) ou subprodutos industriais com atividade pozolânica (cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, sílicaativa, etc.).

A atividade pozolânica da CCA é caracterizada pela capacidade da sílica (em estado amorfo), presente em misturas com cimento ou cal, se solubilizar no meio alcalino promovido por eles, reagindo em solução com os íons de cálcio, liberados nas reações de hidratação do cimento, formando compostos estáveis (monossilicatos de cálcio) dotados de poder aglomerante (silicatos e aluminatos de cálcio). Assim, quanto maior for a quantidade de sílica amorfa, maior será a possibilidade de melhoria na resistência da argamassa (ZUCCO, 2007).

A cinza da casca de arroz pode contribuir em concretos e argamassas tanto pelo efeito pozolânico quanto pelo efeito fíler. Suas principais reações químicas benéficas são aquelas com o hidróxido de cálcio, que se transforma de material pouco resistente para um material muito resistente e aderente, isto é, em C-S-H. Com esta reação, tem sido possível produzir, além de um cimento mais econômico, de mais baixo calor de hidratação, concretos mais resistentes com porosidade desconectada e com resistividade elétrica maior, mais durável frente a vários meios agressivos (TIBONI, 2007).

Os elementos mais comuns presentes na CCA são sódio, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco. A composição química da cinza varia em função do solo em que o arroz foi plantado, dos tipos e teores de fertilizantes utilizados, bem como da variedade de arroz propriamente dita (TRINDADE, 2011)

É fundamental para a utilização da cinza como adição o controle de alguns parâmetros como, como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência e ambiente (PLETSCH, 2019).

3.6 Influência da Temperatura de Queima na Pozolanidade das Cinzas

Fatores associados à queima da casca de arroz, determinam o teor de sílica, a estrutura da sílica, a superfície específica e a quantidade de impurezas na pozolana, o que influencia sobremaneira sua reatividade. Assim, através do controle de temperatura e tempo e taxa de aquecimento, é possível produzir cinzas da casca de arroz com teores de sílica amorfa acima de 95% e superfícies específicas em torno de 40.000 m²/kg, o que confere ao material elevada atividade pozolânica (CORDEIRO, FILHO e FAIRBAIRN, 2009).

Ao se fazer uso de temperatura controlada, o teor da sílica da CCA, quase sempre fica acima de 90%, favorecendo a obtenção de microestrutura amorfa, competindo com a sílica ativa, quando finamente moída, sendo apropriado para uso em concreto de alto desempenho. Estima-se que a maior parte da produção de CCA tenha aplicações secundárias devido à queima sem controle de temperatura, sendo que grande parte é descartada de forma imprópria a céu aberto. Esse quadro se caracteriza como poluição, devido à possibilidade de contaminação do solo e das águas pelo carbono residual proveniente da combustão, além da taxa de CO₂ que retorna para o ciclo do carbono da biosfera terrestre. Assim, quantidades representativas de CCA não são utilizadas para fins mais nobres, como na substituição parcial de clínquer (IZAIA *et al*, 2017).

Em temperaturas elevadas ocorre a formação de cristais de sílica, minimizando assim as propriedades reativas das cinzas obtidas nos processos. De acordo com Mehta (1999), quando resíduos agrícolas são utilizados para obtenção de materiais pozolânicos a temperatura de queima deve oscilar entre 400°C e 800°C, com o objetivo de evitar a formação de cristais de sílica, otimizando assim as propriedades reativas das cinzas obtidas nos processos.

Mehta (1992) afirma que quando a temperatura de queima da casca de arroz é baixa (400 a 600°C) e o tempo de exposição à temperatura é pequeno, a sílica contida na cinza é amorfa. A cinza nestas condições apresenta forma angular, estrutura altamente celular e superfície específica elevada, de 40 a 110m²/g (por absorção de nitrogênio), e diâmetro médio geralmente inferior a 45µm.

3.7 Concreto com adição de CCA

A utilização de CCA na construção civil é um tema abordado por diversos autores, de acordo com Mehta e Pitt (1976) a utilização de cinzas de casca de arroz em concretos se iniciou-se na década de 70, utilizando um processo de controle de queima para a obtenção de

cinzas com excelentes características. Pesquisas mostram que a CCA pode ser utilizado como substituição parcial ao cimento Portland, na preparação de aglomerantes cimentantes melhorando as propriedades finais do produto. Levando em consideração de que, as propriedades dos produtos formados com adição de CCA dependem das características físicas, químicas e mineralógicas da mesma (HOLOS Environment, v.11 n.1, 2011 – P.85).

Segundo Mehta (1992) nenhum outro material pozolânico, nem a sílica ativa, é tão boa quanto a CCA para conseguir ganho de resistência com baixa idade. E além de aumentar o ganho de resistência, ela contribui para aumentar a trabalhabilidade do concreto, reduzindo a segregação e a exsudação. Mehta (1992) ainda diz que é possível a substituição em cerca de 70% do cimento por CCA, mas é preciso apenas de 10% a 20% de substituição por CCA para que o concreto aumente sua resistência à compressão e ao ataque por sulfatos e cloretos.

(MILANI e FREIRE, 2006) fizeram experimentos fabricando tijolos de solo-cal e solo-cimento com adição de CCA, e os resultados mostraram que a casca de arroz é um material alternativo de grande potencial, além diminuir os descartes da casca de arroz em lugares inadequados.

De acordo com os estudos de Silva (2004) que utilizou a substituição parcial da CCA ao cimento na proporção de 5% e 10% na dosagem do concreto e da argamassa, os resultados mostraram que ao final da cura total do cimento (28 dias), houve um aumento na resistência à compressão de 24% para o concreto e 28% para a argamassa.

A incorporação de CCA em argamassas e concretos não interferem em propriedades importantes para a execução dos mesmos, como: tempos de início e fim de pega, retração e expansibilidade por secagem (Akasaki *et al*, 2005).

Conforme Silva (2007) a utilização de CCA na mistura interfere diretamente na trabalhabilidade da mistura, visto que é um material extremamente fino, possuindo uma elevada absorção de água. Com isso, ao se utilizar CCA na mistura, é quase sempre relacionado com o uso simultâneo de aditivos superplastificante na produção de concreto e argamassas.

Em estudos realizados por Habeeb e Mahmud (2010) confeccionando concretos com adição de CCA variáveis, nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em substituição parcial ao cimento e com diferentes teores de aditivo superplastificante com o intuito de manter a consistência do concreto. Os autores concluíram que, os concretos com adição de 10% de CCA obtiveram os melhores resultados de resistência a compressão, sendo esse valor superior ao traço de referência desde a idade de um dia até aos 28 dias.

