



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
ENGENHARIA CIVIL

MARÍLIA DO CARMO PACHECO

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PELACINZA DO BAGAÇO
DA CANA-DE-AÇUCAR COM ADIÇÃO DE SILICA ATIVA NO CONCRETO**

Palmas/TO

2021

MARÍLIA DO CARMO PACHECO

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PELACINZA DO BAGAÇO
DA CANA-DE-AÇUCAR COM ADIÇÃO DE SILICA ATIVA NO CONCRETO**

Projeto de TCC apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, UFT, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Roldão Pimentel de Araújo Júnior
Coorientador: Prof. Dr. Adão Lincon Bezerra Montel

Palmas/TO

2021

MARÍLIA DO CARMO PACHECO

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PELA CINZADO BAGAÇO
DA CANA-DE-AÇUCAR COM ADIÇÃO DE SILICA ATIVA NO CONCRETO**

Projeto de TCC apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, UFT, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado pela seguinte banca examinadora:

Data de aprovação: ____ / ____ / ____

Banca Examinadora

Prof. Dr. Roldão Pimentel de Araújo Júnior (Orientador)
Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Adão Lincon Bezerra Montel
Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro
Universidade Federal do Tocantins

Palmas/TO

2021

*Gostaria de dedicar esse TCC à minha família
que tanto se empenhou pelos meus estudos e
desenvolvimento em todas as áreas, sem eles
eu não estaria aqui e em especial ao meu avô
João Batista, que não pôde estar presente
neste momento da minha trajetória, mas esteve
em tantos outros anteriores a este.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me dado forças e uma vontade de fazer maior que as dificuldades encontradas no caminho.

À Universidade Federal do Tocantins, por proporcionar vivências das mais variadas vertentes no meio acadêmico, indo de atividades científicas à culturais e esportivas.

Ao meu orientador professor Roldão Pimentel de Araújo Júnior, pelo apoio e tempo dedicado, e ao meu co-orientador Adão Lincon Bezerra Montel por todo suporte, paciência e inspiração nessa jornada acadêmica, desde os projetos de pesquisa até aqui.

Aos meus pais Antônia Mendes do Carmo e João Batista Pacheco Filho, por me ensinarem o valor do conhecimento e a não medir esforços para alcançá-lo e às minhas irmãs Ana Carolina do Carmo Pacheco e Ana Beatriz do Carmo Pacheco, por todo amor e parceria nessa caminhada.

Aos meus amigos Samantha Falcão, Marcelo Dérick, Werveson Reis e Breno Gomes pelo suporte e irmandade na trajetória universitária. Também aos meus amigos e parceiros Amanda Silva, Nathália Costa, Gabriel Feitosa, Ananda Beatriz, Rodrigo Prado, Ana Giullia, Igor Mendanha, Alison Rhuan e Kalleb Luan pela aliança na vida acadêmica e contribuição para os procedimentos de ensaio e elaboração desta pesquisa.

Ao meu amigo Augusto Alves e a técnica do laboratório de Materiais de Construção Jéssica por todo auxílio na execução dos ensaios.

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o potencial da CBC com adição de sílica ativa e sua influência no concreto como substituição parcial do cimento *Portland*. A cana-de-açúcar é produzida em alta escala no Brasil, e um dos seus subprodutos é o bagaço da cana-de-açúcar, que pode ser utilizado para geração de energia através da queima, em razão do seu poder calorífico. Em contrapartida esse processo fornece um resíduo chamado cinza do bagaço da cana-de-açúcar, que é considerado um grande poluente quando descartado de maneira imprópria no meio ambiente. Essa cinza possui propriedades de adição pozolânica, podendo substituir parcialmente teores do cimento *Portland*, ocasionando melhoria nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. Esse trabalho desenvolve estudo da cana-de-açúcar produzida no município de Pedro Afonso -TO, e propõe substituição nos teores de 5%, 10% e 15% de cimento *Portland* por cinza de bagaço da cana, sendo analisado as propriedades físicas dos agregados miúdos, grãos e CBC como também as propriedades físicas do concreto no estado fresco e endurecido. Os resultados alcançados apontam que quanto maior o percentual de substituição de cimento *Portland* por cinza do bagaço de cana-de-açúcar mais a resistência tende a cair em comparação ao traço referência, e que o traço no teor de 5% de substituição obteve resultados mais próximos ao do traço referência, tornando-se a substituição mais viável.

Palavras-chaves: Concreto, Cinza do bagaço da cana-de-açúcar, sílica ativa, substituição.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the potential of CBA with the addition of active silica and its influence on concrete as a partial replacement of *Portland* cement. Sugarcane is produced on a large scale in Brazil, and one of its by-products is sugarcane bagasse, which can be used to generate energy through burning, due to its calorific value. In contrast, this process provides a residue called sugarcane bagasse ash, which is considered a major pollutant when improperly disposed of in the environment. This ash has properties of pozzolanic addition, being able to partially substitute contents of *Portland* cement, causing improvement in the physical and mechanical properties of the concrete. This work develops a study of the sugarcane produced in the municipality of Pedro Afonso -TO, and proposes substitution in the contents of 5%, 10% and 15% of Portland cement by sugarcane bagasse ash, analyzing the physical properties of the small aggregates, large aggregates and CBC as well as the physical properties of the concrete in the fresh and hardened state. The results obtained show that the higher the percentage of substitution of Portland cement for sugarcane bagasse ash, the more the resistance tends to fall in comparison to the reference trait, and that the trait in the 5% substitution content obtained more results. close to the reference line, making the substitution more viable.

Palavras-chaves: Concrete, Sugarcane bagasse ash, silica fume, substitution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Processo de fabricação da sílica ativa.....	21
Figura 2: Rota experimental desenvolvida neste trabalho.....	27
Figura 3: Materiais devidamente pesados e armazenados para execução do traço.....	29
Figura 4: Corpos de prova recém moldados do traço de 10%.....	29
Figura 5: Corpos de prova do traço referência momentos antes da cura úmida.....	29
Figura 6: Análise espectro de infravermelho.....	32
Figura 7: Curva granulométrica agregado miúdo.....	34
Figura 8: Curva granulométrica agregado graúdo.....	36
Figura 9: Nível de consistência do concreto.....	38
Figura 10: Ensaio de abatimento do tronco de cone para concreto de 20% de cinza ultrafina da casca antes (a) e após (b) correção da dosagem do aditivo superplastificante.....	38
Figura 11: Medição ensaio de abatimento.....	39
Figura 12: Gráfico de resistência a compressão.....	40
Figura 13: Gráfico resistência a tração para idade de 28 dias.....	42

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1: Principais compostos do cimento Portland.....	13
Quadro 2: Classificação dos cimentos Portland, segundo a ABNT.....	14
Quadro 3: Composição química determinada por fluorescência de raios X de cinzas do bagaço da cana de açúcar.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Corpos de Prova.....	28
Tabela 2: Traço realizado para concreto em massa.....	28
Tabela 3: Distribuição granulométrica agregado miúdo.....	33
Tabela 4: Massa específica agregado miúdo.....	34
Tabela 5: Distribuição granulométrica agregado graúdo.....	35
Tabela 6: Massa específica agregado graúdo.....	36
Tabela 7: Massa unitária agregado graúdo.....	37
Tabela 8: Nível consistência do concreto.....	37
Tabela 9: Resistência à compressão (Mpa) dos corpos de prova aos 7, 14 e 28 dias.....	39
Tabela 10: Resistência à tração para idade de 28 dias (Mpa).....	41

LISTAS DE ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CBC – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

