



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE - CCTS
CURSO DE ENGENHARIA CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ALBERTO DE OLIVEIRA SERAFIM

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO
DE CANA-DE-AÇÚCAR NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO**

ARARUNA - PB

2022

ALBERTO DE OLIVEIRA SERAFIM

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO
DE CANA-DE-AÇÚCAR NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual da Paraíba, Campus
VIII, como parte dos requisitos para a obtenção
do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Materiais de
construção.

Orientador(a): Prof. Dra. Ana Paula Araújo Almeida

ARARUNA - PB

2022

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.

S482i Serafim, Alberto de Oliveira.
Influência da temperatura de calcinação da cinza do
bagaço de cana-de-açúcar na resistência do concreto
[manuscrito] / Alberto de Oliveira Serafim. - 2022.
63 p.

Digitado.

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

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

1. Concreto. 2. Calcinação. 3. Cana de açúcar. I. Título

21. ed. CDD 624.183

ALBERTO DE OLIVEIRA SERAFIM

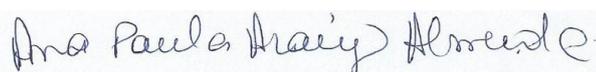
**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO
DE CANA-DE-AÇÚCAR NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual da Paraíba, Campus
VIII, como parte dos requisitos para a obtenção
do título de bacharel em Engenharia Civil.

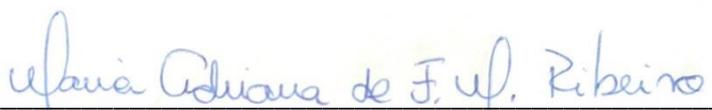
Área de concentração: Materiais de construção.

Aprovado em: 06/12/2022.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Ana Paula Araújo Almeida (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Osires Medeiros de Melo Neto
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Agradeço aos meus pais, Sr. Geraldo Alves Serafim e a Sr.^a Maria da Penha Oliveira Serafim por todo cuidado, companheirismo, carinho, assim DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo admirável presente que é a vida e que tornou tudo isso possível, que esteve sempre ao meu lado, concedeu oportunidades, e me deu forças em momentos difíceis, me guiando sempre pelos melhores caminhos. Obrigado por me fazer persistir e permitir mais uma oportunidade de crescimento, realizando meu sonho que é a conclusão do curso de Engenharia Civil.

Aos meus pais, Geraldo e Maria da Penha, por terem me dado incentivo e estarem sempre ao meu lado desde o começo do curso até a conclusão do mesmo. Que me ensinaram valores que contribuíram para o agir com honestidade, educação, simplicidade e humildade, que nunca mediram esforços para meu acesso à educação e conhecimento, a eles, meu eterno agradecimento e gratidão.

À minha querida avó Ana, carinhosamente chamada de “Dona Nova”, pelas inúmeras orações a mim dedicadas, e conselhos durante minha trajetória, e que torceu muito para me ver formado, levarei a senhora comigo sempre no meu coração.

A todos meus outros familiares, que não foram citados, mas que estiveram presentes na minha caminhada, meu muito obrigado.

À minha orientadora, Ana Paula, agradeço muito pela confiança e oportunidades a mim concedidas durante todo curso, como Pibic, monitoria e por ter me aceitado me orientar no trabalho de conclusão de curso, por toda plenitude, paciência, suporte na pesquisa, disposição em ajudar, tudo isso foi chave fundamental para o sucesso do trabalho. Foi uma satisfação enorme trabalhar com a senhora.

Aos membros da banca examinadora, Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro e Me. Osires Medeiros de Melo Neto, pela disponibilidade e interesse.

Aos técnicos de laboratório, da UEPB – Universidade Estadual da Paraíba, Campus VIII, principalmente a Kaká e Divaldo, por toda assistência durante as pesquisas e por sempre tirar dúvidas sempre que necessário, de forma paciente e cuidadosa a fim de realizar todas as atividades da melhor maneira possível. Gostaria de agradecer também a todo corpo docente do curso de Engenharia Civil, que contribuíram para construção do meu conhecimento durante os cinco anos de formação.

À empresa A3T Construção e Incorporação LTDA, pela oportunidade de concretizar o estágio obrigatório supervisionado com todo suporte da empresa, com auxílio de profissionais

capacitados sempre disponíveis para tirar dúvidas, representando peça fundamental para a construção do aprendizado prático.

À empresa Cachaça Monte Negro, que possibilitou a parte experimental desse projeto, através da disponibilização do bagaço da cana-de-açúcar.

Aos meus amigos que tive a oportunidade de conhecer durante minha trajetória de curso, principalmente Adson, Automar, Elisângela, Evandro, Lucas, Luciano, Maria Luíza e Thales, por cada momento de ajuda e incentivo em momentos árdios do curso, por cada conversa, por cada momento de descontração, vocês foram como irmãos para mim, contribuíram bastante para essa conquista, foi uma satisfação imensa conhecer vocês, obrigado por tudo, forte abraço.

A todos os amigos que torceram pela conclusão deste trabalho, os quais não posso citar nomes, pois são vários, agradeço cada palavra de encorajamento e ajuda prestada durante esse período. Por fim, sou grato a todos, que de forma direta ou indireta, cooperaram para realização dessa conquista.

*“Só se pode alcançar um grande êxito quando
nós mantemos fiéis a nós mesmos.”*

Friedrich Nietzsche

RESUMO

As adições minerais são utilizadas com o objetivo de somar ou mesmo substituir, parcialmente, a matéria-prima cimento. Sua incorporação ao concreto gera um melhor rearranjo da microestrutura interna e em razão disso, há um aumento na vida útil do material. Pode também haver aumento na resistência à compressão, variando em razão da categoria da adição mineral e da quantidade utilizada. No Brasil, em torno de 95% desse bagaço é utilizado como combustível de queima em caldeiras para geração de vapor, sendo produzido também a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, que é constituída quase que totalmente por sílica (SiO_2), essa cinza pode ser utilizada como substituição parcial do cimento em argamassas e concretos, barateando o custo de produção e também reduzindo o problema ambiental de disposição adequada das cinzas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da temperatura de calcinação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, empregada em substituição parcial ao cimento Portland em concretos, visando estabelecer a relação ideal entre temperatura de queima e a resistência à compressão do concreto com base no índice de atividade pozolânica da CBC. A execução dos experimentos ocorreu em etapas, inicialmente foi realizado o tratamento térmico do bagaço de cana-de-açúcar, onde foram utilizadas as temperaturas de 700° e 800. Logo depois, foram realizados ensaios físicos para caracterização dos agregados e posteriormente, foi executado o processo de moldagem dos copos de prova, com substituição parcial ao cimento por CBC, nas proporções de 3% e 5% para cada temperatura de calcinação. Na última etapa, foi realizado o processo de ruptura dos corpos de provas, com base no ensaio de compressão axial, com intuito de aferir a resistência à compressão conforme a NBR-5739:2018. A partir dos resultados obtidos observou-se que, a argamassa moldada com adição de 3% de CBC calcinada a 800°C obteve o maior índice de atividade pozolânica (IAP) (100,41%). Todas as amostras apresentaram resistência superior ao mínimo determinado pela NBR 6118:2014. O aumento da temperatura de calcinação da CBC de 700°C para 800°C resultou em ganhos de resistência tanto na adição de 3% quanto na adição de 5% de CBC. O concreto moldado com adição de 3% CBC calcinada a 800°C apresentou maior o IAP e resistência média à compressão maior que a amostra de referência, se mostrando como a melhor relação entre os parâmetros avaliados nesse estudo.

Palavras-Chave: Cinza de Bagaço de Cana. Concreto. Calcinação

ABSTRACT

Mineral additions are used to add or even partially replace the raw material cement. Its incorporation into concrete generates a better rearrangement of the internal microstructure and, as a result, an increase in the material's useful life. There may also be an increase in compressive strength, varying according to the category of mineral addition and the amount used. In Brazil, around 95% of this bagasse is used as fuel for burning boilers for steam generation, and sugarcane bagasse ash is also produced, which consists almost entirely of silica (SiO_2), this ash can be used as a partial replacement for cement in mortar and concrete, lowering the production cost and also reducing the environmental problem of proper disposal of ash. The objective of this paper was to evaluate the influence of the calcination temperature of sugar cane bagasse ash, used in partial replacement of Portland cement in concrete, aiming to establish the ideal relationship between burning temperature and the compressive strength of concrete, based on the sugarcane bagasse ash (SBA) pozzolanic activity index. The execution of the experiments took place in stages, initially, the heat treatment of sugarcane bagasse was carried out at temperatures of 700°C and 800°C. Subsequently, physical tests were carried out to characterize the aggregates, and later, the process of molding the test cups was put in execution, with partial replacement of cement by SBA, in the proportions of 3% and 5% for each calcination temperature. In the last stage, the process of rupture of the specimens was executed, based on the axial compression test, in order to measure the compressive strength according to NBR-5739:2018. Based on the results obtained, it was observed that the mortar molded with the addition of 3% of CC calcined at 800°C obtained the highest pozzolanic activity index (PAI) (100.41%). All samples showed greater resistance than the minimum determined by NBR 6118:2014. Increasing the SBA calcination temperature from 700°C to 800°C resulted in strength gains both with the addition of 3% and 5% of SBA. The concrete molded with the addition of 3% SBA calcined at 800°C showed a higher PAI and a higher mean compressive strength than the reference sample, proving to be the best relation between the parameters evaluated in this study.

Key Words: Sugarcane Bagasse Ash. Concrete. Calcination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas e procedimentos da pesquisa.....	28
Figura 2 - Processo de pré-queima do bagaço de cana-de-açúcar.....	30
Figura 3 - Bagaço de cana-de-açúcar após o processo de pré-queima	30
Figura 4 - CBC após queima em mufla.....	31
Figura 5 - Série de peneiras.....	31
Figura 6 - CBC após peneiramento.....	32
Figura 7 - Série de peneiras.....	33
Figura 8 - Material contido em cada peneira.....	34
Figura 9 - Cadinho com amostra úmida.....	35
Figura 10 - Amostras na estufa.....	35
Figura 11 - Agregado miúdo utilizado no ensaio de massa específica.....	36
Figura 12 - Recipiente utilizado para o ensaio de massa específica do agregado graúdo	37
Figura 13 - Processo de confecção dos corpos de prova.....	42
Figura 14 - Corpos de prova desmoldados.....	42
Figura 15 - Corpos de prova em cura submersa	43
Figura 16 - Ensaio de abatimento do tronco cone	44
Figura 17 - Corpo de prova posicionado na prensa	45
Figura 18 - Corpo de prova após rompimento	45
Figura 19 – Amostras durante ensaio de abatimento do concreto.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros físicos, químicos e de pega do cimento CP II-F-32	32
Tabela 2 - Classificação do agregado graúdo de acordo com o diâmetro máximo	33
Tabela 3 - Classificação do agregado miúdo conforme o módulo de finura.....	34
Tabela 4 - Propriedades dos materiais empregados na fabricação do concreto	38
Tabela 5 - Consumo de água aproximado (l/m^3)	39
Tabela 6 - Estimativa de consumo de agregado graúdo (m^3/m^3 de concreto)	40
Tabela 7 - Informações do ensaio de teor de umidade.....	46
Tabela 8 - Informações da análise granulométrica do agregado miúdo.....	46
Tabela 9 - Limites de distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	47
Tabela 10 - Informações da análise granulométrica do agregado graúdo.....	48
Tabela 11 - Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	49
Tabela 12 - Propriedades dos materiais empregados na fabricação do concreto	50
Tabela 13 - Traço calculado	50
Tabela 14 - Proporção do traço com substituição parcial de CBC	51
Tabela 15 - Resistência à compressão do traço de referência aos 28 dias	51
Tabela 16 - Informações do ensaio de abatimento do concreto das amostras.....	52
Tabela 17 - Índice de atividade pozolânica (IAP)	54
Tabela 18 - Informações do ensaio de resistência à compressão.....	55
Tabela 19 - Relação entre a resistência média à compressão e temperatura de calcinação da CBC.....	55
Tabela 20 - Relação entre resistência média à compressão e percentagem de adição de CBC ao concreto	56