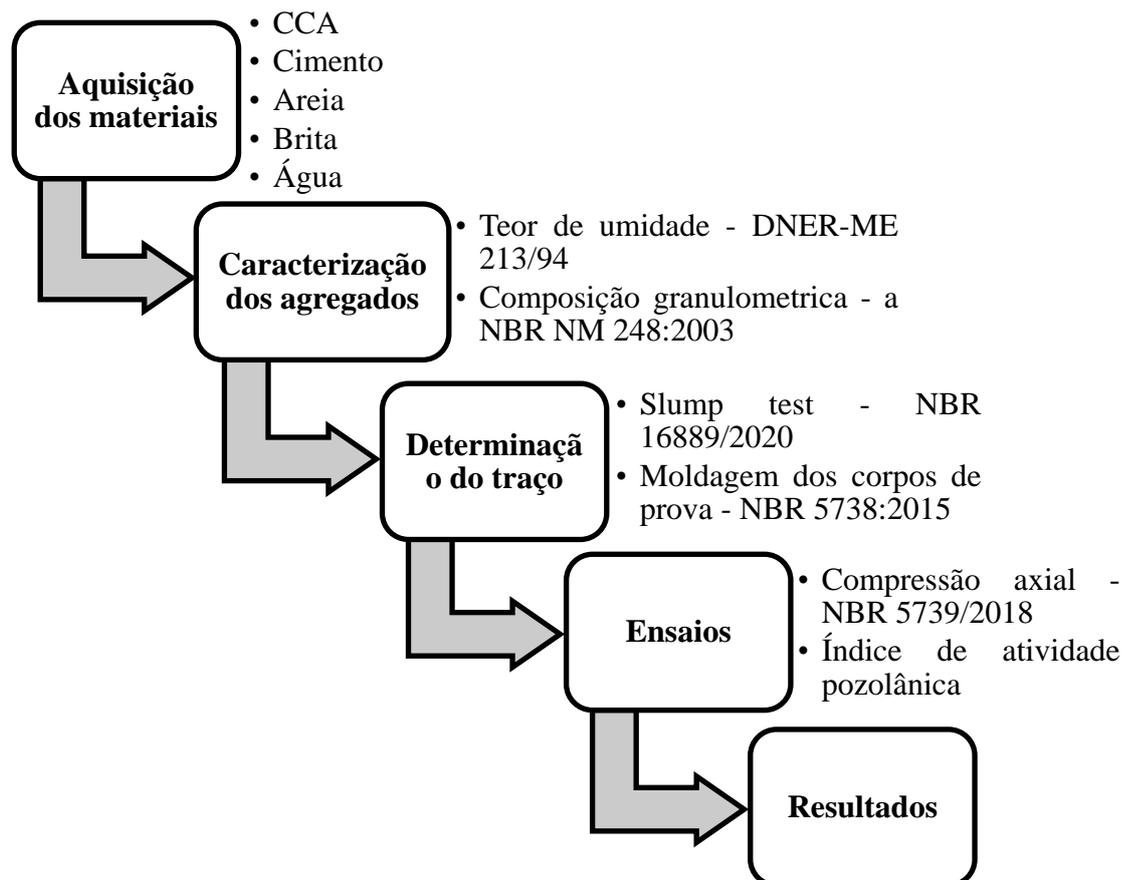
4. MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com os objetivos apresentados neste estudo, foi desenvolvido e organizado um protocolo experimental, estabelecendo as variáveis de análise, os materiais e os métodos utilizados no experimento. A preparação das amostras e os ensaios de caracterização dos materiais obtidos foram realizados nos laboratórios de Química, Estrutura e Geotecnia do Campus VIII da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) localizado no município de Araruna - PB.

4.1 Sequência Metodológica de Execução da Pesquisa

A execução do experimento ocorreu com as 5 etapas conforme o Fluxograma 1

Fluxograma 1: Etapas e procedimentos da pesquisa



Fonte: Próprio autor.

A execução se deu da seguinte forma. Na primeira etapa foi realizada a calcinação da casca de arroz para obtenção das cinzas. A segunda etapa consistiu em

reunir os materiais para proceder a dosagem do concreto, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e cimento, sendo todos obtidos no comércio local da cidade de Araruna. Em seguida, foram realizados os ensaios físicos com a areia e a brita, para se determinar o traço do concreto.

Na terceira etapa foi realizada a moldagem dos corpos de provas, com um traço de referência (sem CCA), e traços com adição de CCA na proporção de 3% e 5% em substituição parcial ao cimento, para cada calcinação (400°C e 600°C), onde todas as amostras de concreto foram moldadas em triplicata. A matéria prima utilizada para a moldagem dos corpos de prova foi a seguinte:

- Cimento - Cimento Portland Composto, CP II-F-32, resistência normal de 32 MPa e densidade de 3000 kg/m³; sem adição de pozolanas;
- Agregado miúdo - areia natural;
- Agregado graúdo - pedra britada de origem granítica “brita 2”, adquirida no comércio local;
- Água fornecida pelo próprio campus;
- Cinza de casca de arroz (CCA).

A quarta etapa consistiu no processo de cura das amostras. Esse processo foi feito de duas formas; cura convencional e a cura em solução agressiva. A cura convencional foi empregada para uma das amostras de referência A, com o objetivo de evidenciar a eficácia do cálculo utilizado no traço do concreto. Já o processo de cura em solução agressiva, foi empregado para as demais amostras (B, C, D, E e F).

Na quinta etapa foi realizado o rompimento dos corpos de prova, através do ensaio de compressão axial, para verificação da resistência a compressão segundo a NBR-5739:2018.

4.2 Tratamento Térmico da Casca de Arroz para Obtenção da Cinza

A cinza de casca de arroz (CCA) foi obtida através do tratamento térmico da casca. O controle da temperatura de queima da casca de arroz é a principal alternativa para aumentar a reatividade da cinza para que sua atividade pozolânica possa ser observada. Esse controle irá garantir que o carbono presente no material orgânico seja liberado em forma de gás, tornando a cinza rica em sílica amorfa. A casca de arroz foi lavada e submetida à secagem em estufa a 80°C por 48 horas (Figura 1).

Figura 1: Secagem da casca de arroz na estufa



Fonte: Próprio autor

Em seguida o material foi submetido à queima em forno resistivo (mufla) sem circulação forçada de ar (Figura 2). As condições de queima adotadas foram 10°C/min e permanência na temperatura de queima dependendo da temperatura adotada.

Figura 2: Queima da casca de arroz na mufla



Fonte: Próprio auto

As temperaturas empregadas foram 400°C e 600° cujo, na temperatura de 400°C, o tempo de queima foi de 20 horas já na temperatura de 600°C, foram 12 horas de queima para obtenção das cinzas (Figura 3).

Figura 3: Obtenção da CCA



Fonte: Próprio autor

4.3 Matéria – Prima

4.3.1 Cimento

O cimento utilizado para produção do concreto foi o CP II-F-32, adquirido no comércio local da cidade de Araruna-PB. A Tabela 1, apresenta os parâmetros químicos e físicos da qualidade do cimento utilizado na pesquisa, parâmetros esses disponibilizado pelo fabricante.

Tabela 1: Parâmetros físicos e químicos do cimento CP II-F-32

Químicos	
Perda ao fogo (%)	4,92
RI (%)	1,26
SO ₃ (%)	2,75
CO ₂ (%)	3,85
MgO (%)	3,23
Físicos	
Massa específica (g/cm ³)	3,09
Finura –Residual 75µm (%)	2,3
Pega	
Início (h:min)	2:50
Fim (min)	4:0

Fonte: Fabricante, 2022.

4.3.2 Agregado Miúdo -Granulometria

A determinação da composição granulométrica da areia foi realizado seguindo a NBR NM 248:2003. As amostras foram peneiradas (Figura 4) com a seguinte série de de abertura de peneiras: 4,75 mm (#4), 2,36 mm (#8), 1,18 mm (#16), 0,60 mm (#30), 0,30 mm (#50) e 0,15 mm (#100).

Figura 4: Peneiramento da amostra de agregado miúdo



Fonte: Próprio autor.

A massa de areia utilizada foi de 1000g. Após o peneiramento, foi calculado o módulo de finura que é obtido a partir do somatório de todas as massas acumuladas em cada peneira, exceto o fundo, dividida por 100, de acordo com a Equação 1 abaixo:

$$M_f = \frac{\sum \%M}{100}$$

Equação 1

M – Massa retida acumulada em %.