FIHP – *Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

LAPEQ – Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e Biocombustíveis

UFT – Universidade Federal do Tocantins

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.2 Justificativa.....	9
1.3 Objetivos.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Concreto.....	11
2.1.1 Agregados.....	11
2.1.2 Cimento Portland.....	12
2.1.3 Reação Pozolânica.....	17
2.1.4 A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC).....	18
2.1.5 Sílica ativa.....	21
2.1.6 Concreto no estado fresco.....	22
2.1.7 Concreto no estado endurecido.....	23
3 METODOLOGIA.....	24
3.1 Materiais.....	24
3.1.1 Cimento.....	24
3.1.2 Agregado miúdo.....	24
3.1.3 Agregado Graúdo.....	25
3.1.4 Água.....	25
3.1.5 Cinza do Bagaço da cana de açúcar.....	25
3.2 Espectroscopia de Infravermelho.....	26
3.3 Concreto com combinação de CBC e sílica ativa.....	26
3.3.1 Dosagem do Concreto.....	27
3.4 Ensaio do concreto fresco.....	30
3.4.1 Ensaio de consistência do concreto.....	30
3.5 Ensaio do concreto endurecido.....	30
3.5.1 Ensaio de resistência a compressão.....	30
3.5.2 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 Espectroscopia de Infravermelho.....	31
4.2 Agregado Miúdo.....	33
4.2.1 Granulometria.....	33
4.2.2 Massa específica.....	34
4.3 Agregado Graúdo.....	35
4.3.1 Granulometria.....	35

4.3.2 Massa específica.....	36
4.3.3 Massa unitária.....	37
4.4 Caracterização do Concreto no Estado Fresco.....	37
4.4.1 Ensaio de consistência do concreto – <i>Slump Test</i>	37
4.5 Caracterização do Concreto no Estado Endurecido.....	39
4.5.1 Determinação da resistência por compressão axial.....	39
4.5.2 Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	41
5 CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

O cimento, essencial à composição do concreto, é o material mais consumido nas obras de desenvolvimento de Infraestrutura. Contudo, a coexistência do desenvolvimento tecnológico e da preservação do meio ambiente associados a esse insumo tem se tornado uma preocupação crescente. Malhotra (2002) estima que cerca de 7% de todo CO₂ lançado na atmosfera advém da produção de cimento Portland, o que representa aproximadamente 1,4 bilhões de toneladas por ano. A *Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado* – FIHP (2015), estima que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, que produz um consumo médio de aproximadamente 1,9 toneladas de concreto por habitante ao ano.

Visando reduzir uma quantidade significativa de consumo do cimento, estudos têm sido desenvolvidos com intuito de reduzir a produção de clínquer pela indústria cimentícia, ou mesmo a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos no concreto. Segundo Cordeiro (2006), esses materiais são, em sua maioria, resíduos de processos industriais ou agroindustriais dentre os quais se sobressaem a cinza volante, escória de alto-forno e a sílica ativa.

A utilização de resíduos gerados em outros setores da economia pela construção civil é vantajosa, não apenas devido ao incremento da atividade industrial, mas sobretudo, em virtude da redução do uso de matérias-primas não renováveis, tão essencial às atividades da construção civil convencional (SAVASTANO, 2003). De acordo com Neville (2015) esses resíduos oferecem alto teor de sílica e outros óxidos, podendo então ser utilizada como pozolana, material que possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, quando finamente moído na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos cimentícios. Dentre eles, destaca-se a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, que possui alta concentração de dióxido de sílica.

A sílica ativa, considerada uma adição mineral é um subproduto proveniente da indústria ferrosilício e silício metálico, em que o quartzo é reduzido pelo carbono em elevadas temperaturas. (CARMO; PORTELLA, 2008). De acordo Souza (1998) a sílica ativa influencia no concreto devido as suas características pozolânica e efeito microfíler apresentando vantagens como maior resistência a compressão e tração, menor permeabilidade, porosidade e também resistência a ataques químicos como de sulfatos e cloretos.

O uso de material pozolânico a partir de sobras da agricultura traz um grande benefício ecológico ao âmbito social, pois assim, confere uma destinação a este material e a consequente diminuição do uso de cimento. Além disso, gera benefícios tecnológicos, por melhorar a durabilidade do concreto, e econômico, pela redução do consumo de cimento.

Ante o exposto, este trabalho de pesquisa busca avaliar o potencial de utilização de uma mistura, composta de 80% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e 20% de sílica ativa, como substituição parcial do cimento Portland no concreto, nos percentuais de 5%, 10% e 15%.

1.2 Justificativa

A importância do conceito de desenvolvimento sustentável na construção civil tornou-se uma prática essencial, seja para diminuir os impactos ambientais ou atenuar custos (ÂNGULO et al, 20).

Diante do panorama mundial de crescimento da indústria sucroalcooleira, aliado ao desenvolvimento sustentável, é de grande importância a realização de estudos que visem o aproveitamento destes resíduos. Conforme dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (2017), a safra nacional de cana-de-açúcar deve chegar a 635,59 milhões de toneladas. Estima-se que são produzidos 6 kg de cinza para cada 250 kg de bagaço da cana, o equivalente a 0,7% da massa de cana-de-açúcar moída (FIESP, 2011). Cerca de 95% de todo o bagaço produzido no Brasil é queimado em caldeiras para geração de vapor, originando como detrito a cinza de bagaço, cuja disposição não obedece, na maior parte dos casos, práticas favoráveis de descarte, podendo ocasionar graves problemas ambientais. Constituída, em sua maioria, de sílica (SiO_2), a cinza do bagaço de cana-de-açúcar – CBC tem potencial para ser utilizada como adição mineral, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos. (CORDEIRO et al., 2009).

Vasconcelos (2010) defende que este descarte deve ser feito de modo que não agrida o meio ambiente e o âmbito social, logo a possibilidade de incorporação desse material pela indústria de concreto, evita a poluição e diminui áreas utilizadas como aterro. Santos (2013) também afirma que uma parcela da cinza gerada é encaminhada para o solo dos canaviais como forma de adubo, essa prática pode não ser adequada, pois existe na cinza a presença de alguns metais pesados, o que torna lenta sua deterioração.

A emissão de CO_2 advinda do concreto depende principalmente do teor de cimento, o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2009) afirma que o cimento é o maior

contribuinte para emissões quando comparado aos outros materiais, e mais da metade de sua produção ocorre durante a transformação físico-química do calcário no clínquer, reação denominada descarbonatação. Logo ter a cinza como opção para a substituição desse composto fornece ao concreto não só benefícios ambientais, como também econômico e técnicos, advindos de sua capacidade pozzolânica.

1.3 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é avaliar o potencial da CBC com adição de sílica ativa e sua influência no concreto como substituição parcial do cimento Portland. E como objetivos específicos têm-se:

- Caracterizar os aspectos químicos da cinza proveniente do bagaço da cana de açúcar e da sílica ativa: espectroscopia de infravermelho;
- Avaliar os percentuais de 5% (T05), 10% (T10) e 15% (T15) da CBC com adição física de sílica ativa para substituição parcial do cimento Portland no concreto nas propriedades do estado fresco: consistência do concreto;
- Avaliar os percentuais de 5% (T05), 10% (T10) e 15% (T15) da CBC com adição de sílica para substituição parcial do cimento Portland no concreto nas propriedades do estado endurecido: resistência à compressão e a tração por compressão diametral.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto

De acordo com Petrucci (1998) o concreto é um material constituído por mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes e água, que quando recém misturado, oferece condições de plasticidade que permitam as operações de manuseio e com o tempo, através das reações entre aglomerante e água, obtenham coesão e resistência.

A água e o cimento desenvolvem após a sua mistura um processo denominado hidratação e formam uma pasta que adere as partículas dos agregados. Nas primeiras horas após o preparo é possível dar a essa mistura o formato desejado, e com o passar dos dias, alcança grande resistência mecânica, convertendo-se num material monolítico dotado das mesmas características de uma rocha (ARAÚJO et al (2000), pag. 49).

Os componentes do concreto são descritos por Petrucci (1998) e Isaias (2007) como sendo água adicionada ao cimento, mistura denominada pasta, inserindo nesta pasta o agregado miúdo, obtém-se argamassa, e posteriormente adicionando o agregado graúdo se chega ao concreto, desta forma se tem os principais componentes do concreto que serão descritos nos tópicos seguintes.

2.1.1 Agregados

Os agregados existentes com forma particular na natureza são chamados naturais, enquanto aqueles que são fabricados por beneficiamento ou britagem são chamados artificiais (ALMEIDA e LUZ, 2009). A separação principal é a definida entre os agregados miúdos, designados areia, com dimensão inferior a 4 mm, e os agregados graúdos, que abrangem material com dimensão mínima de 5 mm (NEVILLE, 2016).

Conforme Mehta e Monteiro (2008) as características dos agregados são essenciais para a tecnologia do concreto, pois a porosidade, granulometria, absorção de água, forma e textura superficial das partículas infere diretamente na resistência à compressão.