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Módulo de finura do agregado miúdo	34
Equação 2 - Teor de umidade do agregado graúdo	36
Equação 3 - Massa específica.....	37
Equação 4 - Resistência média à compressão	38
Equação 5 - Estimativa do consumo de cimento.....	39
Equação 6 - Estimativa de consumo de agregado graúdo.....	39
Equação 7 - Consumo de agregado miúdo.....	40
Equação 8 - Índice de atividade pozolânica	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo	48
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo	49
Gráfico 3 - Relação entre resistência média à compressão e IAP	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBC	Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar
SBA	Sugarcane Bagasse Ash
A	Corpo de prova de referência
B	Corpo de prova com substituição parcial de 3% de CBC adquirido a 700°C
C	Corpo de prova com substituição parcial de 3% de CBC adquirido a 800°C
D	Corpo de prova com substituição parcial de 5% de CBC adquirido a 700°C
E	Corpo de prova com substituição parcial de 5% de CBC adquirido a 800°C
ABNT	Associação brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
IAP	Índice de atividade pozolânica
Sd	Desvio padrão
MF	Módulo de finura
F_{ck}	Resistência a compressão característica do concreto
F_{c,28}	Resistência à compressão média do concreto aos 28 dias
a/c	Fator água/cimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1	Concreto de cimento Portland e estruturas de concreto armado	19
3.2	Concreto com adições minerais	21
3.3	Influência das adições minerais nas propriedades do concreto no estado endurecido	22
3.4	Resistência à compressão do concreto	23
3.5	Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar	24
3.6	Influência da temperatura de queima na pozolanicidade das cinzas	25
3.7	Concreto com adição de Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC)	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Sucessão metodológica de execução da pesquisa	28
4.2	Tratamento térmico da Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar	29
4.3	Matéria-prima	32
4.3.1	<i>Cimento</i>	32
4.3.2	<i>Análise granulométrica</i>	33
4.3.3	<i>Teor de umidade – Agregado miúdo</i>	35
4.3.4	<i>Massa específica</i>	36
4.4	Dosagem do concreto	37
4.5	Índice de atividade pozolânica (IAP)	40
4.6	Moldagem dos corpos de prova	41
4.6.1	<i>Corpos de prova de referência</i>	41

4.6.2	<i>Corpos de prova com substituição parcial de CBC</i>	43
4.7	Ensaio de abatimento do concreto	43
4.8	Ensaio de resistência à compressão	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	Caracterização dos agregados	46
5.1.1	<i>Teor de umidade do agregado miúdo</i>	46
5.1.2	<i>Análise granulométrica</i>	46
5.2	Determinação do traço	50
5.3	Ensaio de abatimento do concreto	51
5.4	Índice de atividade pozolânica	53
5.5	Ensaio de resistência à compressão	54
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
6.1	Conclusões	58
6.2	Recomendações para trabalhos futuros	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Da Fonseca (2010) o concreto é o principal material utilizado na construção civil. De modo geral é composto de cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo, água, adições minerais e aditivos. Com base em Coutinho (1997) quando os componentes do concreto são misturados em proporções compatíveis, há um processo de endurecimento da mistura, acarretando em ganho de resistência e coesão, permitindo assim que o concreto seja utilizado como material estrutural na construção civil.

Com o objetivo de somar ou mesmo substituir, parcialmente, a matéria-prima cimento, são utilizadas as adições minerais. Sua incorporação ao concreto gera um melhor rearranjo da microestrutura interna e em razão disso, há um aumento na vida útil do material. Pode também haver aumento na resistência à compressão, variando em razão da categoria da adição mineral e da quantidade utilizada (MIRANDA *et al.*, 2021).

A incorporação de adições minerais ao concreto além de ocasionar melhoras nos atributos do concreto e ainda diminuir o consumo do clínquer, traz consigo ganhos para o meio ambiente, contribuindo para uma destinação de escórias industriais, além da redução do consumo de energia elétrica e de poluição do ar, que são inevitáveis no processo de fabricação do cimento Portland (FURQUIM, 2006; RIBEIRO *et al.*, 2021). A utilização de adições minerais na indústria da construção civil é uma prática ecológica, que traz benefícios ambientais e econômicos, pois esses materiais são oriundos de processos industriais, onde de modo geral, são descartados sem qualquer tipo de tratamento, em locais inadequados podendo haver perigo de contaminação ao solo e fontes de água subterrânea (DAL MOLIN, 2005).

A utilização de pozolanas como material para substituição parcial do cimento Portland em concretos é possível devido à existência de fases ativas em sua composição química, sendo a sílica amorfa a principal fase ativa das pozolanas (CORDEIRO, 2009). A cinza do bagaço-de-cana (CBC) é composta quase que completamente por sílica (SiO_2), sendo sua massa composta por 60% ou mais desse elemento químico, possibilitando desse modo a utilização como adição mineral na substituição parcial do cimento Portland em concretos e argamassas, desde que as condições apropriadas de queima sejam aplicadas, visando conservar a sílica em seu estado amorfo (CORDEIRO, 2006).

Para Souza *et al.* (2007) o uso da cinza do bagaço-de-cana como adição mineral em concretos é extremamente viável no Brasil, tendo em vista que o cultivo de cana-de-açúcar é bastante expressivo.

De acordo com Cordeiro (2006) para cada tonelada de bagaço de cana-de-açúcar queimado, são produzidos aproximadamente 25 kg de cinzas, com propriedades variáveis em função das condições de queima.

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da temperatura de calcinação na pozolanicidade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, empregada em substituição parcial do cimento Portland em concretos, visando estabelecer a relação ideal entre temperatura de queima e a resistência à compressão do concreto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Examinar o comportamento da resistência à compressão do concreto com substituição parcial do cimento pela cinza do bagaço-de-cana obtida através de tratamento térmico sob temperaturas controladas.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter cinzas do bagaço-de-cana através da queima sob temperaturas controladas de 700°C e 800°C;
- Realizar a dosagem do concreto para confecção dos corpos de prova, com substituição parcial do cimento por cinzas do bagaço-de-cana, nos percentuais de 3% e 5%, obtidas sob diferentes temperaturas;
- Determinar a resistência média à compressão do concreto de referência e dos materiais contendo as adições minerais;
- Examinar a relação entre os parâmetros analisados (temperatura de obtenção das cinzas e porcentagem da cinza adicionada) e a performance do concreto produzido.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Concreto de cimento Portland e estruturas de concreto armado

Para Helene e Andrade (2007) o concreto de cimento Portland se classifica como o mais significativo material estrutural para construção civil dos dias atuais. Apesar de ser o mais novo entre os materiais da construção das estruturas, é tratado como a solução mais relevante da história no quesito de evolução da humanidade e sua qualidade de vida.

O concreto é o principal elemento empregado na construção civil, é composto basicamente por aglomerante (cimento Portland), agregado graúdo (brita ou pedra), agregado miúdo (areia) e água, podendo essa mistura ter variações. O concreto de cimento Portland pode também receber adições minerais e aditivos químicos, com o objetivo de aperfeiçoar ou transformar suas propriedades fundamentais. Todos os elementos quando combinados compõem uma liga que pode ser trabalhada em diversos formatos e para diversos tipos de uso. Nos casos em que o concreto é empregado como componente estrutural ele é denominado de concreto estrutural, e pode ser de três tipos distintos, são eles: concreto simples sem armadura, concreto armado com armadura não pré-tracionada e concreto protendido quando existe uma armadura ativada pré-tracionada (COUTO *et al.*, 2013).

A fundamental característica do concreto é a capacidade de resistir a grandes esforços de compressão, no entanto, não é ideal para resistir aos esforços de tração. A alta capacidade de resistência à compressão do concreto está diretamente ligada a alguns fatores como a qualidade dos materiais empregados, relação água/cimento e idade do concreto. O concreto pode ainda sofrer deformações em virtude da retração, mudança de temperatura ou umidade, ação de cargas externas (lentas ou imediatas) (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Para Couto *et al.* (2013) o concreto é dito armado quando há adição de ferragens passivas em uma fôrma, ao concreto simples. Quando isso ocorre há uma melhor sustentação da estrutura, em virtude do concreto e a armadura trabalhar de forma conjunta e solidariamente, com o concreto resistindo à compressão e o aço a tração.

O concreto é utilizado em diversos tipos de estruturas, podendo ser utilizado desde enormes barragens até edifícios complexos dotados de estruturas pré-tensionadas, além disso, quando equiparado a materiais como cerâmicas, metais e materiais poliméricos, o concreto será o mais barato, com características de resistência e durabilidade ideais, e requisitando menor energia para sua produção (DA FONSECA, 2010).

Vários são os motivos para a utilização do concreto entre eles, se destacam: a simplicidade de execução de elementos estruturais de concreto, podendo ser esses elementos de diversos formatos e dimensões, baixo custo de fabricação e alta disponibilidade no canteiro de trabalho. Além disso, diferentemente da madeira e do aço comum por exemplo, o concreto possui habilidade de resistência à ação da água, quando exposto não apresenta deterioração severa, fazendo com que seja o material perfeito para obras com objetivo de estocar, controlar e transportar água (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas pelo concreto armado, há também desvantagens como: alto peso próprio, elevado custo e dificuldade para demolições e reformas, baixa proteção térmica, necessidade de mão de obra especializada para colocação das armaduras e ocorrência de fissuras em regiões tracionadas (COUTO *et al.*, 2013).

Segundo Almeida (2002) o concreto pode ser fabricado de duas formas diferentes, a fabricação no local da obra também chamado *in loco*, ou de modo pré-misturado denominado de concreto usinado. Para Couto (2013) o concreto do tipo usinado é preparado em centrais dosadoras, ou também chamadas de concreteiras, esses locais dispõem de grande infraestrutura para fabricação de concreto em larga escala, com a presença de balanças, silos de armazenamentos, correias transportadoras e aparelhos de controle de qualidade. Geralmente em obras urbanas o processo de mistura dos materiais do concreto, é realizado no caminhão betoneira durante o trajeto de deslocamento entre a concreteira e a obra que irá utilizar o concreto, mas em casos de obras com alta demanda de concreto como estradas e barragens, as centrais dosadoras que realizam a mistura dos materiais, e o concreto é conduzido através de caçambas e guias para o local da obra.

Para Couto (2013) as vantagens da utilização de concreto usinado são muitas, principalmente a redução do custo da obra, diminuição do tempo de execução da obra, garantia de qualidade de materiais empregados na mistura, dosagem correta e controle tecnológico dos materiais. Conforme Brito (2010) a utilização de concreto *in loco* traz consigo algumas desvantagens como a demanda de espaço para estoque de armaduras, fôrmas, cimento e agregados, podendo ser um problema para o canteiro de obra caso o local seja apertado ou já congestionado.

A durabilidade de estruturas compostas por concreto é influenciada basicamente por quatro aspectos, conhecidos como regra dos 4c, são eles: cobertura das armaduras, compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura, traço ou composição do concreto e cura efetiva do concreto na estrutura (HELENE, 1997).