4.3.3 Agregado Miúdo – Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade do agregado miúdo seguiu a norma DNER-ME 213/94. Os materiais foram levados à estufa a 105 ± 5 °C, por 24 horas. O ensaio foi realizado em triplicata. De acordo com a Equação 2, obtemos a umidade a partir da média dos valores.

$$h = \frac{mbu - mbs}{mbu - m}$$

Equação 2

Onde,

h – umidade em (%)

mbu – massa bruta úmida que corresponde à soma da massa do recipiente com a massa do material úmido (g);

mbs – massa bruta seca que corresponde à soma da massa do recipiente com a massa do material seco.

4.4 Índice de Atividade Pozolânica

O índice de atividade pozolânica (IAP) foi determinado pelo método físico, conforme NBR 5752:2014. Neste método o IAP é determinado por meio da relação entre os valores obtidos para a resistência à compressão simples dos concretos produzidos com substituição parcial do cimento e o concreto de referência, sem adição, utilizando somente cimento Portland como aglomerante.

4.5 Dosagem do Concreto

A dosagem do concreto utilizado na moldagem dos corpos de provas foi obtida através do Método Brasileiro ACI/ABCP. Este método foi criado na década de 80 pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) por meio de experimentos.

Foi calculada uma resistência a compressão característica do concreto após os 28 dias de cura com f_{ck} de 25 MPA, pertencendo a classe C25. É necessário para a confecção do traço o módulo de finura do agregado miúdo (areia), o diâmetro máximo do agregado graúdo (brita), e as massas específicas da areia, brita e cimento. A Tabela 2 apresenta as massas específicas dos materiais utilizadas na confecção dos corpos de prova.

Tabela 2: Massas específicas e unitárias utilizada no traço

Massa específica	
Cimento (kg/m ³)	3000
Areia (kg/m ³)	2630
Brita (kg/m ³)	2650
Água (kg/m ³)	1000
Massa unitária	
Brita (kg/m ³)	1550

Fonte: Próprio autor.

4.6 Moldagem dos Corpos de Prova

4.6.1 Corpos de Prova de Referência

A moldagem e cura das amostras seguiu as recomendações contidas na NBR 5738/2015, utilizando moldes cilíndricos padrões com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Todas as amostras foram produzidas em triplicata. No total, foram moldados 18 corpos de prova.

Inicialmente foram moldados os corpos de prova de referência, sem adição de CCA. As misturas foram feitas de forma mecanizada com um auxílio de uma betoneira até se obter uma mistura homogênea. Foram moldadas duas amostras de referência, cujo a primeira amostra A foi submetida processo de cura convencional, e a segunda amostra B passou pelo processo de cura em solução agressiva.

A realização da mistura foi feita nas seguintes etapas: mistura e homogeneização da brita com a areia; adição da metade da água a ser utilizada; em seguida adição do cimento com o restante da água e homogeneização final da mistura.

Para a confecção das amostras, inicialmente foi passado no molde internamente um desmoldante líquido, para que o corpo de prova desmolde com facilidade sem prejudicar sua estrutura. Inicialmente foi realizado o ensaio do Slum test para verificação da fluidez do concreto e se o abatimento está dentro do esperado em projeto. Em seguida, conforme a NBR 5738/94, o preenchimento do corpo de prova feito em duas camadas, e com o auxílio de uma haste metálica, são aplicados 12 golpes em cada camada, com o objetivo de manter cada camada uniforme e sem porosidade. Após de 24 horas os corpos de prova são desmoldados e depois que se inicia o processo de cura (Figura 5).

Figura 5: Processo de cura na água convencional



Fonte: Próprio autor.

4.6.2 Corpos de Prova com Substituição Parcial de CCA

Os corpos de prova com substituição parcial da CCA (Figura 6) foram moldados seguindo os mesmos parâmetros dos corpos de prova de referência, no entanto, foi realizada substituição parcial de 3% e 5% de CCA, em relação à massa do cimento, para cada temperatura de obtenção das cinzas (400°C e 600°C). Foram moldadas 4 amostras com adição, dando um total de 12 corpos de prova. A cura de todas as amostras com substituição parcial de CCA ocorreu em solução agressiva de sulfato de sódio (Na_2SO_4).

Para as amostras expostas a ambiente de agressividade, seguiu-se o seguinte plano de confecção dos corpos de prova com adição de CCA:

- Amostra C - Amostras com adição de 3 % de CCA obtida a 400°C;
- Amostra D - Amostras com adição de 5 % de CCA obtida a 400°C;
- Amostra E - Amostras com adição de 3 % de CCA obtida a 600°C;
- Amostra F - Amostras com adição de 5 % de CCA obtida a 600°C.

Figura 6: Mistura das cinzas com o cimento



Fonte: Próprio autor

4.7 Processo de Cura das Amostras

Segundo Neville (1997), em solos e águas subterrâneas, os tipos mais recorrentes de sulfato são: sulfato de sódio, sulfato de cálcio e sulfato de magnésio. Após desmoldados, os corpos de provas foram submetidos à cura úmida por 48 horas. Após o período inicial de cura, foram submersos em solução de água saturada com óxido de cálcio (Cal) por 12 dias (Figura 7).

Figura 7: Ambiente saturado com óxido de cálcio (cal)



Fonte: Próprio autor.

E por fim, foram expostos a ambiente de agressividade até completar os 28 dias da cura (figura 8). O agente agressivo utilizado foi sulfato de sódio (Na_2SO_4). A concentração de sulfato empregado na solução foi de 100 g por litro de água deionizada (10%).

Figura 8: Ambiente de agressividade (sulfato de sódio)



Fonte: Próprio autor

4.8 Ensaio Slump test

O ensaio de consistência e fluidez do concreto foi feito por meio de um tronco cônico (*Slump test*). As misturas de materiais a serem estudados, foram confeccionados da mesma maneira para o provimento dos corpos de prova. Após a realização da mistura os concretos foram direcionados para realização do ensaio *Slump test* (Figura 9). Para a realização desse ensaio seguiu-se as orientações da NBR 16889/2020.

Figura 9: Ensaio slump test



Fonte: Próprio autor

Inicialmente foi adicionada o concreto ao tronco cônico em três frações, de modo que cada fração ocupe $1/3$ do cone, após a inserção de cada camada a mesma será atingida com 25 golpes com um auxílio de uma haste metálica. Em seguida, retira-se o molde e mede-se quanto o tronco de concreto diminuiu em relação ao molde. Na pesquisa, fixamos um abatimento do tronco cônico entre 4 cm e 6 cm para à amostra de referência.

4.9 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Para avaliar o comportamento dos corpos de prova foi realizado o ensaio de consistência ao ar livre e compressão axial. O ensaio de resistência a compressão é realizado conforme NBR 5739/2018, esta norma especifica o método de ensaio para a determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto moldados conforme a NBR 5738/1994.

As análises foram feitas em triplicata após o período de cura total do cimento, que foi de 28 dias, para todas as amostras. Antes de serem colocadas na máquina, foi feita a avaliação visual dos corpos de prova, onde houve a limpeza das faces e secagem dos mesmos. Em seguida, a prensa hidráulica foi programada para se adequar ao diâmetro dos corpos de prova, ou seja, um diâmetro de 10 cm.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Teor de Umidade do Agregado Miúdo

A determinação do teor de umidade do agregado miúdo é importante para correção do fator a/c da dosagem. Na Tabela 3, estão expostos os valores do ensaio da determinação do teor de umidade. O ensaio foi realizado em triplicata. O teor de umidade da areia foi de $2,857 \pm 0,329\%$, sendo descontada da quantidade de água utilizada na produção da mistura.