2.1.1.1 Agregado miúdo

A ABNT NBR 7211 (2009) define agregado miúdo como o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura

de malha de 150 μm , em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

2.1.1.2 Agregado graúdo

A ABNT NBR 7211 (2009) define agregado graúdo como o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

2.1.2 Cimento Portland

O cimento *Portland*, patenteado em 1822, é tido como o principal aglomerante hidráulico utilizado até os dias de hoje. Segundo Costa et al (2013), a sua propriedade aglomerante é ativada com a adição de água, aglutinando materiais granulares como areia e pedra, e confere resistência e durabilidade. É utilizado em argamassas para assentar produtos cerâmicos e dar acabamento em superfícies e é, simplesmente, o principal aglomerante do material de construção mais consumido no mundo: o concreto. Em uma produção mundial de concreto de mais de 20 bilhões de toneladas por ano, alguns autores estimaram o respectivo consumo de cimento em cerca de 3,4 bilhões de toneladas por ano.

Esse aglomerante é constituído principalmente de material calcário, de alumina e sílica encontradas em argilas ou folhelhos. A marga, uma mistura de materiais argilosos e calcários, também é utilizada. Neville (2016) afirma que as matérias-primas para a sua produção são encontradas em praticamente todos os países, com fábricas em todo o mundo. O processo de fabricação do cimento consiste essencialmente na moagem da matéria-prima, na sua mistura em determinadas proporções e na queima (a temperaturas de até cerca de 1.450 °C) em grandes fornos rotativos, o material é sintetizado e parcialmente fundido, tomando a forma de esferas conhecidas como clínqueres. O clínquer é resfriado e recebe a adição de um pequeno teor de sulfato de cálcio, depois é moído até se tornar um pó bastante fino. O resultado é o cimento *Portland*, tão utilizado em todo o mundo.

2.1.2.1 Composição química do cimento Portland

Na produção do cimento, as matérias-primas utilizadas consistem, em: calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Esses compostos interagem entre si no interior do forno, formando

uma série de produtos mais complexos até obter um estado de equilíbrio químico (NEVILLE, 2015). Os compostos principais do cimento estão relacionados no Quadro 1 abaixo:

Quadro 1: Principais compostos do cimento Portland.

Nome do Composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaOSiO_2	C_3S
Silicato dicálcico	2CaOSiO_2	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{FeO}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{FeO}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Neville (2015).

Os silicatos no cimento não são compostos puros, pois contêm óxidos secundários em solução sólida que exercem efeitos significativos no arranjo atômico, na forma dos cristais e em propriedades hidráulicas dos silicatos. Os compostos secundários, são: MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O , e Na_2O , que constituem um pequeno percentual da massa de cimento. Os óxidos de sódio e de potássio (Na_2O e K_2O), merecem ênfase, conhecidos como os álcalis, Neville (2015) afirma que os álcalis podem reagir com alguns agregados produzindo uma reação que causa a desintegração do concreto. Além disso, eles afetam a velocidade de ganho de resistência do cimento, a denominação "compostos secundários" é devido a quantidade, e não a importância destes.

2.1.2.2 Hidratação do cimento Portland

As reações pelas quais o cimento *Portland* se torna um material aglomerante acontecem na pasta, constituída por água e cimento. Em outras palavras, a presença de água e dos silicatos e dos aluminatos formam produtos hidratados que, com o tempo, resultam em uma massa firme e resistente, ou seja, a pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2015). Essa ação ocorre, com relação ao tempo, sob mecanismos distintos.

Em estágios iniciais, a reação de hidratação é obtida por dissolução-precipitação, iniciada com a dissolução do grão anidro em um meio aquoso, e assim levando à precipitação de compostos hidratados (SILVA, 2007). Mehta e Monteiro (1994) afirmam que a mobilidade iônica, em estágios posteriores, se torna restrita, pois a hidratação pode ocorrer por reações no estado sólido, as topoquímicas.

Existem duas maneiras pelas quais os compostos existentes no cimento podem reagir com a água. Na primeira, acontece a adição direta de algumas moléculas de água, sendo esta a verdadeira reação de hidratação e o segundo tipo de reação com água é a hidrólise (NEVILLE,

2015). De acordo com ODLER (1998), o silicato tricálcico (C₃S) apresenta rápida hidratação e desprende uma quantidade média de calor quando comparado com as outras fases. A hidratação do C₃S gera um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂ (CH). O C₃S é responsável pela resistência inicial da pasta endurecida e também pelo aumento de sua resistência final. Já o silicato dicálcico (C₂S), que desprende uma quantidade pequena de calor durante sua lenta hidratação, é responsável pelo aumento de resistência nas idades avançadas e produz C-S-H e hidróxido de cálcio em menor volume, em comparação com o C₃S.

2.1.2.3 Tipos de cimento Portland

Para os fins práticos de seleção de um cimento *Portland* comum ou composto adequado, é interessante considerar a classificação baseada em propriedades físicas ou químicas relevantes, como a velocidade de ganho de resistência, a velocidade de liberação de calor de hidratação ou a resistência a sulfatos (NEVILLE, 2015).

A Associação Brasileira Normas Técnicas – ABNT classifica o cimento Portland de acordo com seus componentes e propriedades. Os cimentos comercializados no Brasil de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP estão dispostos no Quadro 2, a seguir:

Quadro 2: Classificação dos cimentos Portland, segundo a ABNT.

Nome Técnico	Sigla
Cimento Portland comum	CP I-S
Cimento Portland comum com adição	CP II-E
Cimento Portland composto com escória	CP II-Z
Cimento Portland composto com filler	CP II-F
Cimento Portland de alto-forno	CP III
Cimento Portland pozolânico	CP IV
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V
Cimento Portland resistente a sulfatos	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS
Cimento Portland de baixo calor de hidratação	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC
Cimento Portland branco estrutural	CPB
Cimento Portland branco	CPB*
Cimento para poços petrolíferos	CPP

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018).

2.1.2.4 Cimento CP II-F 32

O cimento *Portland* composto tem diversos tipos e possibilidades de aplicação, sendo um deles o CP II-F 32. A produção do cimento *Portland* composto com filer ocorre com a adição de materiais carbonáticos a sua composição durante a moagem, em teores especificados pela NBR 11578 (ABNT, 1997). Na classificação dos cimentos compostos pode ser incluído filer em um teor máximo de 6 a 10%, não sendo essa a opção mais indicada para meios muito agressivos.

O filer é um material finamente moído, que devido as suas propriedades físicas tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como a trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, exsudação ou tendência de fissuração. Esse material geralmente é inerte, contendo basicamente carbonato de cálcio em sua composição. Na sua ação, pode ativar a hidratação do cimento *Portland* atuando como pontos de nucleação, fixando melhor a água no clínquer (GALVÃO, 2003).

2.1.2.5 Aditivos para materiais a base de cimento

O uso crescente dos aditivos está nas vantagens físicas e econômicas ao concreto, entre outros benefícios, está a utilização do concreto em situações em que antes existiam dificuldades consideráveis ou mesmo insuperáveis. Além disso, possibilitam o uso de uma maior variedade de componentes na mistura. Mesmo que não sejam baratos, não representam necessariamente uma despesa adicional, pois seu uso pode resultar em economia na mão de obra para o adensamento, no consumo de cimento e na melhoria da trabalhabilidade sem o emprego de medidas adicionais (NEVILLE, 2015).

2.1.2.5.1 Adições Minerais

Conforme a NBR 11172 (ABNT, 1992), as adições são produtos de origem mineral acrescentadas aos cimentos, argamassas e concretos com a intuito de alterar suas características. A adição mineral, conforme Silva (2007), interage química e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento *Portland*, essa reação modifica a microestrutura da pasta e as propriedades físicas e químicas do produto final. As principais adições minerais usadas em argamassas e concretos são: sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno e cinza volante.

A sílica ativa é descrita por Carmo et al (2007) como um subproduto industrial do processo de produção das ligas de ferro-silício ou silício metálico em grandes fornos elétricos de fusão, do tipo arco voltaico. De acordo com DE LARRARD (1992) seus efeitos benéficos nas propriedades do concreto são devidos ao efeito pozolânico e os efeito físico das partículas de sílica, denominado efeito filer. Carmo et al (2007) também afirmam que a calcinação de argilas cauliníticas ou com um caulim de alta pureza, é possível obter o metacaulim, uma adição mineral alumino-silicosa.