Para que o concreto gerado seja durável, de boa aparência, resistente e barato, é necessário conhecer as propriedades de todos os materiais que compõem sua mistura, fatores que podem modificar as propriedades desses materiais, execução correta da mistura, forma correta de lançamento do concreto, cura de forma apropriada com o uso de hidratação durante o tempo necessário, dentre outros fatores (ALMEIDA, 2002).

3.2 Concreto com adições minerais

Sabe-se que as características do cimento Portland são adquiridas por meio de reações químicas, envolvendo água e constituintes do concreto, deste modo, quando se há alterações na constituição do cimento, são desencadeadas alterações nos atributos do concreto. É possível a aquisição de cimentos otimizados com o uso de adições minerais em sua composição, a adição destes minerais pode ocorrer na fase de obtenção do clínquer na fabricação do cimento ou ainda ser adicionado na fase de elaboração do concreto, fazendo com que gerem alterações em propriedades físicas e químicas do concreto (ABREU, 1998).

A utilização de adições minerais, no concreto e no cimento já é habitual em boa parte do mundo, países Europeus e Estados Unidos já adotaram esse método com base em normas internacionais, que qualificam o emprego de adições minerais e cimentícias, descrevendo as qualidades, atributos e condições que cada adição deve conter para ser possível a utilização na confecção do concreto (DA FONSECA, 2010).

O emprego de adições minerais na fabricação de cimento e do concreto em substituição parcial do clínquer ou do cimento, geram benefícios ambientais como a redução do impacto ambiental gerado por resíduos de outras fábricas quando despejados em depósito sem destino adequado, como também reduz o volume de retirada de matérias-primas por fábricas do ramo cimentício, gerando uma economia de recursos naturais escassos e limitados, como o calcário e a argila (BORJA, 2011).

O uso de adições minerais como um todo ocasionam em materiais cimentícios com melhores atributos técnicos, devido a transformação que geram na estrutura intrínseca do concreto na forma fresca. Dentre as principais vantagens do uso de adições se destacam a ampliação de resistência e durabilidade do concreto no estado endurecido, visto que, há diminuição da porosidade capilar, redução das fissuras de base térmica, resistência a ataque por sulfatos, incremento na resistência a reação álcali-sílica, entre outros (DA FONSECA, 2010).

O mesmo autor ainda afirma que muitas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido são influenciadas beneficemente com a utilização de adições minerais. A efetividade do uso de uma adição mineral aos atributos do concreto pode oscilar de acordo com algumas variáveis como: quantidade de material utilizado, circunstâncias do processo de cura e composição mineralógica, química e granulométrica. Apesar da composição química ter influência nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, o resultado final será mais afetado por características físicas das partículas que compõem o concreto tal como tamanho, forma e textura das partículas.

É primordial ao engenheiro civil, principalmente aquele que faz uso do concreto, pesquisar novos materiais que reduzam o seu custo de fabricação, como é o caso do uso de adições minerais em substituição parcial do cimento, por esse motivo, a utilização dessas adições minerais ao concreto convém uma razão econômica importante, em razão da melhora do desempenho, menores custo de manutenção dos empreendimentos no decorrer de sua vida útil e por fim, ainda gera uma baixa no consumo de carvão mineral ou óleo combustível no processo de fabricação do cimento Portland (VAGHETTI, 2005).

De acordo com Vaghetti (2005) a inserção de adições minerais em particular as cinzas, traz consigo não apenas a redução do preço final do concreto, mas também a melhora de algumas propriedades do material, como o acréscimo de resistência mecânica e impermeabilidade do material, alcançados através do processo de refinamento dos poros, ocasionando o acréscimo de durabilidade da estrutura.

3.3 Influência das adições minerais nas propriedades do concreto no estado endurecido

Segundo Vaghetti (2005) o uso de adições interfere diretamente em quatro propriedades do concreto, sendo elas: resistência à compressão axial, carbonatação, estrutura dos poros e permeabilidade.

- Resistência à compressão axial: Com o uso de adições minerais a resistência à compressão axial do concreto é modificada em virtude do efeito físico e especialmente efeito químico. Para o efeito físico é ocasionado o efeito “filler” devido as partículas de finos que foram adicionadas ao material cimentício, constituindo uma matriz da pasta mais densa, e deste modo, contribuindo para fortalecer o ponto mais frágil da estrutura do concreto, chamada de zona de interface pasta/agregado. Para o efeito químico, é provocado em razão da

reatividade das adições minerais oriundas das reações pozolânicas, intervindo nas resistências sobretudo das primeiras idades do concreto.

- Carbonatação: A utilização de adições minerais ao concreto em substituição parcial do cimento Portland, gera um aumento de carbonatação, devido ao maior consumo de Hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) por meio das reações pozolânicas, ocasionando o decréscimo da reserva alcalina que mais tarde irá reagir com o CO_2 para formação dos carbonatos durante o processo de carbonatação.
- Estrutura dos poros: Com o acréscimo das adições minerais, há uma mudança da microestrutura da pasta devido às alterações físicas relevantes, como resultado de acréscimos de partículas finas que essas adições contêm, provocando a diminuição dos poros. Esse abatimento da porosidade da pasta de cimento é coeficiente fundamental para aumento de durabilidade do concreto.
- Permeabilidade: As adições minerais contêm grande número de partículas finas, que ocasiona o refinamento dos poros, melhorando de forma significativa a impermeabilidade do concreto.

3.4 Resistência à compressão do concreto

O concreto é o material mais utilizado na construção civil no Brasil, sua característica de resistir bem aos esforços de compressão o torna ideal para utilização junto ao aço, onde os dois juntos formam um ótimo material para ser aplicado em estruturas de construções. Para que o concreto seja utilizado em estruturas, é necessária a realização de ensaios e testes que comprovem essa característica de resistência do concreto. (FAVARATO *et al.*, 2019).

Para Mehta e Monteiro (2008) a resistência à compressão é a característica mais importante do concreto, ela é indispensável para engenheiros e projetistas, uma vez que a maioria dos elementos estruturais são desenvolvidos visando suportar esforços de compressão.

Segundo Favarato *et al.* (2019) o f_{ck} (resistência característica) é elemento fundamental para o processo de dimensionamento de peças estruturais, ele garante que a probabilidade de se encontrar um valor menor de resistência à compressão no concreto seja de apenas 5%. Dessa forma, é fundamental os ensaios de resistência à compressão do concreto, pois apenas com eles será possível atestar a qualidade do concreto, verificando se está dentro das características especificadas no processo de fabricação. Os ensaios geram um controle de qualidade do material, contribuindo para segurança da estrutura, uma vez que garante que o material utilizado na construção estará dentro das especificações de projeto.

A resistência à compressão representa a tensão necessária para que ocorra ruptura. A ruptura pode ocorrer mesmo sem sinais externos, isto significa que o corpo de prova é tido como rompido a partir do momento que ele não suporta uma carga maior, em razão do estado de fissuração interna (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

No Brasil, o método utilizado para determinar a resistência característica do concreto (f_{ck}) é através da ABNT NBR 5739, com o uso de corpos de prova cilíndricos. Os corpos cilíndricos devem seguir as instruções para moldagem especificada na ABNT 5738 e serem rompidos após 28 dias de cura com auxílio de uma prensa mecânica, o valor obtido é chamado de f_{c28} , que será utilizado para cálculo do f_{ck} segundo a ABNT NBR 12655.

3.5 Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar

De acordo com Cordeiro *et al.* (2005) o Brasil detém o título de maior produtor do mundo de cana-de-açúcar e açúcar, sendo também responsável por aproximadamente 60% de todo álcool etílico gasto na terra. Ao longo do processo de extração da cana-de-açúcar é formada uma grande porção de bagaço, que representa uma boa fonte energética.

No Brasil, em torno de 95% desse bagaço é utilizado como combustível de queima em caldeiras para geração de vapor, sendo produzida também a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, que é constituída quase que totalmente por sílica (SiO_2), essa cinza pode ser utilizada como substituição parcial do cimento em argamassas e concretos, barateando o custo de produção e também reduzindo o problema ambiental de disposição adequada das cinzas (CORDEIRO *et al.*, 2008).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar contém em sua composição uma grande parcela de sílica (SiO_2), esse elevado percentual é requisitado quando a sílica, silicato de alumínio ou ambos se encontram no estado amorfo, visto que ao passar do tempo há reações que originam silicatos de cálcio hidratados, esses silicatos são indispensáveis para resistência mecânica de pastas, de concretos e argamassas (CORDEIRO *et al.*, 2005).

Conforme Cordeiro (2006) a existência de partículas de quartzo (SiO_2) podem ser originárias da areia agregada à cana-de-açúcar que pode não ter sido totalmente removida durante o processo de lavagem anteriormente a moagem da cana. Mesmo acometida por areia, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar se trata de um resíduo capaz de ser reciclado ou reutilizado em atividades mais importantes do que a fertilização de lavouras, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar possui características que possibilitam o uso como material de carga, ou seja, um

material inerte, podendo assim substituir a areia em produtos de origem cimentícia, para obras de construção civil (LIMA *et al.*, 2009).

Segundo Nunes (2009) a cinza do bagaço de cana-de-açúcar vem sendo estudada no Brasil há vários anos, sua utilização como pozolana pode ser basicamente de três formas são elas: na forma natural, com tratamento preliminar e produzida sobre controle de temperatura e tempo com auxílio do processo de moagem em seguida.

3.6 Influência da temperatura de queima na pozolanicidade das cinzas

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 1263 (2012) materiais pozolânicos são elementos silicosos ou silicoaluminosos que, quando isolados possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, no entanto, quando repartidos em pequenos pedaços e com adição da água, conseguem reagir com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) à temperatura ambiente, constituindo compostos do tipo aglomerante.

Segundo a ABNT NBR 12653 (2012) os materiais pozolânicos podem ser de origem natural ou artificial. As pozolanas do tipo natural, derivam de formação vulcânica, normalmente de caráter petrográfico ácido ou de origem sedimentar. Já as pozolanas do tipo artificial, são provenientes de tratamentos térmicos ou são resíduos de processos industriais.

A cinza oriunda da queima de forma não controlada a céu aberto ou em fornos possuem sílica reativa, na forma de cristobalita e tridimita, e para que possa ter expressiva atividade pozolânica é necessário o processo de trituração em partículas bastante finas. Em contrapartida, é possível se obter uma cinza muito reativa através do processo de controle de combustão do material, dessa forma a sílica se mantém na forma amorfa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Tashima (2006) durante a queima da cinza, a temperatura pode alterar no tipo de morfologia da sílica existente, podendo se encontrar no estado amorfo ou em seu estado cristalino. Conforme afirmado por Paula (2006) assim como a temperatura, o tempo de queima também influencia diretamente na forma e quantidade da sílica gerada.

A coloração das cinzas está diretamente ligada ao teor de carbono compreendido na amostra, cinzas de coloração escura contém uma grande quantidade de carbono, não compreendendo cinzas de elevada reatividade. Pesquisadores já estudam métodos para geração de cinzas claras (sem presença de carbono) na forma amorfa e com alta reatividade, através de controle de temperatura e tempo de queima, no entanto, há barreiras para implementação dessa queima como: alto custo de fabricação de um forno, controle preciso na temperatura e tempo

de queima e exigência de injeção de ar durante o andamento da queima para retirada do carbono das cinzas (TASHIMA, 2006).