Tabela 3: Teor de umidade do agregado miúdo

Amostra	Peso do recipiente (g)	Areia úmida (g)	Areia seca (g)	Umidade (%)
1	8,01	10,01	9,68	3,29
2	7,9	10,03	9,78	2,49
3	7,83	10,02	9,74	2,79

Fonte: Próprio autor

5.2 Caracterização Granulométrica do Agregado Miúdo

Para obtenção do módulo de finura da areia, é necessário determinar sua granulometria. Foram peneirados aproximadamente 1000,00 g de areia seca e todo material retido em cada fração das peneiras foi pesado e aferido. A Tabela 4 apresenta os resultados do peneiramento.

Tabela 4: Composição Granulométrica do Agregado Miúdo

Peneira (mm)	Peso Retido (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Peso Passante (g)	Passante (%)
9,5	0,00	0,00	0,00%	1000,01	100,00
6,3	32,56	3,256	3,256	967,45	96,745
4,8	25,16	2,516	5,772	942,29	94,229
2,4	87,69	8,769	14,541	854,6	85,46
1,2	169,36	16,936	31,477	707,10	70,70
0,6	199,61	19,961	51,438	507,49	50,749
0,3	248,65	24,865	76,303	321,84	32,184
0,15	170,37	17,037	93,34	151,47	15,147
0	66,1	6,61	99,95	-	-

Fonte: Próprio autor.

O módulo de finura da areia foi determinado de acordo com a equação 1.

$$Mf = \frac{\Sigma \%M}{100}$$

Equação 1

M – Massa retida acumulada em %.

A partir do valor do modulo de finura (2,76), a areia foi classificada como uma areia média de acordo com os valores apresentados na Tabela 5.

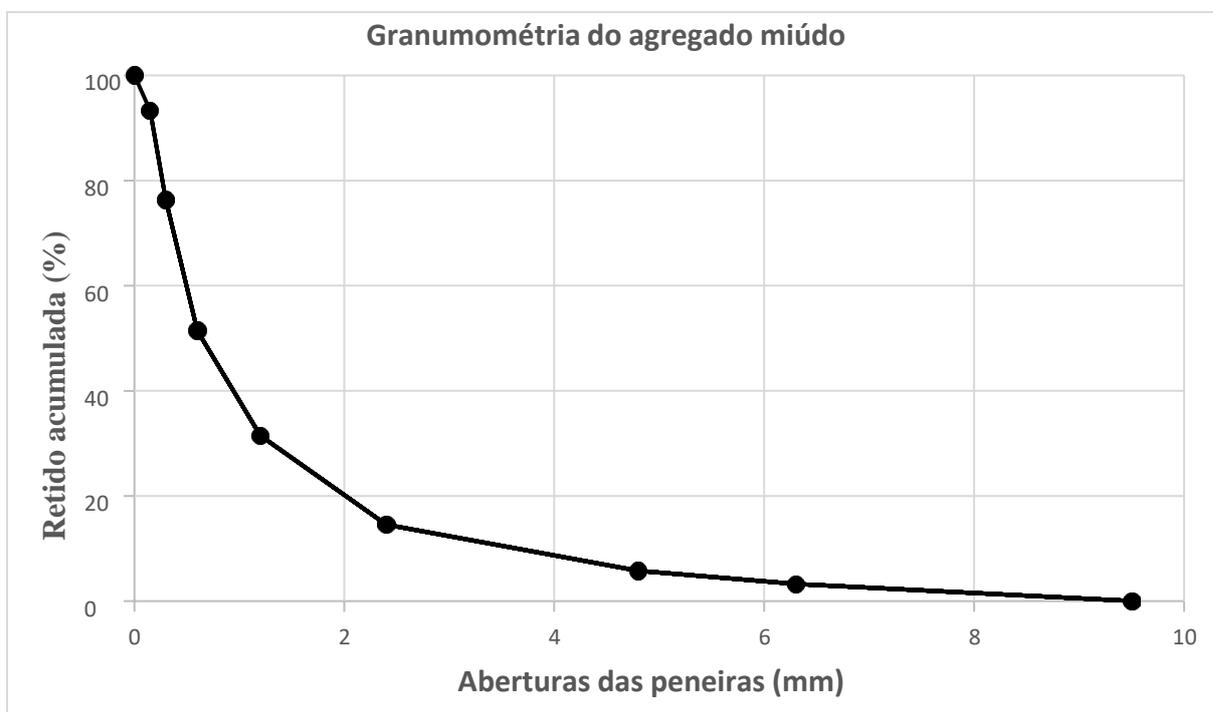
Tabela 5: Classificação da areia de acordo com o módulo de finura

Tipo	Modulo de finura
Muito Grossa	MF > 3,90
Grossa	3,30 < MF > 3,90
Média	2,40 < MF > 3,30
Fina	MF < 2,40

Fonte: Petrucci (1998, p.58)

O gráfico 1 representa a curva granulométrica da areia, traçada a partir da relação entre o percentual de massa retida e as aberturas das peneiras, em mm.

Gráfico 1: Retido acumulado (%) x Aberturas das peneiras (mm)



Fonte: Próprio autor.

De acordo com o gráfico da curva granulométrica da areia, observamos que à mesma não possui aspecto uniforme, pois os grãos concentram-se nas peneiras (mm) 0,15; 0,3; 0,6 e 1,2, com as seguintes porcentagens retidas em (%), de 93,34, 76,303, 51,438 e 31,477 respectivamente. De acordo com a tabela da NBR 7211:2005 (Figura 10) que determina os limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo, o agregado utilizado no experimento está dentro dos limites úteis utilizáveis, podendo ser usado para produção de concreto.

Figura 10: Tabela 2 da NBR 7211:2005

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTAS

- 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211:2005.

5.3 Dosagem do Concreto

A dosagem do concreto utilizado no experimento realizada com base no método Brasileiro ACI/ABCP.

De acordo com a NBR 6118:2014, foi escolhida a classe de agressividade nível II, uma agressividade do tipo moderada, com o tipo de ambiente para efeito de projeto urbano, com pequenos riscos de deterioração.

Foi utilizado um desvio padrão ($S_d = 4,0$ Mpa) aplicado nas classes de concreto do C10 até C80, onde o cimento e os agregados são medidos em massa, e à água de amassamento é medida em massa ou volume utilizando um dispositivo dosador, sendo corrigida em função da umidade dos agregados.

A dosagem foi feita para se obter um concreto com resistência característica de $F_{ck} = 25,0$ Mpa. De acordo com a NBR 12655: 2015, obtemos a resistência média a compressão da dosagem do concreto com a partir da Equação 3:

$$F_{c, 28} = F_{ck} + 1,65 * S_d \quad \text{Equação 3}$$

A norma adota um acréscimo de 65% ao desvio padrão e somando à resistência à compressão F_{ck} , resultando na resistência média aos 28 dias de cura do cimento.

O método ABCP faz uso da curva de Abrams para obtenção do fator água/cimento (a/c). Com o $F_{c,28}$ de 31,6 Mpa e fazendo o uso das curvas de Abrams, obteve-se uma relação

do fator a/c de 0,50.