A escória é um resíduo da produção de ferro gusa, sendo produzidos cerca de 300 kg de escória por tonelada de ferro gusa. É uma mistura de óxido de cálcio, sílica e alumina, os mesmos óxidos que compõem o cimento Portland, mas não nas mesmas proporções. A escória de alto-forno apresenta grande variação em sua composição e em sua estrutura física, dependendo do processo utilizado e do método de resfriamento (NEVILLE, 2015). O mesmo autor também descreve a cinza volante, conhecida como cinza volante pulverizada, é a cinza precipitada elétrica ou mecanicamente a partir dos gases de combustão de usinas termoelétricas a carvão mineral. As partículas de cinza volante são esféricas e têm finura muito elevada. A maioria das partículas tem diâmetro variando entre menos do que 1 e 100 μm , e a superfície específica medida pelo método Blaine normalmente varia entre 250 e 600 m^2/kg . Este valor elevado implica pronta disponibilidade para a reação com o hidróxido de cálcio.

As adições minerais podem trazer melhorias a qualidade do concreto e têm custos e preços menores quando comparadas ao cimento Portland ou ao clínquer Portland (SILVA, 2007). Há também as justificativas relacionadas à sustentabilidade da construção civil. Conforme Dal Molin (2005), a incorporação de adições minerais como escórias e pozolanas podem reduzir o consumo de energia além de diminuir substancialmente a produção de gás carbônico para a produção de cimentos. Dal Molin (2005) e Silva, M. (2007) dividem as adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, em três grupos: material cimentante, material pozolânico e material não reativo.

- Material cimentante: Não necessita de hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o C-S-H. No entanto, sua auto hidratação normalmente é lenta, e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Para acelerar a hidratação, faz-se o uso com adição ou substituição de cimento Portland. Um exemplo disto é a escória granulada de alto-forno.
- Material pozolânico: Pozolana é um material silicioso ou sílico-aluminoso, que por si só, possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas quando finamente dividido e em

presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos que possuem propriedades cimentícias, segundo Comitê 116 do ACI (2000). Existem as pozolanas naturais, de origem vulcânica e as artificiais, como a cinza volante, a argila calcinada, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, entre outros.

- Material não reativo: É o caso do filler que, quando finamente dividido (com diâmetro próximo ao do cimento), não possui atividade química. Cordeiro (2006) afirma que sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico, uma vez que possibilita o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento disperso, promovendo aumento na compacidade da mistura e, conseqüentemente, refinamento dos poros (CORDEIRO, 2006).

De acordo com Rodrigues (2004), as adições minerais podem ser empregadas em cimentos de duas formas: moídos juntamente com o clínquer ou adicionados ao cimento Portland durante o amassamento. A pesquisa de Dal Molin (1995) apontou que a inclusão de aditivos minerais em argamassas e concretos interfere na movimentação das partículas de água, em relação aos sólidos da mistura e conseqüentemente reduz ou elimina o acúmulo de água livre que normalmente fica retida sob o agregado. Além disso, as partículas do aditivo preenchem os vazios deixados pelo cimento próximos à superfície do agregado e interferem no crescimento e no grau de orientação dos cristais de hidróxido de cálcio junto ao agregado. A ação desses fatores, em conjunto com a redução da concentração de Ca(OH)_2 , proporciona melhora significativa na zona de transição pasta-agregado. Isto se reflete em aumento de desempenho, tanto sob o ponto de vista de resistência mecânica como de durabilidade.

2.1.3 Reação Pozolânica

Segundo a NBR 12653 - ABNT (2012), materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes.

A pozolana, um material natural ou artificial que contém sílica em forma reativa. Uma definição mais formal descreve a pozolana como um material silicoso que possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, quando finamente moído e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes, formando compostos cimentícios. É essencial que a pozolana esteja finamente moída, pois somente assim a sílica

pode se combinar com o hidróxido de cálcio (produzido pelo cimento Portland em hidratação) na presença de água para formar silicatos de cálcio estáveis com propriedades cimentícias. Neville (2015) destaca que a sílica precisa ser amorfa, ou seja, vítrea, já que a sílica cristalina tem baixíssima reatividade. Amplamente falando, os materiais pozzolânicos podem ser de origem natural ou artificial. O principal material pozzolânico artificial é a cinza volante e as pozzolanas naturais mais encontradas são a cinza vulcânica.

As reações de hidratação do silicato tricálcico, C_3S , e silicato dicálcico, C_2S , dão origem ao silicato de cálcio hidratado, C-S-H, e hidróxido de cálcio, CH. O C-S-H não tem composição fixa e é responsável pela resistência do cimento, enquanto o CH é solúvel e influencia na durabilidade da pasta, principalmente quando sujeita a meios ácidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A reação pozzolânica tem início entre 7 e 15 dias após a mistura, Massazza (1998) afirma que quando a hidratação do cimento se apresenta já em estado avançado. Assim, as reações do clínquer e da pozzolana podem ser investigadas separadamente, sendo consideradas as influências mútuas dos dois processos.

A hidratação do cimento com incorporação de adição mineral envolve unicamente o clínquer, logo após o primeiro dia, o crescimento dos produtos de hidratação é possível através do comportamento das partículas, como regiões de nucleação. Massazza (1998) também explica que em estágios mais avançados, a superfície externa destas partículas parece alterada, onde há o consumo das mesmas. As partículas são recobertas por uma fina camada de composição diferente daquela das partículas. Esta camada passa a ser substituída por agulhas de C-S-H que crescem perpendicularmente à superfície. Os produtos de hidratação de um sistema cal / adição mineral são similares aos resultantes da hidratação do cimento Portland, ocorrendo mais variação na quantidade do que na natureza das fases.

2.1.4 A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC)

O Brasil é responsável pela produção de cerca de 53% do álcool etílico consumido no planeta e é o maior produtor mundial de açúcar, com 61% das exportações de açúcar de cana no mundo (MAPA, 2009).

Folhas e pontas, água de lavagem, bagaço, torta de filtro, leveduras e vinhaça, são os principais subprodutos da indústria sucroalcooleira. Cordeiro (2016) explica que a água usada na lavagem da cana antes da moagem pode ser reaproveitada na produção de biogás e na irrigação de lavouras. O bagaço é empregado na produção de energia (vapor/eletricidade),

combustível (natural, briquetado, peletizado, enfardado), hidrólise (rações, furfural, lignina), polpa de papel, celulose e aglomerados. As folhas e pontas, além das mesmas aplicações do bagaço, podem ser utilizadas como forragem. A vinhaça é utilizada como fertilizante na adubação dos canaviais. Por fim, a torta de filtro, subproduto do processo de clarificação do caldo na fabricação do açúcar, e a levedura, obtida após a fermentação do caldo, são também empregadas na adubação. Das utilizações dos subprodutos, merece destaque a geração de energia elétrica através da queima do bagaço.

Cerca de 95% de todo o bagaço de cana-de-açúcar produzido no Brasil é queimado em caldeiras para a produção de energia. Nas usinas, a produção de energia faz parte do processo de autossuficiência elétrica. Para cada tonelada de bagaço que alimenta o processo de cogeração, aproximadamente 24 kg (2,4%) de cinza residual são geradas (FIESP/CIESP, 2001). Logo, considerando a produção de cana-de-açúcar do ano de 2004 e que 93% do bagaço foi aproveitado como combustível nas caldeiras, estimou-se então pela pesquisa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2005) foram produzidas cerca de 2,5 milhões de toneladas de cinza.

A pesquisa de Coelho (1999) aponta que esse material tem sido historicamente empregado como combustível nas usinas e destilarias do Brasil desde o início do século XX, quando passou a substituir a lenha nas caldeiras e segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2005), o bagaço de cana é, atualmente, o recurso de maior potencial de energia elétrica no país.

O resultado da calcinação do bagaço nas caldeiras é uma cinza pesada e um cinza volante, que embora não sejam diretamente liberadas no ar como as da colheita, podem poluir o ambiente quando descartadas de forma imprópria após a limpeza das caldeiras da usina (BORLINI et al, 2006). Em busca de alternativas para um fim adequado a esse material foram realizadas pesquisas avaliando a viabilidade do emprego desta cinza como adição aos concretos e argamassas de cimento.