Em pesquisa desenvolvida por Mehta (1999) foi observado que quando subprodutos agrícolas são utilizados para produção de materiais pozolânicos a temperatura de queima ideal deve variar entre 400°C e 800°C, com objetivo de não gerar cristais de sílica, melhorando com isso as propriedades reativas da cinza gerada nesse processo.

3.7 Concreto com adição de Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC)

Na atualidade, o cimento Portland é o mais importante material de construção utilizado pelo homem. O concreto, que é composto por cimento Portland, agregado naturais e água, em conjunto com o aço, representa o alicerce da engenharia estrutural contemporânea (CORDEIRO, 2006).

Na produção do cimento Portland, um dos principais componentes é o clínquer, durante o processo de obtenção do clínquer são despejados na atmosfera uma grande quantidade de CO₂, por isto, é indicado a substituição do clínquer por adições minerais que realizem a função de materiais cimentantes, a exemplo da escória, cinza volante e pozolanas (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

A utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) permite a atenuação de problemas ecológicos associados à utilização do cimento Portland no concreto, em virtude do grande volume de matéria-prima natural utilizada para fabricação do cimento, como argila e calcário. A utilização desses materiais para formação de clínquer é realizada através da queima em fornos a alta temperatura, liberando de forma direta na atmosfera uma grande quantidade de gases agravadores do efeito estufa principalmente o CO₂ (CORDEIRO, 2009).

Com base em Cordeiro *et al.* (2008) a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) é composta quase que totalmente por sílica (SiO₂) possuindo assim a capacidade de ser utilizada como uma adição mineral em argamassas e concretos. Segundo Sales e Lima (2010) apenas cinzas de nenhuma reatividade devem ser utilizadas como material de carga inerte, substituindo agregados finos em matrizes cimentícias.

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar pode ser utilizada como um resíduo aplicável na confecção de materiais no ramo da construção civil, contanto que seja comprovada suas propriedades intrínsecas, como o elevado teor de sílica em forma de quartzo, elemento preponderante em areias naturais (CORDEIRO, 2008).

Em estudos desenvolvidos por Lima *et al.* (2009) o uso de adições minerais como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar pode gerar efeitos positivos sobre algumas propriedades do concreto, esse ganho de desempenho advém do refinamento dos grãos e poros, diminuição da interconectividade dos poros e elevação da tortuosidade dos canais. A substituição de areia por CBC em teores de 20% e 30% em argamassas elevou sua resistência à compressão aos 28 dias.

Apesar dos ganhos de desempenho na resistência à compressão, há perdas de resistência a carbonatação quando se faz uso de cinza volantes e escória de alto forno, gerando uma profundidade de carbonatação de até duas vezes maior que em concretos sem esse tipo de adição. Essa redução é resultado da diminuição da alcalinidade em virtude da redução da massa de cimento na mistura do concreto (XUEQUAN *et al.*, 1999).

Em pesquisa realizada por Silveira (2010) a CBC residual obteve resultados positivos na confecção de concretos com substituição parcial do cimento Portland para teores de até 10% para o concreto convencional e concreto de alto desempenho. Foi preservado o desempenho mecânico do concreto, com ganhos de desempenho nos ensaios de durabilidade (permeabilidade, absorção por imersão e absorção capilar), o único ensaio em que houve decréscimo de desempenho foi no ensaio de carbonatação.

Outra pesquisa realizada por Lima (2011) utilizou a CBC para fabricação de concretos como substituto parcial do agregado miúdo, nos teores de 30% e 50%. Concretos com o uso do CBC obtiveram maiores valores de profundidade de carbonatação quando comparados a concretos de referência, portanto, é recomendado que para uso de concreto com adição de CBC em estruturas aparentes de concreto armado se realize tratamento impermeabilizante da superfície, devido a maior tendência ao processo de carbonatação. Portanto, sendo somente indicado a utilização de concreto com adição de CBC em obras de ações abrasivas superficiais de intensidade baixa.

Por outro lado, em outra pesquisa realizada por Fernandes (2015) onde foi analisada a durabilidade de concretos com substituição parcial do agregado miúdo, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20% por CBC, o concreto com 20% de substituição retornou menor profundidade de penetração de cloretos, quando comparado com o traço de referência (0% de adição de CBC), obteve também menor desgaste superficial e valor de resistência à compressão semelhante ao concreto de referência. Deste modo, podendo o concreto com 20% de CBC ser utilizado em ambientes de elevada ação abrasiva, locais com maresia considerável e obras de estruturas aparentes de concreto armado.

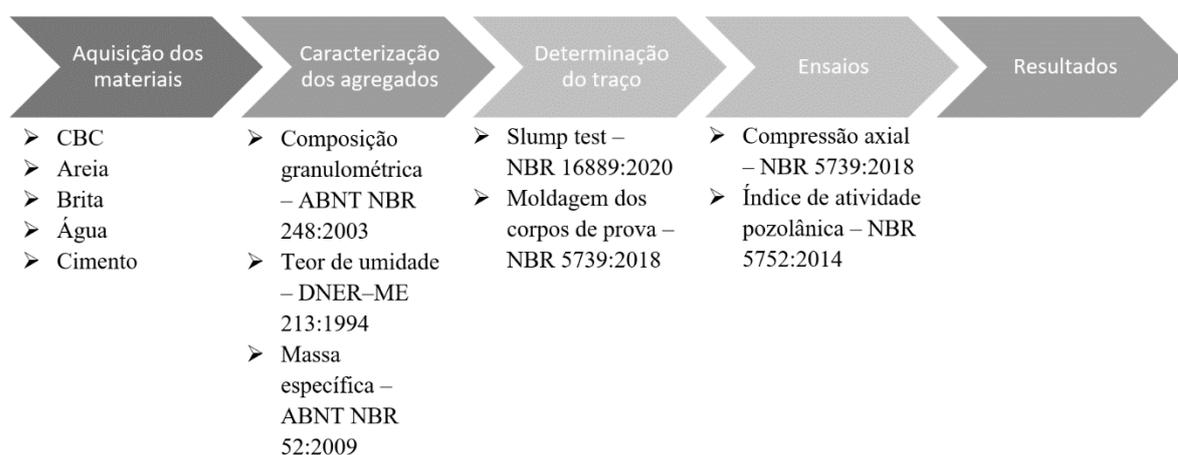
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme os objetivos apontados neste estudo, foi elaborado e definido um método experimental, estabelecendo as variáveis de estudo, os materiais e os métodos empregados no experimento. Todo processo de preparação de amostras e ensaios de caracterização foram efetuados nos laboratórios de Química, Estruturas e Geotecnia do Campus VIII da Universidade Estadual da Paraíba, localizada no município de Araruna - PB.

4.1 Sucessão metodológica de execução da pesquisa

Os procedimentos experimentais se deram conforme as cinco etapas a seguir, mostradas no Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma das etapas e procedimentos da pesquisa



Fonte: Autor (2022)

A primeira etapa da metodologia consistiu na aquisição dos materiais. Inicialmente, foi feita a calcinação do bagaço de cana-de-açúcar para geração da CBC. Em seguida, foram obtidos os materiais necessários para proceder a dosagem do concreto; agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia), cimento, os quais foram adquiridos em uma loja de material de construção na cidade de Araruna – PB. Logo depois, foram realizados ensaios físicos para caracterização dos agregados (areia e brita), com intuito de obter informações necessárias para o cálculo do traço do concreto.

Posteriormente, foi executado o processo de moldagem dos copos de prova, sendo primeiramente confeccionado um traço de referência (sem adição de CBC), e traços com substituição parcial ao cimento por CBC, na proporção de 3% e 5%, para cada temperatura de calcinação (700°C e 800°C), os ensaios foram realizados 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 com densidade de 3060 kg/m³, sem adição de pozolanas;
- Agregado graúdo: Pedra britada de origem granítica “brita 1”, adquirida em loja de material de construção na cidade de Araruna – PB;
- Agregado miúdo: Areia natural;
- Água proveniente do sistema de abastecimento local do município de Araruna – PB;
- Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC).

A penúltima etapa compreendeu o processo de cura das amostras, através do processo de cura submersa. Na última etapa, foi realizado o processo de ruptura dos corpos de provas, com base no ensaio de compressão axial, com intuito de aferir a resistência à compressão conforme a NBR-5739:2018.

4.2 Tratamento térmico da Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) foi obtida por meio de tratamento térmico (calcinação) do bagaço de cana-de-açúcar. O controle da temperatura de queima, representa um importante fator no processo de ampliação da reatividade da cinza, fazendo com que sua atividade pozolânica seja significativa. Esse controle contribui para que o carbono presente no material seja expelido em forma de gás, fazendo com que a cinza apresente sílica no estado amorfo.

Primeiramente foi realizado o processo de pré-queima do bagaço de cana-de-açúcar, com intuito de diminuir a massa total do material, com queima ao ar livre e inflamação com auxílio de álcool 70% como ilustra a Figura 2. O material resultante do processo de pré-queima é apresentado na Figura 3.

Figura 2 - Processo de pré-queima do bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Autor (2022)

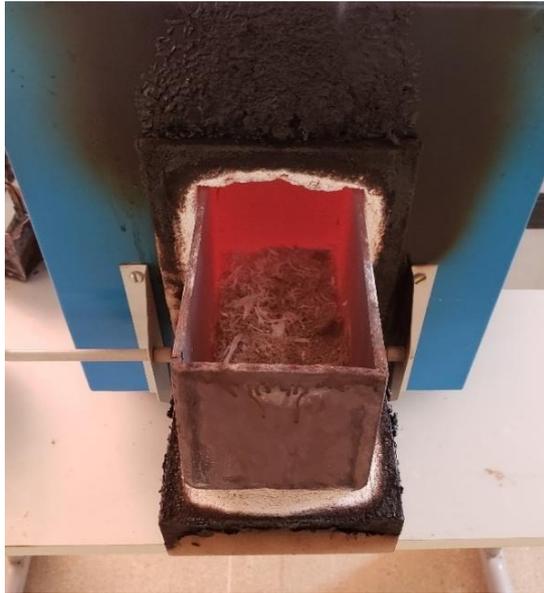
Figura 3 - Bagaço de cana-de-açúcar após o processo de pré-queima



Fonte: Autor (2022)

Após a pré-queima, o material foi levado para queima em temperatura controlada em forno resistivo (mufla) sem circulação forçada de ar. As especificações de queima foram de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e continuidade na temperatura adotada, o material após a queima na mufla é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - CBC após queima em mufla



Fonte: Autor (2022)

As temperaturas utilizadas para queima foram de 700°C e 800°C, para ambas temperaturas o período de queima foi de 24 horas. Com intuito de uniformizar o tamanho e forma das partículas e ainda remover qualquer impureza (material não orgânico) do material queimado, foi feito o peneiramento das cinzas com o auxílio das peneiras de número #2 e #180 como ilustrado na Figura 5. O material após processo de peneiramento é mostrado na Figura 6.

Figura 5 - Série de peneiras



Fonte: Autor (2022)

Figura 6 - CBC após peneiramento

Fonte: Autor (2022)

4.3 Matéria-prima

4.3.1 Cimento

O cimento empregado na fabricação do concreto foi o CP II-F-32, adquirido em uma loja de material de construção na cidade de Araruna – PB. As propriedades do cimento foram informadas pelo fabricante no rótulo da embalagem, e contempla parâmetros físicos, químicos e de pega do cimento, atestando a qualidade do material. Esses dados são expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros físicos, químicos e de pega do cimento CP II-F-32

Parâmetros Químicos	
Perda ao fogo	10,76%
Resíduo Insolúvel	7,08%
SO ₃	3,43%
Cal Livre	1,64%
MgO	3,13%
Parâmetros Físicos	
Massa específica	3,06 g/cm ³

Fonte: Fabricante (2022)

4.3.2 Análise granulométrica

Para determinação da composição granulométrica do agregado miúdo seguiu-se a determinação da NBR 248:2003. Todas as amostras passaram pelo processo de secagem em estufa com uso de temperatura controlada de (105 ± 5) °C por um período de 24 horas. Para esse ensaio, foram utilizados 1000 g de agregado miúdo (areia) seco.