O consumo de água foi determinado a partir da análise da Tabela 6, que mostra o consumo de água em l/m³, em relação com o abatimento adotado no tronco de cone. O consumo de água (Ca) obtido foi de 190 l/m³, pois o abatimento adotado foi de 40 mm a 60 mm, e o diâmetro máximo do agregado graúdo de 25 mm.

Tabela 6: Consumo de água em l/m³

Abatimento (mm)	Diâmetro máximo do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Paulos Henrique Laporte Ambrozewicz, 2011.

O consumo de cimento foi obtido a partir razão entre o consumo de água e o coeficiente água/cimento (a/c) (Equação 4), sendo de 380 kg/m³.

$$C_{cemento} = \frac{Ca}{a/c} \quad \text{Equação 4}$$

O consumo do agregado graúdo é obtido multiplicando o volume compactado seco do agregado por sua massa unitária compactada. O volume compactado seco é obtido de acordo com a Tabela 7, levando em consideração o diâmetro máximo do agregado graúdo e o módulo de finura da areia.

Tabela 7: Obtenção do volume compactado seco do agregado graúdo, em função do módulo de finura da areia pelo diâmetro máximo do agregado graúdo

Módulo de Finura da areia	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
MF	Volume compactado seco de agregado graúdo por m ³ de concreto				
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82	0,845
2,0	0,625	0,75	0,775	0,8	0,825
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78	0,805
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76	0,785
2,6	0,565	0,69	0,715	0,74	0,765
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72	0,745
3,0	0,525	0,65	0,675	0,7	0,725
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68	0,705
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66	0,685
3,6					

Fonte: RODRIGUES, 1990

Como o módulo de finura da areia foi 2,76 e o diâmetro máximo da brita foi 25 mm, o volume compactado seco do agregado graúdo (V_{cs}) é aproximadamente 0,695. Como foi adotado a massa unitária compactada da brita (μ_{cs}) de 1550 kg/m³, o valor do consumo do agregado foi de 1.077,25 kg/m³, calculado de acordo com a equação 5:

$$C_b = V_{cs} * \mu_{cs} \quad \text{Equação 5}$$

Já o consumo de areia é obtido multiplicando o volume de areia por sua massa específica (2630 kg/m³). O volume de areia é obtido pela equação 6, sendo necessário a utilização da massa específica do cimento, areia e da água respectivamente.

$$Var = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_{cimento}} + \frac{C_b}{\gamma_{brita}} + \frac{C_a}{\gamma_{água}} \right) \quad \text{Equação 6}$$

Como a massa específica do cimento, brita e água foram 3000 kg/m³, 2650 kg/m³ e 1000kg/m³ respectivamente, o volume de areia é de 0,276m³.

Assim, o consumo de areia foi de 728,04 kg/m³ de acordo com a Equação 7 :

$$Car = Va * \mu a$$

Equação 7

Assim, o traço obtido pelo método foi:

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{Car}{C_c} : \frac{Cb}{C_c} : \frac{Ca}{C_c}$$

$$\frac{380}{380} : \frac{728,04}{380} : \frac{1077,25}{380} : \frac{190}{380}$$

Chegando-se a seguinte composição:

$$1 : 1,92 : 2,83 : 0,5$$

A adição de CCA ao cimento foi realizada de forma parcial, nas proporções de 3% e 5% para cada temperatura utilizada (400°C e 600°C). A Tabela 8 apresenta o traço unitário para cada mistura, onde os seus valores foram obtidos a partir da razão entre os consumos calculados e o consumo de cimento.

Tabela 8: Proporção do traço com substituição parcial de CCA

Susbtituição parcial De CCA ao cimento (%)	Traço com proporção de cimento
0	1 : 1,92 : 2,83 : 0,5
3%	0,97 : 0,3 : 1,92 : 2,83 : 0,5
5%	0,95 : 0,5 : 1,92 : 2,83 : 0,5

Fonte: Próprio autor.

5.4 Ensaio do Slump test

O ensaio do Slump test é realizado através de um tronco cônico com o objetivo de determinar a consistência e fluidez das misturas de concretos e realizar a comparação entre as amostras sem adição de CCA, com as amostras que possuem substituição de CCA ao cimento, na proporção de 3% e 5% nas duas temperaturas utilizadas (400°C e 600°C). Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos com o ensaio do Slump test para todas às amostras confeccionadas.

Tabela 9: Valores do ensaio do Slump test das amostras

Traços utilizados	Altura do abatimento (cm)	Diferença em comparação com o traço de referência (%)
Referência	4,2	-
Adição de 3% a 400°C	3,3	-21,42
Adição de 5% a 400°C	2,5	-40,47
Adição de 3% a 600°C	3,28	-21,90
Adição de 5% a 600°C	2,47	-41,19

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Tabela 9, o abatimento do concreto de referência está dentro do limite esperado, que era de 4 cm a 6 cm. Observando todos os outros abatimentos, percebe-se que houve uma tendência na diminuição da altura do abatimento de acordo com a adição de CCA na mistura, na medida em que se aumenta a percentagem de adição, o abatimento diminui. Comparando os traços com adição de CCA com o traço de referência, observamos reduções percentuais de abatimento consideráveis, de -21,42%, -40,47%, -21,90% e -41,19% para as misturas com teores de substituição de 3% obtido a 400°C, 5% obtido a 400°C, 3% obtido a 600°C e 5% obtido a 600°C respectivamente. Vimos que a temperatura de obtenção de CCA praticamente não interfere no abatimento, dando resultados semelhantes para ambas as adições e que a quantidade de água foi constante para todos os traços.

A adição de CCA na mistura interfere diretamente na trabalhabilidade do concreto, por ela ser um material extremamente fino, possui uma elevada absorção de água. Em comparação com a mistura de referência, às misturas que possuem adições apresentam um concreto mais seco, o que dificulta sua aplicação no campo de obra. Conforme apresentado na Tabela 9, todas as amostras que possuem adição de CCA tiveram diminuição no abatimento do tronco de cone, e às amostras com adição de 5% obtiveram o menor abatimento do ensaio. Mas, segundo estudos de Silva (2007) o uso simultâneo de aditivos superplastificantes torna a mistura trabalhável e pronta para ser executada em obras, resolvendo o problema do concreto seco e pouco trabalhável. As Figuras 11, 12 e 13 registram a execução do ensaio do Slump Test nas amostras de referência, com adição de 3%

de CCA e com adição de 5% de CCA.

Figura 11: Amostra de referência CCA



Fonte:Próprio autor

Figura 12: Amostra de 3% de CCA



Fonte: Próprio autor.

Figura 13: Adição de 5% de CCA



Fonte: Próprio autor

5.5 Índice de Atividade Pozolânica

Para determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) foi utilizado o método físico, conforme NBR 5752:2012. De acordo com a norma, o índice é obtido pela razão entre o valor da resistência à compressão da amostra com adição, sobre o valor da resistência à compressão da amostra de referência, conforme a equação 8. A tabela 10 apresenta os IAP's das amostras nas temperaturas 600°C e 400°C para os teores de adição de 3% e 5 %.

$$IAP = \frac{F_{cb}}{F_{ca}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

F_{cb} - Resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento e adição de materiais pozolânicos (CCA);

F_{ca} – Resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldado só com cimento Portland (mistura de referência).