A indústria cimenteira mundial é responsável pela emissão de cerca de uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) por tonelada de clínquer produzido, além de outros gases intensificadores do efeito estufa, como CO, CH₄, NO_x, NO₂ e SO₂, em proporções menores (MEHTA, 2002). Estima-se que cerca de 7% de todo CO₂ antrópico emitido no mundo é devido à produção de cimento *Portland*, o que representa aproximadamente 1,4 bilhões de toneladas por ano, segundo levantamento de Malhorta (2002). Concomitante a isso, Faibairn (2010) coloca a utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como pozolana para

substituição parcial do clínquer na produção de cimento ajuda na redução de emissões de CO₂ na atmosfera e possui grande potencial para emissão de Certificados de Créditos de Carbono.

Em termos de óxidos, a cinza do bagaço apresenta uma grande quantidade de dióxido de silício, acima de 60% (em massa). O silício é absorvido do solo pelas raízes na forma de ácido monossilícico (H₄SiO₄) e, deposita-se na parede externa das células da epiderme como sílica gel, após a transpiração. O acúmulo de silício entre a cutícula e a parede das células da epiderme é uma barreira física à penetração de fungos patogênicos e reduz as perdas de água por transpiração (BARBOZA FILHO e PRABHU, 2002).

No Quadro 3 consta a caracterização química da cinza do bagaço da cana de açúcar determinada por fluorescência de raio X:

Quadro 3: Composição química determinada por fluorescência de raios X de cinzas do bagaço da cana de açúcar.

Composto	Quantidade (% , em massa)		
	Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar		
	(MARTIRENA HERNÁNDEZ et al., 1998)	(MASSAZZA, 1998)	(SINGH et al., 2000)
SiO ₂	72,7	75	63,2
Al ₂ O ₃	5,3	6,7	9,7
FeO ₃	3,9	6,3	5,4
TiO ₂	0,3	-	-
CaO	8	2,8	3,1
MgO	2,9	1,1	2,9
SO ₃	0,1	-	2,9
K ₂ O	3,5	2,4	-
Na ₂ O	0,8	1,1	-
P ₂ O ₅	1,6	4	-
Perda ao fogo	0,8	0,9	6,9

Fonte: MARTIRENA HERNÁNDEZ et al. (1998), MASSAZZA (1998) e SINGH et al. (2000).

A CBC é um subproduto que não possui uma destinação correta, porém a sua adição ao concreto, substituindo parte do cimento empregado, pode manter as características principais do concreto e representar ganhos ambientais com a redução da emissão de CO₂. Esta cinza residual não precisa de um tratamento complexo para que possa substituir parcialmente o cimento, assim como mostra a pesquisa realizada por Alves e Goulart (1981) que contou principalmente com um peneiramento para eliminar alguns resíduos que não sofreram uma combustão completa e também o refinamento dos grãos realizado que pode ser realizado por

um moinho rotativo de esferas, com a finalidade de aumentar sua superfície específica e consequentemente a atividade pozolânica da adição mineral.

A cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar pode ser empregada como aditivo mineral pois apresenta composição química adequada, devido aos teores de dióxido de silício e perda ao fogo. Entretanto, a distribuição granulométrica variável, por ser um sistema de obtenção sem qualquer classificação, aponta para a necessidade de moagem para elevar a reatividade, pelo aumento da superfície específica das partículas, e conferir maior homogeneidade ao material (CORDEIRO, 2006).

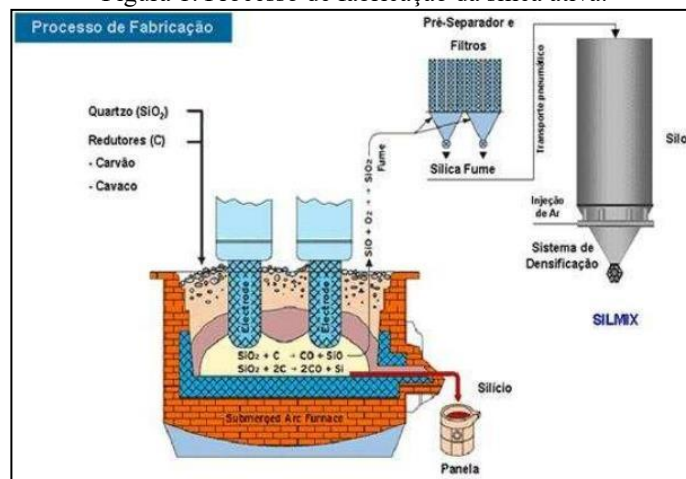
2.1.5 Sílica ativa

De acordo com Neville (2016) a sílica ativa é:

Um resíduo da produção de silício ou de ligas de ferrossilício, obtido a partir de quartzo de alto grau de pureza e de carvão em forno elétrico a arco submerso. O SiO_2 gasoso que se libera sofre oxidação e se condensa na forma de partículas esféricas extremamente finas de sílica amorfa (SiO_i), daí o nome fumo de sílica (NEVILLE, 2016, p. 89).

Sua massa específica é, geralmente, igual a $2,20 \text{ g/cm}^3$, podendo ser um pouco maior para menores teores de sílica. Possui partículas extremamente finas, tendo diâmetro médio menor que $0,1 \mu\text{m}$ e massa unitária entre 200 e 300 kg/m^3 (Neville, 2016).

Figura 1: Processo de fabricação da sílica ativa.



Fonte: Tecnosil, (2014) – Moraes (2010)

A contribuição da sílica no aumento da resistência mecânica ocorre de duas maneiras: por ação química e por ação física (Dal Molin, 1995).

A ação física ocorre devido ao efeito físico (efeito microfíler), causado pelo reduzido tamanho das partículas, que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água, gerando assim, melhor empacotamento dos materiais sólidos do concreto. As suas partículas atuam como pontos de nucleação dos produtos de hidratação, o que proporciona um refinamento da estrutura de poros (Vieira, Kulakowski, Dal Molin, Vilela, 2001). Esse processo resulta em uma microestrutura mais densa, pois as reações dos produtos de hidratação são bem rápidas, e com a sílica ativa os espaços para o crescimento dos produtos de hidratação diminuem, ocorrendo a produção de um número maior de pequenos cristais, ao invés de um menor número de grandes cristais (Dal Molin, 1995).

Por meio da atuação química a sílica ativa reage rapidamente com o hidróxido de cálcio (C-H) formado na hidratação do cimento, gerando uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), composto bastante semelhante aquele produzido na reação do cimento, que é o responsável pela resistência da pasta (Vieira, Kulakowski, Dal Molin, Vilela, 2001). Devido a essa reatividade, é possível utilizar a sílica ativa em substituição a uma pequena parcela do cimento Portland. Isso é feito na proporção de 1 parte de sílica ativa para 4 ou 5 de cimento Portland, em massa, com teores máximos entre 3 e 5%. Ao adotar esse procedimento para concretos de baixa ou média resistência, não ocorre alteração da resistência, e, como nesses concretos as relações água/cimento são de valores médios ou altos, não é necessário o uso de aditivos superplastificantes (Neville, 2016).

Comparados aos concretos comuns, os concretos com SA apresentam as seguintes vantagens:

Maiores resistências à compressão e tração; menor permeabilidade, porosidade e absorvidade; maiores resistências a abrasão e a erosão; maior resistência a ataques químicos, como de sulfatos e de cloretos; maior aderência concreto novo - concreto velho; menor índice de reflexão no concreto projetado. (SOUZA, 1998. p.99,100).

2.1.6 Concreto no estado fresco

Para Araújo et al (2000) o concreto é considerado fresco até o momento em que se inicia a pega do aglomerante, momento em que a mistura se encontra em seu estado mais trabalhável.

De acordo com Neville (2016) a resistência do concreto é bastante influenciada por seu grau de adensamento. Assim, é fundamental que a consistência da mistura seja tal que o concreto esteja o mais homogêneo possível e possa ser transportado, lançado, adensado e

acabado facilmente e sem segregação. Essas propriedades são determinam a trabalhabilidade do concreto.