Em seguida, o material foi peneirado de forma manual, utilizando peneiras com aberturas iguais a 25; 19; 12,5; 9,5; 6,3; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm, a série de peneiras é mostrada na Figura 7.

Figura 7 - Série de peneiras



Fonte: Autor (2022)

Após o peneiramento, o material retido em todas as peneiras foi pesado. Para o agregado graúdo, a determinação da dimensão máxima característica é dada pela malha de peneira na qual o percentual de massa contida é igual ou inferior a 5%. Na Tabela 2 está descrita a classificação do agregado graúdo.

Tabela 2 - Classificação do agregado graúdo de acordo com o diâmetro máximo

Tipo	Diâmetro (mm)
Brita 0	4,8 a 9,5
Brita 1	9,5 a 19
Brita 2	19 a 25
Brita 3	25 a 38
Brita 4	38 a 76

Fonte: Adaptado de DOS SANTOS (2022)

Com relação ao valor do módulo de finura, o agregado miúdo pode ser classificado como areia grossa, areia média ou areia fina, de acordo com os dados da Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação do agregado miúdo conforme o módulo de finura

Tipo	Módulo de finura (MF)	Utilização
Areia Grossa	$MF > 3,30$	Concreto e Chapisco
Areia Média	$2,40 < MF < 3,30$	Emboço e Concreto
Areia Fina	$MF < 2,40$	Reboco

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2002)

O módulo de finura é calculado através da soma das percentagens de massa retida acumulada dividida por cem, a fórmula para seu cálculo é mostrada na Equação 1.

Equação 1 - Módulo de finura do agregado miúdo

$$MF = \frac{\sum \%M}{100} \quad (1)$$

Onde:

MF = Módulo de finura;

M = Massa retida acumulada (%).

O material contido em cada peneira é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Material contido em cada peneira



Fonte: Autor (2022)

4.3.3 Teor de umidade – Agregado miúdo

Para determinação do teor de umidade, foi utilizada a norma DNER-ME 213:1994, com uso de repetição em triplicata. Primeiramente foi aferido o peso dos três cadinhos e logo após foram adicionados cerca de 10g do agregado miúdo no seu estado úmido aos cadinhos, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Cadinho com amostra úmida



Fonte: Autor (2022)

Em seguida, as amostras foram levadas até a estufa à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Amostras na estufa



Fonte: Autor (2022)

Por fim, após serem retirados da estufa, os três cadinhos foram pesados e com o resultado das massas obtidas, foi possível obter o teor de umidade das amostras, através da Equação 2.

Equação 2 - Teor de umidade do agregado graúdo

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100 \quad (2)$$

Onde:

h = Teor de umidade (%);

P_h = Peso da amostra úmida (g);

P_s = Peso da amostra seca (g).

4.3.4 *Massa específica*

O ensaio de massa específica para o agregado miúdo foi realizado conforme determina a norma ABNT NBR 52:2009. Como a massa específica foi utilizada para o cálculo do traço do concreto, foi empregado o agregado no estado úmido, dispensando a etapa de secagem em estufa que é citado na norma.

O processo de caracterização do agregado miúdo se deu da seguinte forma: primeiramente foram pesados 500 g do material, posteriormente foi inserido em um reservatório graduado e então aferido o peso de todo equipamento. Em seguida, o reservatório foi preenchido com água até a marca de 500 ml e em seguida agitado, com objetivo de eliminar as bolhas de ar, e por último, foi aferido o peso total do equipamento, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Agregado miúdo utilizado no ensaio de massa específica



Fonte: Autor (2022)

Para o agregado graúdo, foram pesados 4000 g do agregado, e foi utilizado um recipiente com dimensões de 25 x 20 x 20 cm, conforme a Figura 12. Para se obter o valor da massa específica é feita a divisão entre a massa do agregado e o seu volume, conforme a Equação 3.

Equação 3 - Massa específica

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Onde:

μ = Massa específica;

m = Massa da substância;

V = Volume da substância.

Figura 12 - Recipiente utilizado para o ensaio de massa específica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2022)

4.4 Dosagem do concreto

Para determinação da dosagem do concreto, foi utilizado o método Brasileiro ACI/ABCP, para sua utilização é necessário conhecer as propriedades do aglomerante e dos agregados empregados, tais dados são exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades dos materiais empregados na fabricação do concreto

Massa específica do cimento (CP II-F-32)	3,06 kg/dm ³
Massa específica da areia	2,60 kg/dm ³
Massa específica da brita	2,65 kg/dm ³
Módulo de finura do agregado miúdo	2,42
Módulo de finura do agregado graúdo	25 mm

Fonte: Autor (2022)

Primeiramente, foi definida a resistência à compressão estimada do concreto com 28 dias ($F_{c,28}$) empregando uma resistência à compressão característica (F_{ck}) de 25 MPa e com desvio padrão na condição A ($S_d = 4,0$ MPa) utilizado em classes de concreto de C10 até C80. Para o cálculo do $F_{c,28}$ foi utilizada a Equação 4, com base na NBR 12655:2015, resultando em um valor de 31,6 MPa de resistência à compressão do concreto com 28 dias.

Equação 4 - Resistência média à compressão

$$F_{c,28} = F_{ck} + 1,65 * S_d \quad (4)$$

Onde:

$F_{c,28}$ = Resistência à compressão média do concreto aos 28 dias (MPa);

F_{ck} = Resistência característica do concreto (MPa);

S_d = Desvio padrão.

Em seguida, foi observado o fator água cimento (a/c) com uso da Curva de Abrams, foi retornado um valor de 0,5. Contudo, visando uma maior resistência do concreto, foi adotado um fator de a/c de 0,4. O consumo de água foi adotado com base no abatimento do concreto, para isso, foi adotado um abatimento de 40 a 60 mm, e com diâmetro máximo do agregado graúdo, com ajuda da Tabela 5.

Tabela 5 - Consumo de água aproximado (l/m³)

Abatimento (mm)	Diâmetro máximo do agregado graúdo				
	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: Adaptado de CURTI (2017)

O consumo de cimento foi obtido através da razão entre o consumo de água e o fator a/c , através da Equação 5.

Equação 5 - Estimativa do consumo de cimento

$$C = \frac{C_{ag}}{a/c} \quad (5)$$

Onde:

C = Consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m³);

C_{ag} = Consumo de água por metro cúbico de concreto (l/m³);

a/c = Relação água/cimento.

O valor do consumo de agregado graúdo, foi obtido através da multiplicação entre o volume compactado seco da brita e a sua massa unitária compactada, com ajuda da Equação 6 e da Tabela 6.

Equação 6 - Estimativa de consumo de agregado graúdo

$$C_p = V_{pc} * MU_c \quad (6)$$

Onde:

C_p = Consumo de agregado graúdo por m³ de concreto (kg/m³);

V_{pc} = Volume compactado seco do agregado graúdo por metro cúbico de concreto;

MU_c = Massa unitária compactada do agregado graúdo por m³ de concreto (kg/m³).

Tabela 6 - Estimativa de consumo de agregado graúdo (m³/m³ de concreto)

Módulo de finura	Diâmetro máximo de agregado graúdo				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,45	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Adaptado de CURTI (2017)

O consumo de agregado miúdo foi obtido através da multiplicação do volume da areia por sua massa específica, com ajuda da Equação 7.

Equação 7 - Consumo de agregado miúdo

$$C_a = \gamma_a * V_a \quad (7)$$

Onde:

C_a = Consumo de agregado miúdo por m³ de concreto (m³);

γ_a = Massa específica do agregado miúdo;

V_a = Volume do agregado miúdo por m³ de concreto (m³).

4.5 Índice de atividade pozolânica (IAP)

O índice de atividade pozolânica (IAP) foi obtido seguindo os procedimentos da NBR 5752:2014, através do método físico. Nesse método, o IAP é obtido através da razão entre o valor de resistência à compressão simples de concretos fabricados com adição parcial do cimento e o concreto de referência (sem adição), com auxílio da Equação 8.

Equação 8 - Índice de atividade pozolânica

$$IAP = \frac{F_{cb}}{F_{ca}} * 100 \quad (8)$$

Onde:

IAP = Índice de atividade pozolânica do concreto aos 28 dias (%);

F_{cb} = Resistência da resistência à compressão do concreto com adição aos 28 dias (MPa);

F_{ca} = Resistência da resistência à compressão do concreto sem adição (traço de referência) aos 28 dias (MPa).

4.6 Moldagem dos corpos de prova

4.6.1 *Corpos de prova de referência*

Primeiramente foram moldados os corpos de prova de referência, sem nenhuma adição de CBC. A mistura dos materiais foi realizada de forma manual, até se obter uma mistura homogênea, o ensaio foi realizado em triplicata.

Para o processo de moldagem dos corpos de prova foram seguidas as recomendações da norma ABNT NBR 5738:2015. Com uso de moldes cilíndricos de dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, foi aplicada uma camada de desmoldante no interior dos moldes com intuito de facilitar a retirada do corpo de prova do molde, de modo eficaz e apropriado.

O processo de mistura seguiu os seguintes passos: homogeneização e mistura do agregado graúdo com o miúdo; acréscimo da metade da água a ser aplicada; adição do cimento com a sobra da água e mistura final dos materiais.

Com o concreto já devidamente misturado, e antes de serem inseridos nos moldes, foi realizado o ensaio de *Slump Test*, com intuito de verificação da fluidez do concreto e confirmar se o abatimento está dentro do limite determinado.

Logo após, o concreto foi inserido dentro dos moldes e dividido em duas camadas de volume iguais, onde, cada camada foi compactada com a utilização de uma haste metálica, sendo aplicado 12 golpes para cada camada, com intuito de evitar vazios.

Por último, após o processo de compactação da última camada foi feito um rasamento dos moldes com o auxílio de uma colher de pedreiro, como exibido na Figura 13.

Figura 13 - Processo de confecção dos corpos de prova



Fonte: Autor (2022)

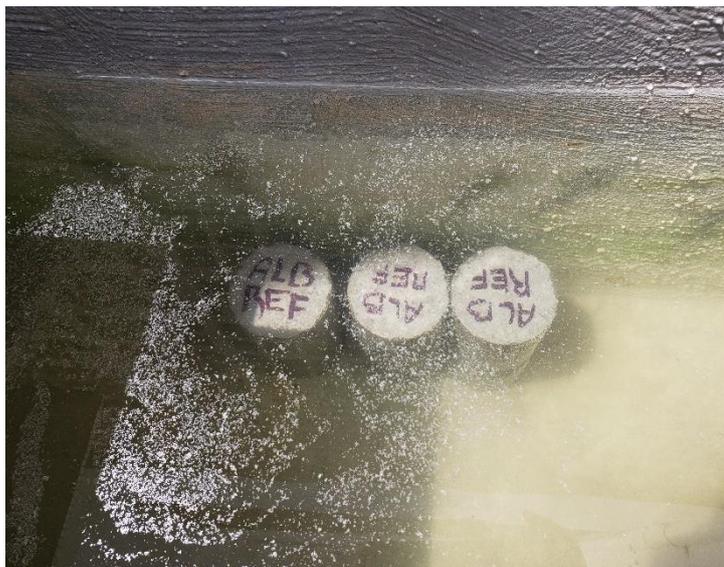
Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados (Figura 14) e seguiram para a cura úmida (Figura 15) até o dia de rompimento (28 dias após o dia de moldagem). Foi moldado uma amostra sem adição resultando em um total de 3 corpos de prova. As amostras de referência foram denominadas de Amostra A.