Tabela 10: Determinação do índice de atividade pozolânica (IAP)

Dados	CCA 400°C		CCA 600°C	
% CCA	3	5	3	5
IAP (%)	112,4	114,8	106,2	120,2

Fonte: Próprio autor

A NBR 12.653/2005, estabelece um percentual mínimo de 75% da resistência à compressão da argamassa de referência para atribuir potencial pozolânico à adição mineral ensaiada. De acordo com os dados da Tabela 10, todas as amostras ultrapassaram o percentual mínimo em relação à série de referência. Portanto, as CCA's obtidas nas temperaturas de 500°C e 600°C e adicionadas ao concreto avaliado atendem a exigência da norma, podendo ser consideradas como materiais pozolânicos. É possível ainda observar que o incremento de 3% para 5% de adição de CCA ao concreto resultou no aumento do IAP, para ambas as temperaturas de queima. Ainda acordo com os dados obtidos, a argamassa moldada com adição de 5% CCA calcinada a 600°C apresentou maior IAP (120,2 %).

5.6 Ensaio De Resistência A Compressão Axial

A determinação da resistência a compressão dos corpos de provas foi realizada seguindo a NBR 5739/1994. Após moldados, os corpos de prova seguiram para o processo de cura. O rompimento dos mesmos ocorreu aos 28 dias, período de cura total do cimento.

O rompimento se deu em uma prensa hidráulica elétrica, da marca Solo Test, no próprio laboratório de estrutura. O ensaio foi realizado em triplicata para cada amostra. As Figuras 14 e 15, apresentam como se deu o processo.

Figura 14: Corpo de prova posicionado na prensa.



rompido

Fonte: Próprio autor

Figura 15: Corpo de prova



Fonte: Próprio autor

À amostra de referência A foi moldada com o intuito de mostrar a eficiência do cálculo da dosagem do concreto. O concreto foi dosado, para que aos 28 dias de cura convencional atingisse resistência média a compressão de 25 Mpa. A Tabela 11 mostra os resultados do rompimento da amostra A. De acordo com os dados observa-se que a dosagem do concreto atendeu à resistência definida.

Tabela 11: Resistência a compressão da amostra de referência submetida à cura convencional

Amostra	Resistência CP' (Mpa)	Resistência CP'' (Mpa)	Resistência CP''' (Mpa)	Resistência Média (Mpa)
CPI	22,15	26,25	28,21	25,54

Fonte: Próprio autor

As amostras com adição de CCA submetidas a cura em solução agressiva de Na₂SO₄, foram rompidas aos 28 dias com o objetivo de avaliar a influência da adição de CCA na resistência à compressão das amostras, expostas ao ataque de sulfatos. Os corpos de prova foram identificados levando em consideração a percentagem de adição de CCA e a temperatura de queima da casca de arroz, sendo: B - amostra de referência, sem adição de CCA; C - 3% de CCA a 400°C; D - 5% de CCA a 400°C; E - 3% de CCA a 600°C e F - 5% de CCA a 600°C. A tabela 12 mostra os valores de rompimento das amostras.

Tabela 12: Resistência a compressão das amostras com adição de CCA submetidas à cura em solução agressiva.

Amostra	Resistência CP' (Mpa)	Resistência CP'' (Mpa)	Resistência CP''' (Mpa)	Resistência Média (Mpa)	Diferença (%)
B	23,437	19,193	24,283	22,30	—
REFERÊNCIA					
C	29,743	28,633	27,777	28,717	26,32
D	28,408	29,966	29,507	29,327	31,51
E	29,623	21,732	30,077	27,144	21,72
F	32,979	30,388	28,757	30,708	37,70

Fonte: Próprio autor

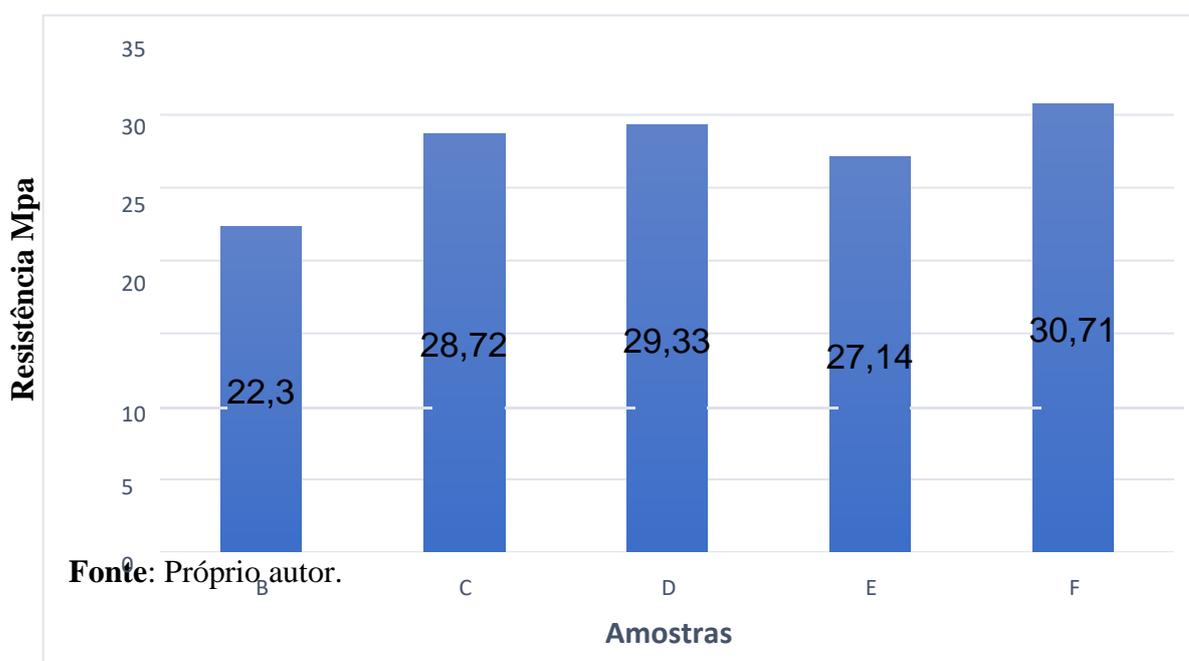
De acordo com os dados da Tabela 12, todas as amostras com adição de CCA superaram a resistência mínima definida em projeto, que foi de 25 Mpa. Verifica-se ainda que, houve aumento da resistência média à compressão das amostras com adição de CCA em

relação ao concreto de referência B, produzido sem adição. Este apresentou resistência de 22,3 Mpa, estando abaixo do mínimo estabelecido. Isso mostra que, o ataque por sulfatos em concretos convencionais enfraquece sua resistência à compressão. É possível atribuir o aumento de resistência do concreto com o aditivo mineral à alta quantidade de sílica presente na CCA, o que a caracteriza como material pozolânico. Segundo Hoffmann et al. (2002), a cinza de CCA possui em sua composição aproximadamente 92% de sílica. O gráfico 2 mostra a relação entre as resistências das amostras.

Geralmente, no ataque do concreto por sulfato de sódio, no segundo estágio, de desenvolvimento das reações com os produtos de hidratação do cimento, o efeito da perda de resistência a compressão passa a ser dominante, pois os produtos da reação tendem a ter uma expansão muito elevada e, conseqüentemente, passam a gerar tensões internas de tração no concreto e conseqüente redução na resistência (Santhanam et al. 2003).

O ganho de resistência a compressão em relação ao corpo de prova de referência B, foi de 26,32%, 31,51%, 21,72% e 37,70%, para as amostras com adição de CCA, nas proporções de 3% obtido a 400°C, 5% obtido a 400°C, 3% obtido a 600°C e 5% obtido a 600°C, respectivamente. O Gráfico 2 apresenta a relação da resistência a compressão das amostras submetida a cura com agressividade.