Mehta e Monteiro (2014) definem a consistência como sendo a facilidade do concreto de escoar, e a coesão como a resistência à segregação e à exsudação. Essa consistência pode ser avaliada através do ensaio de abatimento, método normatizado pela NBR NM 67 (1998).

2.1.7 Concreto no estado endurecido

Posterior ao processo de pega, o concreto é considerado um sólido que evolui suas características mecânicas de forma lenta e gradativa. (BAUER, 2000).

Um dos fatores mais relevantes do concreto endurecido é a sua resistência mecânica. Na prática, considera-se que a resistência do concreto em uma determinada idade, e submetido à cura úmida a uma temperatura previamente determinada, depende sobretudo de dois fatores: a relação água/cimento e seu grau de adensamento (Neville, 2016)

Conforme Mehta e Monteiro (2014) a resistência de um material pode ser definida como sua capacidade de resistir a um determinado esforço de tensão sem se romper. Quando se fala em concreto, a resistência à compressão axial é a propriedade que mais interessa quem trabalha com execução de obras e também projetistas. Isso ocorre devido ao fato de esta propriedade estar diretamente associada qualidade do concreto como um todo, logo se relaciona a qualidade do concreto e as demais resistências e propriedades à sua resistência à compressão (ISAIAS, 2007; MEHTA E MONTEIRO, 2014)

A resistência à tração de acordo com Mehta e Monteiro (1994) detém de 10 a 15% da resistência a compressão. Neville (2016) relata que o concreto não é projetado para resistir à tração e que o conhecimento sobre resistência a tração é aproveitável para estimar em qual carga aproximadamente ocorrem as fissuras no concreto.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem o propósito de identificar os efeitos da aplicação da mistura que detém 80% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e 20% de sílica ativa no concreto como substituição do cimento *Portland*. Para que a pesquisa seja executada, torna-se necessário definir a sua metodologia, como também quais os materiais e métodos utilizados para o andamento da pesquisa.

Em relação à abordagem do problema, pode-se dizer que este trabalho apresenta aspectos de uma pesquisa quantitativa e também de pesquisa qualitativa. A pesquisa quantitativa, segundo Silva (2005), é aquela que possui dados quantificáveis, onde informações podem ser traduzidas em números para serem classificadas e analisadas.

No que tange os aspectos da pesquisa qualitativa, Silva (2005), afirma que esta trata da relação entre o mundo real e o sujeito, ou seja, algo que não possa ser traduzido em números. O ambiente natural é a fonte direta para a coleta de dados e o pesquisador é o instrumento chave.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para o procedimento do trabalho é o CP II F-32 devido à pouca quantidade de adições minerais em sua composição, ser um material inerte e ter uso comum no mercado.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na elaboração do concreto foi a areia procedente das jazidas locais caracterizado como areia média. Os ensaios de caracterização utilizados foram: composição granulométrica pela ABNT NBR NM 248 (2003), massa unitária pela ABNT NBR NM 45 (2006) e massa específica pela ABNT NBR NM 52 (2009).

3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo escolhido foi a brita nº 1, também proveniente de jazidas locais. Os ensaios de caracterização utilizados foram: composição granulométrica pela ABNT NBR NM 248 (2003), massa unitária pela ABNT NBR NM 45 (2006) e massa específica pela ABNT NBR NM 53 (2003).

3.1.4 Água

Foi utilizada água destilada do laboratório de Química da UFT (Universidade Federal do Tocantins).

3.1.5 Cinza do Bagaço da cana de açúcar

A cinza foi coletada na empresa Bunge – Açúcar e Bioenergia, no município de Pedro Afonso – TO. A sequência do processo ocorre do seguinte modo:

A cana-de-açúcar é obtida em áreas da região com equipamentos mecanizados. Posteriormente, os caules da cana são lavados e transportados para a área de moagem. Na moagem ocorre a extração do caldo, que é destinado para a produção de álcool anidro e hidratado e também para a produção de açúcar. Como resultado têm-se o bagaço da cana moído, que é totalmente destinado a produção de energia através da caldeira a vapor.

A caldeira funciona 24h por dia e por ela passam, em média, 3.000 toneladas de bagaço. A temperatura de queima é controlada, variando entre 800°C e 900°C. O que sobra dessa queima é a cinza, que na empresa estudada detém uma produção diária de 75 toneladas.

Essa cinza é lavada e transportada por água corrente para tanques decantadores. Após a decantação, a cinza é levada até um filtro que separa a água da parte sólida, para enfim ser armazenada.

- **Caracterização da CBC**

Depois de coletada, a cinza passou por um processo de melhoramento, primeiramente utilizando uma peneira grossa, de malha 2,4mm para a retirada de impurezas e possíveis

materiais indesejados. Foi usado na pesquisa o material passante na peneira nº 200 (0,075mm), caracterizado como fino, após realizada uma mistura, na qual 80% desta era CBC e 20% sílica ativa. A granulometria da CBC (80%) + sílica ativa (20%) é menor ou igual a do cimento, que corresponde à 75 µm, condição necessária para obter as reações do efeito fíler no concreto, que tem como característica principal a finura dos seus elementos para preenchimento dos vazios da zona de transição. A caracterização química da CBC foi realizada através da espectroscopia por infravermelho, pelo equipamento *Agilent*, no Laboratório de Pesquisa em Química (LAPEQ).

A moagem através do moinho de bolas rotativo tem como finalidade diminuir as partículas do material, processo importante para ativar as reações químicas e aumentar a sua superfície específica do aditivo, contudo devido a problemas técnicos no moinho do laboratório Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFT, não foi possível a realização da moagem das partículas de CBC nesta etapa do processo.

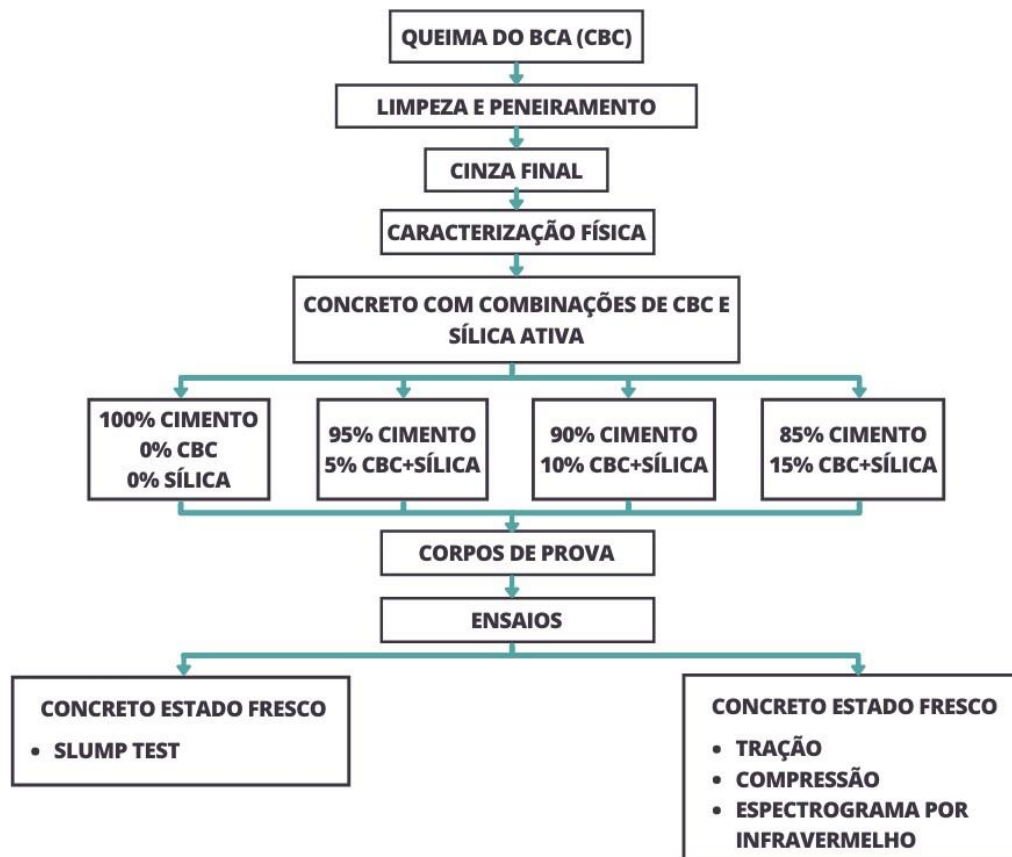
3.2 Espectroscopia de Infravermelho

A técnica se baseia no fato de que ligações e grupamentos químicos vibram em frequências específicas, permitindo ver os grupos funcionais presentes no corpo de prova como hidroxila, alcenos, carbono aromático, entre outros. A espectroscopia foi realizada na LAPEC (Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e Biocombustíveis), localizado na UFT (Universidade Federal do Tocantins).