Figura 14 - Corpos de prova desmoldados



Fonte: Autor (2022)

Figura 15 - Corpos de prova em cura submersa



Fonte: Autor (2022)

4.6.2 *Corpos de prova com substituição parcial de CBC*

Os corpos de prova com substituição parcial de CBC foram moldados seguindo os mesmos procedimentos dos corpos de prova de referência. Foram moldadas 4 amostras com adição, resultando em um total de 12 corpos de provas.

O plano de confecção dos corpos de prova com adição de CBC foi o seguinte:

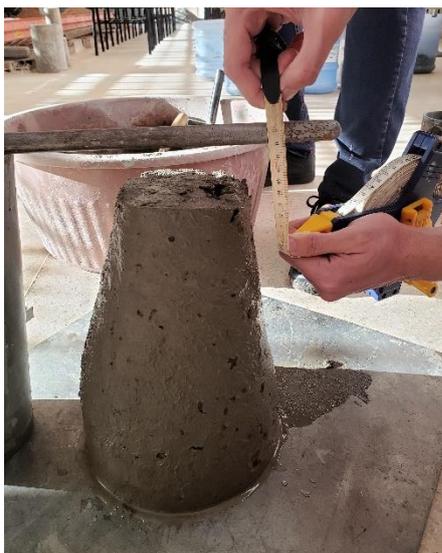
- Amostra B: Amostras com adição de 3% de CBC calcinada a 700°C;
- Amostra C: Amostras com adição de 3% de CBC calcinada a 800°C;
- Amostra D: Amostras com adição de 5% de CBC calcinada a 700°C;
- Amostra E: Amostras com adição de 5% de CBC calcinada a 800°C.

4.7 *Ensaio de abatimento do concreto*

O ensaio de consistência e fluidez do concreto foi realizado com auxílio de um tronco cônico e seguiu as recomendações da norma ABNT NBR 16889:2020. Primeiramente, foram umedecidos o molde e a placa base com a mesma água que foi utilizada no traço e então posicionado o molde sobre a placa, em seguida, com o molde e a placa sobre o chão, foi pressionado com os pés as aletas do molde.

Logo após, o molde foi preenchido em três camadas de alturas iguais, onde cada camada foi compactada com o uso de uma haste metal por meio de 25 golpes. Por fim, foi retirado o molde e aferido qual foi a diminuição da altura do concreto em relação ao molde, como é mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Ensaio de abatimento do tronco cone



Fonte: Autor (2022)

4.8 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão seguiu todas as recomendações da norma ABNT NBR 5739:2018 e teve como finalidade verificar a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos de concreto, que foram moldados com base na norma ABNT NBR 5738:2015. O ensaio foi realizado após 28 dias de cura do material e realizado em triplicata.

Primeiramente foi realizada a inspeção visual dos corpos de prova e feita a limpeza e secagem dos mesmos. Logo após, foi realizada a limpeza das faces dos pratos da prensa hidráulica. Em seguida, os corpos de prova foram levados até a prensa hidráulica, onde foi ajustada para corresponder ao diâmetro dos corpos de prova em questão (diâmetro de 10 cm) mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Corpo de prova posicionado na prensa



Fonte: Autor (2022)

Por último, o carregamento do ensaio foi inserido de forma linear, crescente e sem impactos, até o momento que ocorrer a ruptura dos corpos de prova, o corpo de prova após o rompimento é ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Corpo de prova após rompimento



Fonte: Autor (2022)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização dos agregados

5.1.1 Teor de umidade do agregado miúdo

Os resultados alcançados no ensaio de determinação do teor de umidade do agregado miúdo estão apresentados na Tabela 7. A partir da análise dos dados, foi possível concluir que o teor de umidade da areia, foi de $0,392 \pm 0,070\%$. O ensaio foi realizado em triplicata.

Tabela 7 - Informações do ensaio de teor de umidade

Cadinho	Massa do recipiente (g)	Massa úmida (g)	Peso da amostra úmida, P_h (g)	Peso da amostra seca, P_s (g)	Teor de umidade, h (%)	Teor de umidade médio (%)	Desvio padrão
1	8,03	10,02	18,05	18,01	0,363		
2	7,94	10,02	17,96	17,91	0,472	0,392	0,070
3	8,11	10	18,11	18,08	0,342		

Fonte: Autor (2022)

5.1.2 Análise granulométrica

Para obtenção do módulo de finura da areia, é necessário determinar primeiramente sua granulometria. A Tabela 8 apresenta os dados de distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Tabela 8 - Informações da análise granulométrica do agregado miúdo

Peneira (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (g)	Acumulado (%)	Módulo de finura
4,8	25,5	2,56	25,5	2,56	
2,4	25,58	2,57	51,08	5,13	
1,2	85,51	8,58	136,59	13,71	
0,6	247,42	24,84	384,01	38,55	2,42
0,3	466,23	46,81	850,24	85,36	
0,15	108,81	10,92	959,05	96,28	
Fundo	37,03	3,72	996,08	100,00	

Fonte: Autor (2022)

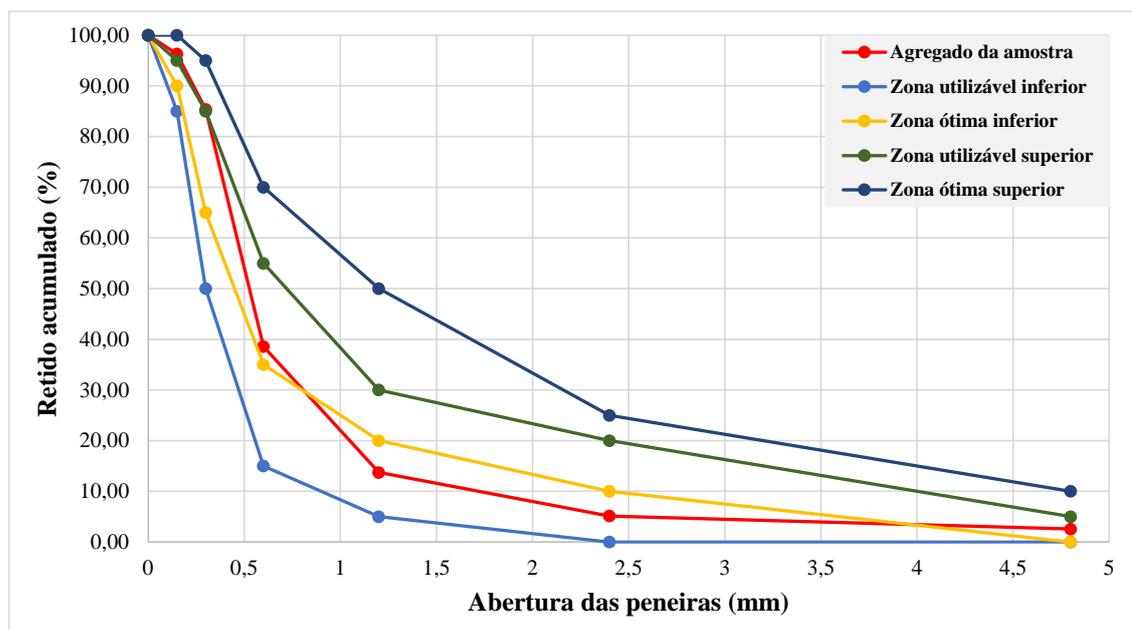
O módulo de finura da areia foi determinado de acordo com a Equação 1. A partir do valor do módulo de finura (2,42), a areia foi classificada como areia média de acordo com os valores apresentados na Tabela 3. Com base na Tabela 9 adaptada da NBR 7211:2005, que determina os limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo, a areia analisada está dentro dos limites úteis utilizáveis, podendo ser empregada na produção de concreto.

Tabela 9 - Limites de distribuição granulométrica do agregado graúdo

Peneira (mm)	Porcentagem em massa retida acumulada			
	Limite inferior (%)		Limite superior (%)	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
4,8	0	0	5	10
2,4	0	10	20	25
1,2	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7211 (2009)

A partir da análise granulométrica do agregado miúdo foi possível ainda, traçar a curva de distribuição granulométrica, pela relação entre o percentual de massa retida e as aberturas das peneiras, em mm, como mostrado no Gráfico 1. A curva obtida mostrou que a distribuição de grãos não se comportou de maneira uniforme, sendo boa parte do material retido nas peneiras de abertura igual a 0,3 mm e 0,15 mm. A curva mesmo apresentando distribuição não homogênea ficou acima do limite útil, podendo o material, ser utilizado como agregado miúdo no processo de fabricação do concreto.

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo

Fonte: Autor (2022)

A Tabela 10 apresenta os dados de distribuição granulométrica do agregado graúdo. O diâmetro máximo de partícula apresentado foi o de 19 mm. Consultando a Tabela 2 conclui-se que o agregado graúdo pode ser classificado como brita 1. A distribuição granulométrica do agregado graúdo atende aos limites de distribuição granulométrica dentro da zona utilizável, como estabelecido na Tabela 11 adaptada da NBR 7211:2005, podendo ser utilizado na produção de concreto.

Tabela 10 - Informações da análise granulométrica do agregado graúdo

Peneira (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (g)	Acumulado (%)	Módulo de finura
25	0	0,00	0	0,00	
19	538,74	10,78	538,74	10,78	
12,5	3344,32	66,94	3883,06	77,72	
9,5	819,15	16,40	4702,21	94,12	
6,3	271,81	5,44	4974,02	99,56	3,82
4,8	11,5	0,23	4985,52	99,79	
2,4	4,86	0,10	4990,38	99,88	
1,2	0,36	0,01	4990,74	99,89	
Fundo	5,42	0,11	4996,16	100,00	

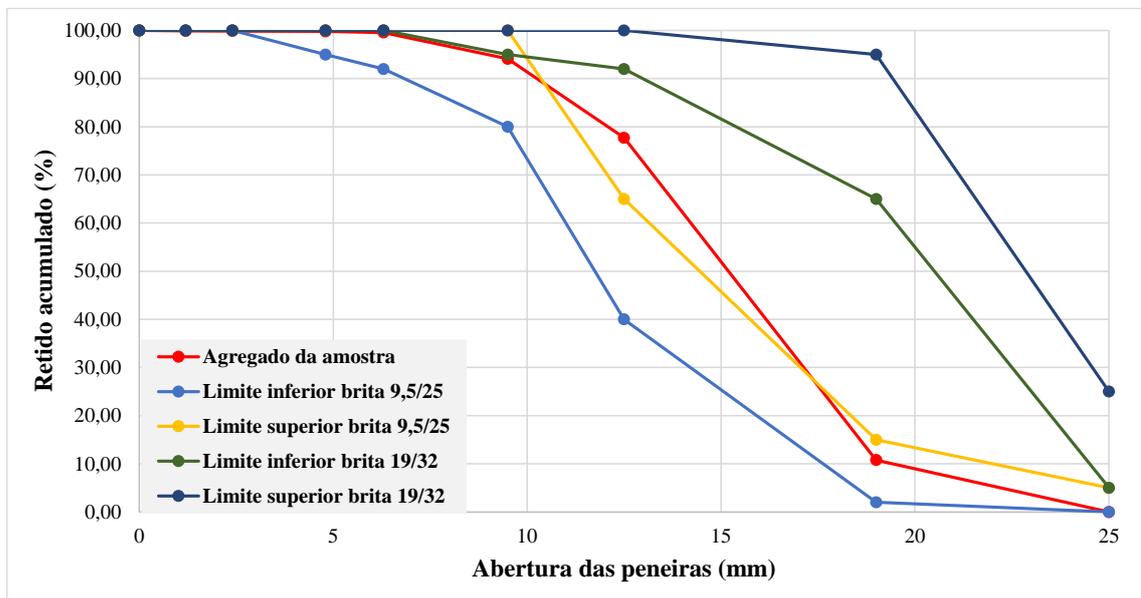
Fonte: Autor (2022)

Tabela 11 - Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo

Peneira (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limite Brita 9,5 / 25 (%)		Limite Brita 19 / 32 (%)	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
25	0	5	5	25
19	2	15	65	95
12,5	40	65	92	100
9,5	80	100	95	100
6,3	92	100	100	100
4,8	95	100	100	100
2,4	100	100	100	100
1,2	100	100	100	100

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7211 (2009)

O Gráfico 2 exibe a curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo, que não apresentou distribuição homogênea dos grãos, sendo a maior parte do material retido nas peneiras de abertura igual a 12,5 mm e 9,5 mm.