Gráfico 2: Resistência das amostras



A partir dos dados de resistência a compressão, foi possível verificar ainda que, os traços de concreto com adição de 5% foram superiores aos traços com adição de 3%, e a temperatura que se destacou foi a de 600°C. Habeeb e Mahmud (2010), estudaram concretos com adição de CCA nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em substituição parcial ao cimento e concluíram que os concretos com substituição de 10% obtiveram os melhores resultados de resistência a compressão. Já Barbosa (2006), fez experimento com adição de CCA na proporção de 5%, 8%, 10% e 15%, e os resultados mostraram que houve um aumento na resistência de 5% até 10% de adição, a partir disso o gráfico apresentou uma queda, e na adição de 15% a resistência foi inferior a adição de 5%. Logo, comparando os resultados obtidos nas pesquisas citadas, comprova-se que o incremento de CCA em substituição parcial ao cimento, realmente resulta em ganho de resistência à compressão considerável, mas é necessário levar em consideração que esse aumento ocorre até determinada proporção onde tende a estabilizar-se.

Segundo Felicetti (2016), a eficácia apresentada pelas pozolanas é limitada até determinados teores de substituição, uma vez que seu efeito químico depende da disponibilidade de hidróxido de cálcio liberado pela reação do cimento.

Conforme Tiboni (2007), se não estiverem em quantidades estequiométricas, a sílica presente em excesso, para de reagir com os produtos da hidratação do cimento, passando a atuar como um fíler inerte, reduzindo a porosidade da estrutura. Tal fenômeno ocorre devido aos finos que preenchem os vazios entre as partículas maiores (efeito de empacotamento), reduzindo sua porosidade, produzindo um arranjo mais eficiente na interface – partículas de agregado-pasta de cimento, aumentando a densidade e homogeneidade dessa zona e contribuindo para o aumento da durabilidade do concreto/argamassa.

A temperatura e o tempo de queima são fatores importantes que definem o teor de sílica amorfa e/ou cristalina presente na cinza (DELLA et al., 2005). A Tabela 13, apresenta os valores de resistência média das amostras com relação as temperaturas de obtenção das cinzas.

Tabela 13: Relação entre resistência média das amostras e temperatura de queima da CCA

Parâmetros	400°C		600°C	
CCA	3 %	5%	3%	5%
Resistência média (Mpa)	28,72	29,33	27,14	30,71

Fonte: Próprio autor

Observando-se a relação entre temperatura de queima e resistência média à compressão, percebe-se que, houve aumento da resistência de 29,33 Mpa para 30,71 Mpa com o aumento da temperatura queima de 400° para 600°C, para as amostras contendo 5% deCCA. Quando o tempo de exposição à alta temperatura é pequeno, a sílica contida na cinza é amorfa (sílica ativa), possuindo maior potencial pozolânico (MEHTA, 1992). Nesse estudo, o tempo de queima da casca de arroz na temperatura de 400°C, foi de 20 horas, já na temperatura de 600°C, foram necessárias apenas 12 horas de queima para obtenção das cinzas.

Contudo, para as amostras contendo 3% de CCA o aumento da temperatura provocou queda da resistência. Tal fato pode ser devido heterogeneidade das partículas, pois utilizou-se CCA in natura (não moída) como adição ao traço. A CCA quando moída apresenta-se mais finamente dividida e a forma das partículas se torna mais homogênea, contribuindo para o aumento da atividade pozolânica e consequente aumento da resistência à compressão. (KIELING et al, 2020).

6. CONCLUSÕES

A partir dos experimentos realizados nesse estudo e da avaliação dos resultados obtidos, pôde-se concluir que a CCA em substituição parcial ao cimento na produção de concreto pode melhorar as propriedades físico-mecânicas do material. Os valores de Índice de Atividade Pozolânica, refletem a relação proporcional entre adição de CCA e a resistência a compressão, para ambas as temperaturas de queima. A argamassa moldada com adição de 5% CCA calcinada a 600°C apresentou maior o IAP (120,2 %).

A resistência média à compressão apresentou bons resultados, onde todos os corpos de prova com adição de CCA e submetida a um ambiente de agressividade contendo Na_2SO_4 apresentaram maior resistência em relação a amostra de referência, com um aumento na proporção em % de 26,32, 31,51, 21,72 e 37,70 para as amostras C, D, E e F respectivamente.

Entre as amostras com adição de CCA, obtiveram melhor desempenho àquelas com adição de 5%, de 29,33 para 400°C e 30,71 para 600°C. Logo, a CCA calcinada a 600°C quando adicionada ao concreto mostrou-se mais eficiente, apresentando a maior resistência média alcançada.

Diante dos dados resultantes da execução da pesquisa, pôde-se concluir que, a adição ao concreto, de 5% de CCA obtida a temperatura de 600°C se mostrou mais eficiente na manutenção do desempenho do concreto, exposto a ambiente agressivo de solução de Na_2SO_4 , se mostrando como a melhor relação entre os parâmetros avaliados nesse estudo.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653: 2005** – Materias pozolânicos
– Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738: 2015. Moldagem e cura decorpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739: 2018.** Concreto: Ensaio decompressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 9p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5752: 2014** – Materiais pozolânicos
– Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118:2013.** – Projeto de estrutura deconcreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 225p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211: 2005.**
Agregados paraconcreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215:** cimento portland:determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 5p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778** - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massaespecífica. Rio de Janeiro, 1987. 4p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-1: 2013.** Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11172:1990.** Aglomerantes deorigem mineral. Rio de Janeira, 1990.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-1: 2013.** Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13583:2014.** Cimento Portland — Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738: 2015.** Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248:2003**. Agregados -Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653/2005. Materiais Pozolanicos. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16889/2020**. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655: 2015**. Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM C 618:1978**. Especificação padrão para cinza volante e pozolana natural crua ou calcinada para uso como mistura mineral em concreto de cimento Portland.

AKASAKI, J. L.; SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; BARBOSA, M. B.. **Influência da adição de cinza de casca de arroz nos tempos de pega e retração por secagem**. In: Simpósio Ibero-Americano, 2005, Coimbra – Portugal. **Anais..** Portugal: SIABE 05, 2005. P. 25-32.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaio de laboratório**, 1ª ed. 2012.

BARBOSA, M. B. **Utilização de resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneu em concreto de alto desempenho**. Ilha Solteira. São Paulo. 2006.

BAUER L. A F. (1994). **Materiais de construção**, Rio de Janeiro: Ed. LTC, 5º edição v.2.

BENITI, M. B. **Utilização de resíduos de cinzas de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de alto desempenho**. 2006. Tese (pós-graduação) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, 2006.

BUCHER, H. R. E. **Estimativa da resistência à compressão de concretos executados com cimento nacional em função da relação a/c**. São Paulo: ABCP, 1989.

CAVALARO, S. et al. **Service-Life Assessment of Existing Precast Concrete Structure Exposed to Severe Marine Conditions**. Journal of Performance of Constructed Facilities, [s.1.], v. 30, n.3, 2015.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R., **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto**, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p.99-107, (2009).

CALLEJA, M – Durability of Concrete. In: Inti. Cong. Chem. Cem. 7th. Paris, 1980. P.VII.2 – VII.2 / 48.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON (CEB) – Durable Concrete Structures CEB Design Guide. Bulletin D'information 182. Paris, 1989. 268 p.