3.3 Concreto com combinação de CBC e sílica ativa

A metodologia aplicada neste trabalho é dividida em várias etapas. Para melhor representação, a Figura 1 apresenta um diagrama de blocos esquematizando a rota experimental empregada.

Figura 2: Rota experimental desenvolvida neste trabalho.



Fonte: Autor (2019).

3.3.1 Dosagem do Concreto

Após a caracterização dos materiais, foi realizado o cálculo do traço referência, que não possui nenhuma adição ou substituição de aditivos em sua composição, e outros traços com percentuais de 5%, 10% e 15% de substituição do cimento

Portland pela mistura de 80% de CBC e 20% de sílica ativa. Essa dosagem segue o método recomendado pela American Concrete Institute (ACI), que normatiza a dosagem de concreto convencional, com objetivo de alcançar a resistência característica de 25 MPa aos 28 dias, possui f_{cj} de 34,1 Mpa, S_d de 5,5 e abatimento de 100 ± 2 mm. A tabela a seguir descreve a quantidade de corpos de prova produzidos com relação aos traços citados.

Tabela 1: Corpos de Prova.

Traços	Resistência à compressão			Resistência a tração
	Quantidade de corpos de prova por idade			
	7 dias	14 dias	28 dias	28 dias
Referência	3	3	3	3
5% CBC	3	3	3	3
10% CBC	3	3	3	3
15% CBC	3	3	3	3

Fonte: Autoral (2019).

O traço final alcançado foi: 1: 1,71: 2,35 (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo), com fator água cimento (a/c) de 0,46. Na tabela 2 a seguir podemos analisar os quatro traços produzidos:

Tabela 2: Traço realizado para concreto em massa.

Traço	Cimento (kg)	Cinza da cana-de-açúcar + sílica ativa (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Água (kg)
Referência	8,06	0,00	13,78	18,94	3,71
5% CBC+SÍLICA	7,66	0,40	13,78	18,94	3,71
10% CBC+SÍLICA	6,85	0,81	13,78	18,94	3,71
15% CBC+SÍLICA	5,64	1,21	13,78	18,94	3,71

Fonte: Autor (2021)

A tabela 2 apresenta a quantidade de cada material para cada um dos traços elaborados, apenas com porção de cimento reduzida de acordo com a porcentagem de CBC + sílica que é adicionada ao concreto, visto que se trata de uma substituição.

Na figura 3, 4 e 5 podemos visualizar algumas etapas do processo de preparação dos corpos de prova.

Figura 3: Materiais devidamente pesados e armazenados para execução do traço.



Fonte: Autor (2021)

Figura 4: Corpos de prova recém moldados do traço de 10%.



Fonte: Autor (2021)

Figura 5: Corpos de prova do traço referência momentos antes da cura úmida.



Fonte: Autor (2021)

3.4 Ensaios do concreto fresco

3.4.1 Ensaio de consistência do concreto

A avaliação do concreto no estado fresco foi feita por meio do ensaio de abatimento, mais conhecido como *slump test*. De acordo com a NBR NM 67 (1998), esse ensaio consiste em preencher o molde em três camadas igualmente adensadas, golpeando-o 25 vezes com o auxílio de uma haste metálica cada camada para adensamento, retirar o molde e aferir a medida entre a sua altura e o pico do concreto.

3.5 Ensaios do concreto endurecido

3.5.1 Ensaio de resistência a compressão

O ensaio de compressão consiste na aplicação uniaxial de carga compressiva em um corpo de prova regido pela NBR 5739 (2018). Os corpos de prova foram rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias, com um número de 3 amostras para cada idade de rompimento.

3.5.2 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral

Este ensaio segue as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011). O corpo-de-prova é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa. A carga é aplicada ao longo das duas geratrizes diametralmente opostas ao corpo de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Espectroscopia de Infravermelho

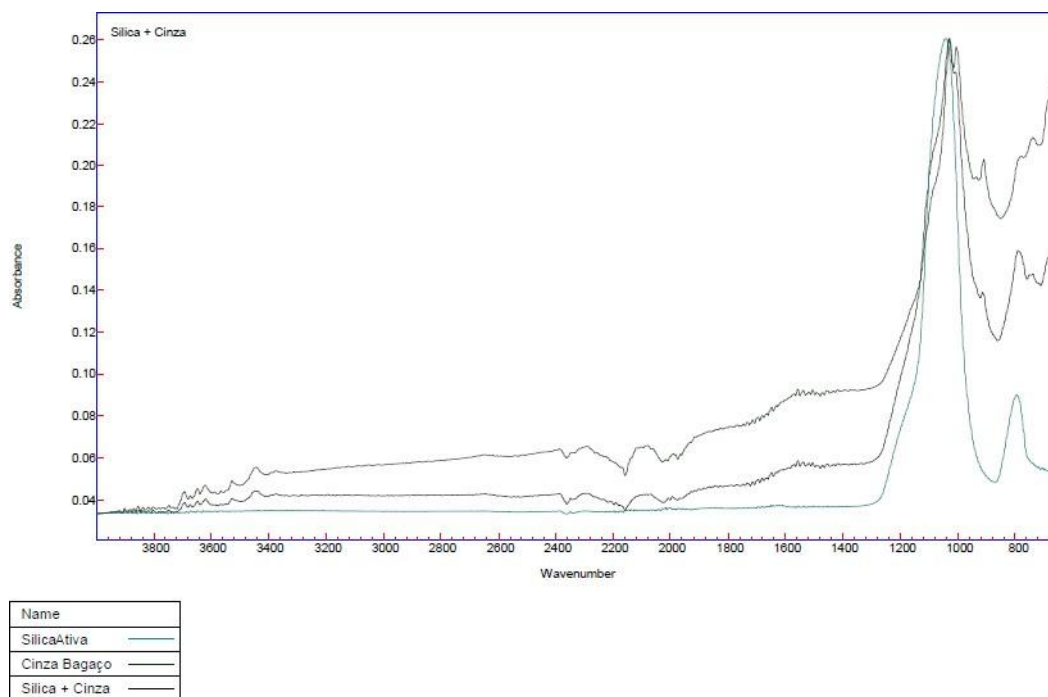
A análise da espectrografia IV da amostra da cinza do bagaço da cana, sílica ativa e ambas associadas está ilustrada logo abaixo no gráfico da figura 6. Três espectros são mostrados nesta figura: o azul é a sílica ativa, verde a cinza do bagaço da cana e preto a CBC com percentual de 80% e adição de sílica ativa em 20%. Analisando o gráfico é possível observar que espectro da sílica apresenta pico característico do estiramento assimétrico da ligação Si-O, próximo a 1.100 cm^{-1} , como também um pico na região de 810 cm^{-1} , tradicionalmente atribuído ao estiramento simétrico Si-O.

Destaca-se a falta de bandas acima de 2.000 cm^{-1} , que demonstra a ausência de ligações Si-H. A escassez de bandas acima de 3.000 cm^{-1} sugere a inexistência de grupos silanol (SiOH) na superfície da sílica ativa.

No espectro da amostra de cinza do bagaço da cana, é possível observar os picos referentes aos modos de vibração da ligação Si-O (isto é, o estiramento simétrico e o assimétrico) bem como a presença de baixa intensidade na região acima de 3.500 cm^{-1} , já descrita na literatura para este tipo de amostra e possivelmente causadas pela vibração da hidroxila ligada ao alumínio (Al-OH). Para as amostras que contém carbono, isto é, a CBC e a mistura CBC e sílica ativa, é possível observar a presença de picos acima de 3.400 cm^{-1} (típico de hidroxilas de álcoois, O-H). Estas amostras também apresentam picos entre 1.000 cm^{-1} e 800 cm^{-1} , região característica de dobramento da ligação carbono-hidrogênio em carbono $\text{sp}^2=\text{C-H}$ que se encontra ausente na amostra de sílica ativa.