Gráfico 2 - Curva granulométrica do agrega graúdo

Fonte: Autor (2022)

5.2 Determinação do traço

De posse dos valores das propriedades do aglomerante e dos agregados empregados (Tabela 12), com base no método Brasileiro ACI/ABCP, para determinação da composição do traço, foi estabelecida a relação entre todos os consumos e o consumo do cimento, resultando na composição apresentada na Tabela 13.

Tabela 12 - Propriedades dos materiais empregados na fabricação do concreto

Massa específica do cimento (CP II-F-32)	3,06 kg/dm ³
Massa específica da areia	2,60 kg/dm ³
Massa específica da brita	2,65 kg/dm ³
Módulo de finura do agregado miúdo	2,42
Módulo de finura do agregado graúdo	25 mm

Fonte: Autor (2022)

Tabela 13 - Traço calculado

Fator a/c	Traço
0,4	1: 1,276: 2,21: 0,4

Fonte: Autor (2022)

A incorporação da CBC foi efetuada de modo parcial, nos teores de 3% e 5% para cada temperatura empregada na calcinação (700°C e 800°C). A escolha desses teores de adição se deu com base na literatura existente, onde autores como Silveira (2010) e Ávila (2016) obtiveram resultados satisfatórios. A adição da CBC se deu como substituição parcial ao cimento, onde foi retirado a parte inteira do cimento do traço calculado e acrescentado CBC, resultado em uma razão de 0,97 e 0,95 parte de cimento para os traços com substituição de 3% e 5% de CBC respectivamente. Foi então estabelecido o traço unitário para cada mistura, onde seus valores foram alcançados através da razão entre os consumos calculados previamente e o consumo de cimento. A composição dos traços unitários é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Proporção do traço com substituição parcial de CBC

Substituição parcial de CBC ao cimento	Traço com proporção de cimento
0% (REFERÊNCIA)	1: 1,276: 2,21: 0,4
3%	0,97: 1,276: 2,21: 0,4
5%	0,95: 1,276: 2,21: 0,4

Fonte: Autor (2022)

Para conferência da eficiência do traço de referência calculado, foram fabricados corpos de prova para serem rompidos aos 28 dias de cura sem adição de CBC, com finalidade de verificar se a resistência à compressão calculada foi atendida. O ensaio foi realizado em triplicata e o resultado obtido está exposto na Tabela 15.

Tabela 15 - Resistência à compressão do traço de referência aos 28 dias

Relação água/cimento	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
0,4	35,15

Fonte: Autor (2022)

Através do resultado obtido, foi possível concluir que o traço atendeu a resistência à compressão de projeto, desta forma, permaneceu como o traço de referência para pesquisa.

5.3 Ensaio de abatimento do concreto

Também chamado de ensaio de *Slump Test*, é executado por meio de um tronco cônico com finalidade de aferir a consistência e fluidez do concreto. Tem relevância na pesquisa pois com ele é possível comparar o concreto de referência (sem adição) com os concretos com adição de CBC. Os concretos com adição apresentam a substituição parcial de CBC ao cimento, nos teores de 3% e 5% nas temperaturas utilizadas (700°C e 800°C). A Tabela 16 apresenta os resultados adquiridos no ensaio do *Slump Test* para todas às amostras confeccionadas.

Tabela 16 - Informações do ensaio de abatimento do concreto das amostras

Amostra utilizada	Altura do abatimento (cm)	Diferença em comparação com o traço de referência (%)
A (REFERÊNCIA)	2,90	-
B (adição de 3% a 700°C)	1,80	-37,93
C (adição de 3% a 800°C)	2,30	-20,69
D (adição de 5% a 700°C)	0,8	-72,41
E (adição de 5% a 800°C)	0,9	-68,97

Fonte: Autor (2022)

Através da análise da Tabela 16, é possível concluir que o concreto de referência não ultrapassou o limite de abatimento previsto, que era de 40 mm a 60 mm. Para as amostras com adições, houve um padrão de diminuição da altura de abatimento quando aumentado o teor de CBC na mistura do concreto, ou seja, quanto maior a quantidade de CBC na mistura, menor foi o abatimento. Quando verificadas as amostras com adição de CBC junto com a amostra de referência, foram constatadas reduções percentuais de abatimentos relevantes, de -31,93%, -20,69%, -72,41% e -68,97% para as misturas com percentual de substituição de 3% adquirido a 700°C, 3% adquirido a 800°C, 5% adquirido a 700°C e 5% adquirido a 800°C respectivamente. Foi concluído também que a temperatura de calcinação da CBC não interfere de forma significativa no abatimento do concreto, retornando resultados parecidos para ambas as temperaturas, visto que a quantidade de água utilizada nos traços foi constante para todas as amostras.

Uma explicação para essa redução no abatimento do concreto segundo Sampaio *et al.* (2014) é a composição da CBC, que é constituída por partículas muito finas, que desencadeiam o efeito de absorção de água, que seria necessária para manter a trabalhabilidade do concreto. Quando comparado com a amostra de referência, todas as amostras com adição apresentaram um concreto mais enxuto, podendo gerar um problema de trabalhabilidade quando for utilizado em obras na construção civil, ocasionando o risco de surgimento de vazios nas estruturas, que podem comprometer sua resistência e durabilidade.

Como observado na Tabela 16, todas as amostras com adição de CBC obtiveram um abatimento de cone menor que o considerado na dosagem do concreto (40 a 60 mm), sendo as amostras com o teor de 5% de adição àquelas com menores valores de abatimento entre todas as amostras analisadas.

A Figura 19 ilustra o ensaio de abatimento do concreto, sendo da esquerda para direita a amostra de referência, amostra com adição de 3% de CBC e amostra com adição de 5% de CBC.

Figura 19 – Amostras durante ensaio de abatimento do concreto.



Fonte: Autor (2022)

A norma ABNT NBR NM 67:1998 ressalta que o resultado de abatimento não afeta a resistência à compressão do concreto, servindo apenas como parâmetro de aferição da consistência do concreto. Esse baixo abatimento do concreto representa uma limitada trabalhabilidade do material, podendo ser corrigida com uso de aditivos superplastificantes, com intuito de manter a resistência à compressão do material e aumentar sua trabalhabilidade.

5.4 Índice de atividade pozolânica

A determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) é necessária para verificar se a adição mineral incorporada ao concreto atende ao percentual mínimo de 75% da resistência à compressão da argamassa de referência, exigido pela norma ABNT NBR 12653:2005, podendo então ser atribuído potencial pozolânico à adição mineral ensaiada. A Tabela 17 apresenta os valores dos IAP's das amostras para cada temperatura de obtenção de cinzas (700°C e 800°C) e para os dois teores de adição (3% e 5%), calculados com o auxílio da Equação 8, onde o IAP foi obtido a partir da razão entre o valor de resistência à compressão simples de concretos fabricados com adição parcial do cimento e o concreto de referência (sem adição).

Tabela 17 - Índice de atividade pozolânica (IAP)

Dados	CBC 700°C		CBC 800°C	
Teor de CBC (%)	3	5	3	5
IAP (%)	89,90	63,13	100,41	80,33

Fonte: Autor (2022)

Com base na análise dos valores da Tabela 17, observa-se que houve aumento da atividade pozolânica com o aumento da temperatura para as adições de 3% e 5%. Foi também observado que, quando elevado o teor de adição de 3% para 5% houve um decréscimo do IAP, para as duas temperaturas de calcinação. O concreto moldado com adição de 3% de CBC calcinada a 800°C obteve o maior IAP (100,41%). O aumento da atividade pozolânica está associado com o aumento da quantidade de material amorfo, que é alcançado em temperaturas mais altas de queima. Santos *et al.* (2016) avaliaram a influência da temperatura de calcinação na pozolanicidade da cinza de bagaço de cana-de-açúcar, e concluíram que as cinzas obtidas em maiores temperaturas apresentaram os resultados acima do valor mínimo de índice de atividade pozolânica, devido à mudança do α -quartzo para o β -quartzo, que é fase vítrea da sílica. Tal fração vítrea, gradativamente solubilizada pela ação dos íons hidroxila da solução, reage com os íons cálcio para a precipitação dos hidratos sobre as partículas da CBC (MALEK, 2005).

Contudo, verifica-se que a amostra com adição de 5% CBC calcinada a 700°C não alcançou o percentual de IAP mínimo exigido pela norma, quando comparado a amostra de referência. Tal fato pode ser devido a algum tipo de impureza residual contido na amostra, pois mesmo seguindo a metodologia para eliminação de impurezas, certas partículas podem contaminar a amostra durante seu manuseio. As demais amostras obtiveram o IAP acima de 75%, podendo dessa forma serem classificadas e utilizadas como adições minerais pozolânicas.

5.5 Ensaio de resistência à compressão

Para cada amostra foram moldados três corpos de prova, totalizando 15 amostras. A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão para todas as amostras da pesquisa.

Tabela 18 - Informações do ensaio de resistência à compressão

Amostra	Resistência	Resistência	Resistência	Resistência
	CP I (MPa)	CP II (MPa)	CP III (MPa)	média (MPa)
A (REFERÊNCIA)	32,26	33,94	36,26	35,15
B (adição de 3% de CBC a 700°C)	34,07	34,85	25,88	31,60
C (adição de 3% de CBC a 800°C)	37,74	38,42	29,73	35,30
D (adição de 5% de CBC a 700°C)	20,57	28,97	17,04	22,19
E (adição de 5% de CBC a 800°C)	29,74	24,02	30,96	28,24

Fonte: Autor (2022)

Através da análise dos valores contidos na Tabela 18 observa-se que, todas as amostras apresentaram resistência superior ao mínimo determinado pela NBR 6118:2014 que especifica que a resistência à compressão mínima para utilização em concreto estrutural é de 20 MPa, e que as amostras B, C e E superaram a resistência mínima definida em projeto, que foi de 25 MPa. Houve aumento da resistência média à compressão na Amostra C, quando comparado a amostra de referência (Amostra A), representando um ganho de 0,42% de resistência à compressão. É possível atribuir tal aumento à alta quantidade de sílica presente na CBC, o que a caracteriza como material pozolânico.