COUTO, J. A. S; CARMINATTI, R. L; NUNES, R. R. A; MOURA, R. C. A. **O concreto como material de construção**. Cadernos de graduação – Ciências Exatas e Tecnologias. Sergipe. V.1. n.17. p. 49-48. 2013.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. **DNER-ME 213/94. Solo –** Determinação do teor de umidade.

DAL MOLIN, D. C. C., **Adições minerais para concreto estrutural**. ISAIA, G. C. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. 1ª Ed. São Paulo: IBRACON, p. 655 – 685,(2005).

DELLA, V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de resíduos Agro-Industriais; Cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica**. Cerâmica Industrial, v. 10, n. 2, 2005, p.22-25.

FELICETTI, MARIANA REZEND, **Uso De Cinza De Bagaço De Cana-De-Açúcar Em Cimento Portland Como Mecanismo De Desenvolvimento Limpo**, Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Materiais.,(2016).

HABEEB, G. A.; MAHMUD, H. B.; HAMID, N. B. A. A. **Assessment of deterioration in RHA – concrete due to magnesium sulphate attack**. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, v. 17, n. 6, p. 691-696, 2010.

HELEN, P. R. L. **Introdução da durabilidade no projeto de estruturas de concreto**. Ambiente Construído, São Paulo, v.1, n.2, p.45-57, 1997.

HOPPE FILHO, J., SOUZA, D. J. , MEDEIROS, M. H. F., PEREIRA, E., PORTELLA, ISAIA, G. C.; ZERBINO, R. L.; GASTALDINI, A. L. G.; SENSALÉ, G. R. **Viabilidade**.

HOPPE FILHO, J., SOUZA, D. J. , MEDEIROS, M. H. F., PEREIRA, E., PORTELLA, K. F., **Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores**, Cerâmica 61, (2015).

ISAIA, G. C.; ZERBINO, R. L.; GASTALDINI, A. L. G.; SENSALÉ, G. R. **Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II):durabilidade**. Ambiente Construído, v. 17, n. 2, p. 233-252, (2017).

JINPING, C.; XUESONG, Z. The study durability of the concrete structure. In: **E-Product E- Service and E-Entertainment (ICEEE), 2010 International Conference on** , p.1-4, 7-9 Nov. 2010.

JINPING, C.; XUESONG, Z. The study durability of the concrete structure. In: **E-Product E- Service and E-Entertainment (ICEEE), 2010 International Conference on** , p.1-4, 7-9 Nov. 2010.

LIBORIO. J. B. L., **Concreto de Alto Desempenho – Uma Tecnologia Simples Para aProdução de Concretos Duráveis**. *Revista Técnica*. Editora Pini, São Paulo, (2004).

LIMA, M. G., **Ação do meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto**, CONCRETO:Ensino, pesquisa e Realizações, Vol.1 - Ed.Geraldo Cechella Isaia-SãoPaulo: IBRACON, (2005).

LIMA E SILVA, L.D.; SOUZA, M.V.T.; MARQUES, N.M.; ALVES, I.S.S.S.; Gomes, G.J.C., **Análise da resistividade de estruturas de concreto submetidas ao ataquecorrosivode sulfato de magnésio**. *Revista Teccen*. 11 (2): 23-31, (2018).

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. SãoPaulo: PINI, 1994, p. 01-02.

MEHTA, P. K. **Rice husk ash – A unique supplementary cemeting material**. In: *Advancesin concrete technology*. CANMET. O ttawa, 1992, p. 407-431.

MILANI, A P.S.;FREIRE, W. J. **Physical and mechanical characteristics of soil-cementand rice husk mixtures**. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.1, Apr 2006.

METHA, P.K., PITT, N. A new proocess of rice utilization. In: *International Conference on the Utilization of Rice By-Products*. Valencia, Spain, 1974. *Proceedings...*Valencia: IATA, 1977, p.45-58.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. – **Concrete – Structure, Properties ans Materials**. Ed. PrenticeHall Jue., 1993, New Jersey.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades eMateriais**. São Paulo: Editora Ibracon, 2008. p. 12-14, 121, 122.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – microestrutura, propriedades emateriais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P.K. **Concrete technology for sustainable development**. *ConcreteInternational*,v.21, n 11, (1999).

MILITITSKY, J., CONSOLI, N. C., SCHNAID, F. **Patologia das Fundações**. Editora: oficina de Textos, São Paulo, (2005).

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de: GIAMMUSSO, S. E. 2. ed. SãoPaulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A., The confused world of sulfate attack on concrete, *Cement and Concrete Research*, 34(8), (2004).

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.; **TECNOLOGIA DO CONCRETO - 2ª ED. (2013).**

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. Ed. São Paulo: Globo, 1998.

PLETSCH, A. – Avaliação da carbonatação em materiais cimentícios com substituição de cimento Portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, 2019.

K. F., **Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores**, *Cerâmica* 61, (2015).

KIELING, AMANDA GONÇALVES, BREHM, FELICIANE ANDRADE, KULAKOWSKI, MARLOVA PIVA, MORAES, CARLOS ALBERTO MENDES, **Influence of the Combustion Process in the Rice Husk Ash Characterization**, *Braz. J. Anim. Environ. Res.*, Curitiba, v. 3, n. 3, p.2106-2116, jul./set. 2020

RECENA, Fernando A. Piazza; SERRA, Geraldo G. **Dosagem empírica e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. Porto Alegre: EdiPucrs, 2002. 166 p.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. ET - 67. São Paulo: ABCP, 1990.

SILVA, C. A. R. **Aplicação do Conceito De Maturidade em concretos com adição da cinza de casca de arroz**. 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2004.

SILVA, I. O. **Influência da cinza de casca de arroz amorfa e cristalina e da sílica ativa na reação álcali-agregado**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

SILVA, W. R. **Estudo da cinza de casca de arroz como adição ativa no cimento**. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2014.

SENHADJI, Y., ESCADEILLAS, G., MOULI, M., KHELAFI, H., BENOSMAN, C. **Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar**. *Powder Technology*, 254: 314-323 (2014).

SILVA, M. S. A., GODINHO, J. P., BONATTO, A. M., ZANDONÁ, J. J., LUCA, L. C. S., MEDEIROS, M. H. F., **Avaliação Do Ataque Por Ácido Sulfúrico E Sulfato De Sódio Na Variação Dimensional De Barras De Argamassa**, *Revista Técnico-Científica do Crea- PR, edição especial*, (2017).

SILVA, A. C. M.; CABRAL, F. M. S.; OLIVEIRA, R. A., **Ataque Físico E Químico Em Fundações Superficiais: Mecanismos E Danos**, CONPAR, (2017)

TASHIMA, M. M.; SOUSA, L. C.; SILVA, E. J.; MELGES, J. L. P.; BERNABEU, J. J. **P.Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na construção civil**. *Holos Environment*;v.11 n.1, 2011 – P.85.

TIBONI, R. **A Utilização da Cinza da Casca de Arroz de Termoelétrica Como Componente do Aglomerante de Compósitos à Base de Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

TRINDADE, G. H., **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz Natural sem moagem: Mitigação da reação Álcali-Sílica e Penetração de Cloretos**, Dissertação de Mestrado, PPGEC, UFSM, (2011).

VASCONCELOS, M. C. A., **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. 2013. 134 f. Dissertação de Mestrado, UFPE, PPGEC, (2013).

ZHANG, M. H.; MALHOTRA, M., **High-Performance Concrete Incorporating Rice HuskAsh as a Supplementary Cementing Material**. *ACI Materials Journal*, v. 93, n.6, p. 629-636,(1996).