Apenas a amostra D não obteve a resistência de projeto ($F_{ck} = 25$ MPa) apresentando um decréscimo de -36,87%, em relação a amostra de referência, o que pode ser resultado de algum tipo de impureza residual, presente na CBC.

Foi observada uma relação entre temperatura de calcinação das cinzas e resistência à compressão, a elevação da temperatura de 700°C para 800°C resultou em ganhos de resistência em ambos teores de adição (3% e 5%). A Tabela 19 apresenta os ganhos em relação as duas temperaturas.

Tabela 19 - Relação entre a resistência média à compressão e temperatura de calcinação da CBC

Teor de CBC (%)	Resistência média à compressão (MPa)		Ganho de resistência (%)
	700°C	800°C	
3	31,60	35,30	11,71
5	22,19	28,24	27,26

Fonte: Autor (2022)

A elevação da temperatura de calcinação das cinzas de 700°C para 800°C quando a adição de CBC foi de 3% representou um aumento de resistência de 11,71% elevando a resistência média à compressão de 31,60 MPa para 35,30 MPa, superando a resistência média da amostra de referência (Amostra A = 35,15 MPa). O maior ganho se obteve quando o teor de adição foi de 5%, onde houve acréscimo de 27,26% da resistência, elevando o valor da resistência média à compressão de 22,19 MPa para 28,74 MPa.

Analisando-se a relação entre a resistência à compressão média e a porcentagem de adição de CBC, observou-se que o incremento de 3% para 5% CBC resultou em decréscimo da resistência média. A Tabela 20 apresenta a redução da resistência média à compressão em relação ao teor de adição.

Tabela 20 - Relação entre resistência média à compressão e porcentagem de adição de CBC ao concreto

Temperatura de calcinação (°C)	Resistência média à compressão (MPa)		Redução de resistência (%)
	3% de CBC	5% de CBC	
700	31,60	22,19	-29,78
800	35,30	28,24	-20,00

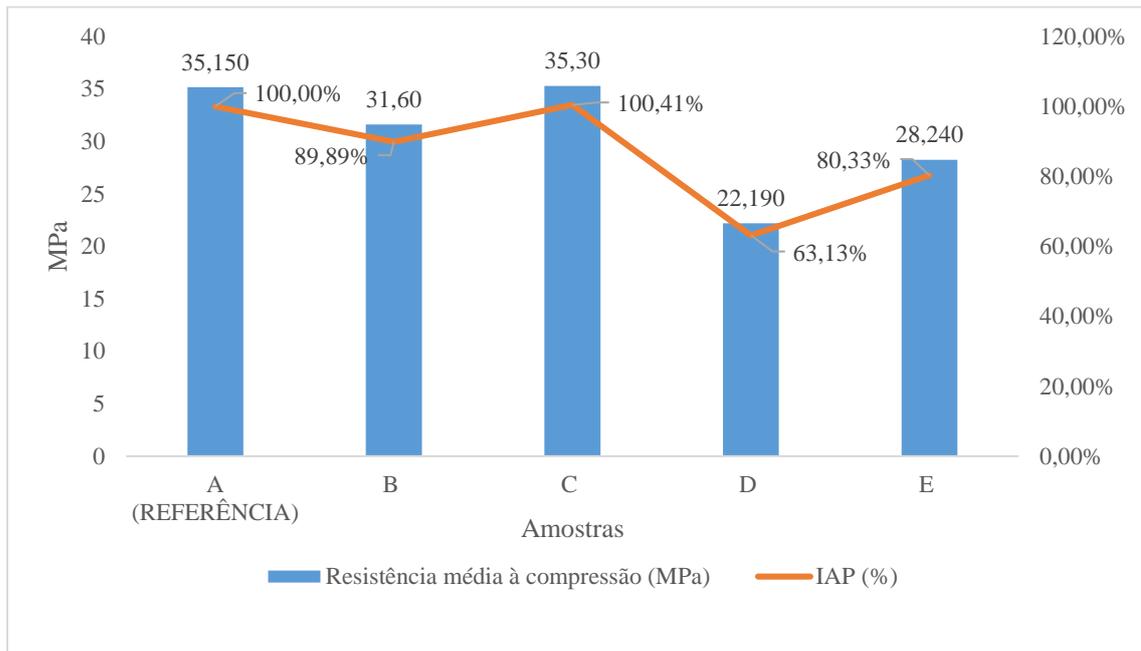
Fonte: Autor (2022)

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 partir dos dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, foi possível notar uma relação direta entre o IAP e a resistência média à compressão, onde os melhores resultados de resistência à compressão se deram quando o IAP foi maior.

A Amostra C (adição de 3% de CBC a 800°C) foi a de melhor desempenho na resistência média à compressão com resultado de 35,3 MPa, que também apresentou o maior valor de IAP, 100,41%. O Gráfico 3 demonstra relação entre resistência média à compressão e IAP das amostras.

Gráfico 3 - Relação entre resistência média à compressão e IAP



Fonte: Autor (2022)

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A CBC 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 CBC e a resistência média à compressão, para ambas as temperaturas de queima.

Todas as amostras apresentaram resistência superior ao mínimo determinado pela NBR 6118:2014. O aumento da temperatura de calcinação da CBC de 700°C para 800°C resultou em ganhos de resistência tanto na adição de 3% quanto na adição de 5% de CBC.

Analisando-se a relação entre a resistência à compressão média e a percentagem de adição de CBC, observou-se que o incremento de 3% para 5% CBC resultou em decréscimo da resistência média à compressão.

O concreto moldado com adição de 3% CBC calcinada a 800°C apresentou maior o IAP (100,41 %) e resistência média à compressão maior que a amostra de referência, superando a resistência média da amostra de referência (Amostra A = 35,15 MPa), apresentando a melhor relação entre os parâmetros avaliados nesse estudo.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Em virtude de limitações quando a disponibilidades de equipamentos e do tempo para conclusão desta pesquisa, recomenda-se para trabalhos futuros a investigação com tempos de cura mais prolongados, pois a utilização de materiais pozolânicos no concreto fica muitas vezes prejudicada devida à idade padronizada para a obtenção da resistência à compressão de projeto sendo geralmente 28 dias, não levando em consideração o ganho de resistência que uma mistura com adições pozolânicas tem entre as idades de 28 e 90 dias.

Outro fator que pode ser fonte de pesquisa é a moagem das cinzas, pois a cinza do bagaço de cana 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.

REFERÊNCIAS

ABREU, Aguida Gomes de. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. 1998.

ALMEIDA, L. C. **Concreto**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002, p. 03. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2022.

ÁVILA, T. C.; FERNANDES, S. E.; AKASAKI, J. L. A influência da substituição de cimento por cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em concretos. **Revista Científica ANAP Brasil**, [S. l.], v. 9, n. 17, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Versão corrigida: 2015, Rio de Janeiro, 2015

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Versão corrigida: 2016, Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM C618:1978**. Especificação padrão para cinza volante e pozolana natural crua ou calcinada para uso como mistura mineral em concreto de cimento Portland.

BORJA, Edilberto Vitorino de. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011.

BRITO, M. C. **Apostila Sobre Concreto Armado**, 2010. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/apostila-sobre-concreto-armado/4756032/>>. Acesso em: 20 set. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Série Histórica das Safras**. Brasília: 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>>. Acesso em: 08 out. 2022.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. **Avaliação da reatividade da cinza residual do bagaço de cana de açúcar com cimento Portland e cal**. 2005. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais... Olinda, Brasil: IBRACON. CD-ROM.

CORDEIRO, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Fairbairn, E. M. R.; Tavares, L. M. M. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement & Concrete Composites**, v.30, p.410-418, 2008.

CORDEIRO, G.C. **Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana –de-açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; FAIRBAIRN, Eduardo de Moraes Rego. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, p. 82-86, 2009.

COUTINHO, A. de S.; GONÇALVES, Arlindo. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa: **Laboratório Nacional de Engenharia Civil**, p. 401, 1997.

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.

CURTI, R. **Propriedades e dosagem do concreto**. 2017.

DA FONSECA, Gustavo Celso. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições minerais para concreto estrutural. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**, v. 1, p. 345-379, 2005.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. **DNER-ME 213: Solo – Determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 1994.

DOS SANTOS, F. A. R. A.; MARTINS, M. R. **Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo (NBR NM-248/2003)**. 2010.

FAVARATO, Lucas Fadini et al. Avaliação teórico-experimental da resistência à compressão de concretos através de ensaios não destrutivos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.

FELICETTI, M. R., **Uso De Cinza De Bagaço De Cana-De-Açúcar Em Cimento Portland Como Mecanismo De Desenvolvimento Limpo**, Tese de doutorado, PPGEM, UFOP, (2016).

FERNANDES, Sérgio Eduardo et al. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, p. 909-923, 2015.

FURQUIM, Paulo Ricardo de Vargas. **Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais**. 2006.

HELENE, P.R.L; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. *In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.).* **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712p.

HELENE, Paulo. Vida útil das estruturas de concreto. *In: IV Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções. Anais... Porto Alegre, RS. 1997.*

LIMA, S. A., et al., “Análise de argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo”, **Revista Tecnológica**, v. 18, pp. 87-97, 2009.

LIMA, Sofia Araújo et al. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído**, v. 11, p. 201-212, 2011.

MALEK, R. I.; KHALIL, Z. H.; IMBABY, S. S.; ROY, D.M. The contribution of class-F fly ash to the strength of cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1152 – 1154, 2005.

MALHOTRA, V.M., MEHTA, P.K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. First Ed. Gordon and Breach Publishers, Amsterdam, 1996.

MANHÃES, M. S. Adubação, correção do solo e uso de resíduos da agroindústria. **Tecnologia canavieira nas Regiões Norte Fluminense e Sul do Espírito Santo–Boletim Técnico**, n. 12, p. 24-31, 1999.

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

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

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

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

MIRANDA, E. C. B., CAMPOS, G. S., NETO, E. A. M., CONCEIÇÃO, A. L. S. F., DIAS, C. M. RIBEIRO, **Os Indicadores de Ecoeficiência de Concretos Contendo Adições Minerais**, Revista Brasileira de Engenharia Civil, v. 1, n. 1, 2021.

NUNES, Igo Henrique Silva. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá.

PAULA, Marcos de Oliveira. **Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

PAULA, Marcos O. de et al. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 353-357, 2009.

RIBEIRO, A. V. S., PRUDÊNCIO, J. L. R., MATOS, P. R., TAIRA, A., **Influência de Adições Minerais na Elevação da Temperatura de Concretos Massa de Elevada Resistência à Compressão**, Matéria, v. 26, n. 1, 2021.

RIBEIRO, C. C. **Materiais de construção civil**. Editora UFMG, 2002.

SALES, A., LIMA, S. A., “Use of brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement”. **Waste Management**, v. 30, n. 6, pp. 1114-1122, 2010.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, p. 637-647, 2014.

SANTOS, T. A., ARGOLO, R.A., ANDRADE, H. M. C., RIBEIRO, D. V., **Influência Da Temperatura De Calcinação Na Pozolanicidade Da Cinza De Bagaço De Cana-De-Açúcar (CBCA)**, Anais do CBECiMat, 2016.

SILVEIRA, Daniel Antônio. **Influência da substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual no concreto**. 2010.

SOUZA, Guilherme N. et al. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**. 2007. p. 1-11.

TASHIMA, Mauro Mitsuuchi. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**, 2006.

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.

VAGHETTI, Marcos Alberto Oss. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais.** 2005.

XUEQUAN, W., et al., “Study on steel slag and fly ash composite portland cement”, **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 7, pp. 1103-1106, 1999.