O resultado da espectroscopia determinou a presença de material carbonático e não material orgânico, de acordo com Neville (2016) impurezas orgânicas no concreto podem interferir nas reações químicas da hidratação do cimento e facilitar a entrada de agentes agressivos, que podem comprometer a resistência do concreto.

Figura 6: Análise espectro de infravermelho.



Fonte: Autor (2021).

4.2 Agregado Miúdo

Os valores de granulometria, massa específica, massa unitária e também a curva granulométrica estão expostos a seguir.

4.2.1 Granulometria

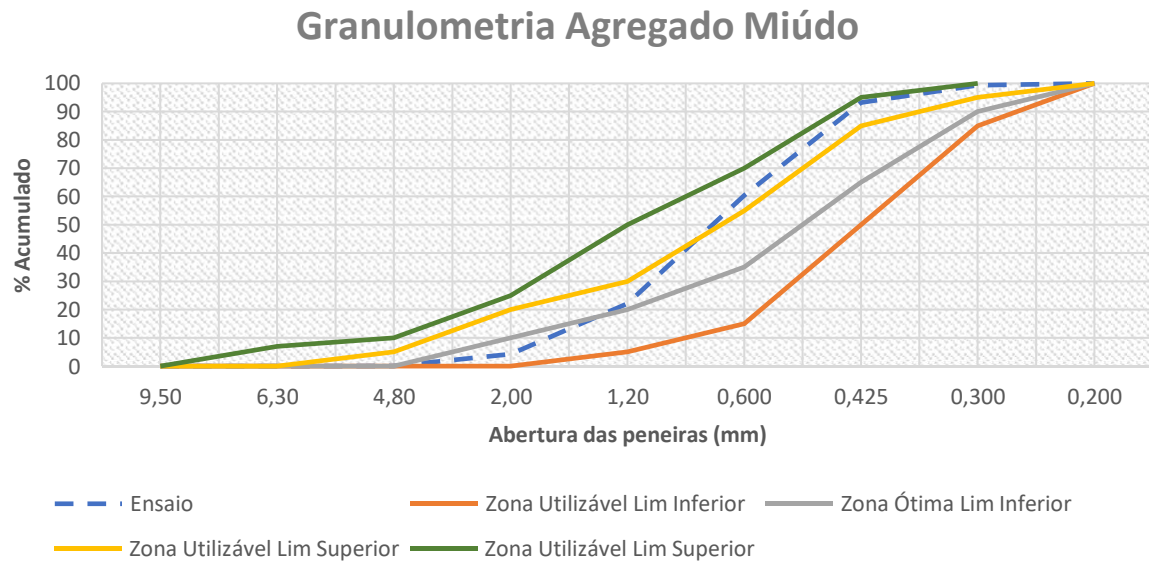
Os resultados obtidos no ensaio de granulometria estão apresentados na tabela 3 e figura 7:

Tabela 3: Distribuição granulométrica agregado miúdo.

Peneiras		Massa retida			% retida			% retida acumulada			Média
Pol.	Mm	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nº4	4,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nº10	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nº16	1,20	0,50	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,03
Nº30*	0,60	19,50	21,50	21,00	3,93	4,35	4,23	4,03	4,35	4,23	4,20
Nº40*	0,43	90,50	88,10	88,90	18,25	17,82	17,89	22,29	22,17	22,12	22,19
Nº50*	0,30	176,70	193,50	198,10	35,64	39,14	39,87	57,93	61,31	61,98	60,41
Nº70*	0,20	175,10	158,90	154,30	35,32	32,14	31,05	93,24	93,45	93,04	93,24
Nº200*	0,08	29,80	28,90	30,90	6,01	5,85	6,22	99,25	99,29	99,26	99,27
FUNDO		3,70	3,50	3,70	0,75	0,71	0,74	100,00	100,00	100,00	100,00
TOTAL		495,80	494,40	496,90	100,00	100,00	100,00	-	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Figura 7: Curva granulométrica agregado miúdo.



Fonte: Autor (2021).

O módulo de finura equivalente ao agregado miúdo é 2,79, sendo caracterizado como areia média.

4.2.2 Massa específica

A obtenção da massa específica do agregado miúdo foi realizada através da NBR NM 52, utilizando duas amostras de 500 g cada, como indica a norma. Os resultados seguem na tabela abaixo.

Tabela 4: Massa específica agregado miúdo.

Descrição	Amostra 1	Amostra 2
Massa agregado	500,00	500,00
Volume frasco	500,00	500,00
Volume água adicionada ao frasco	289,70	295,45
Massa amostra seca em estufa	499,70	500,10
Massa total (frasco+agregado+água)	982,30	994,30
Massa (frasco+agregado)	695,50	701,80
Massa específica água	0,99	0,99
Massa específica aparente do agregado seco	2,38	2,44
Massa específica agregado saturado com superfície seca	2,38	2,44
Massa específica de cada amostra	2,38	2,44
Massa específica	2,41	

Fonte: Autor (2021).

4.3 Agregado Graúdo

Os valores de granulometria, massa específica, massa unitária e também a curva granulométrica estão expostos a seguir.

4.3.1 Granulometria

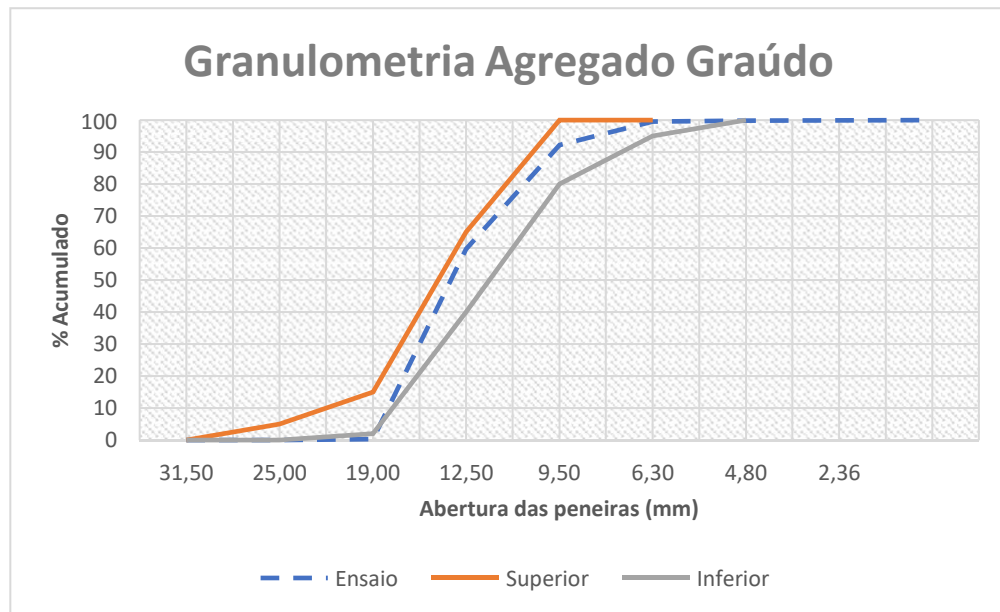
Os resultados obtidos no ensaio de granulometria estão apresentados na tabela 5 e figura 8:

Tabela 5: Distribuição granulométrica agregado graúdo.

Peneiras		Massa retida (g)			% retida			% retida acumulada			média
Pol.	Mm	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	
1 1/2"	31,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4" *	19,00	0,00	10,40	10,10	0,00	0,52	0,51	0,00	0,52	0,51	0,34
1/2"	12,50	1061,00	1277,40	1224,90	53,00	63,90	61,26	53,00	64,42	61,77	59,73
3/8" *	9,50	718,30	601,80	632,60	35,88	30,10	31,64	88,89	94,52	93,41	92,27
1/4"	6,30	210,30	102,60	125,60	10,51	5,13	6,28	99,39	99,65	99,69	99,58
Nº 4 *	4,80	6,50	3,30	4,50	0,32	0,17	0,23	99,72	99,81	99,91	99,82
Nº 8 *	2,36	2,50	1,70	0,50	0,12	0,09	0,03	99,84	99,90	99,94	99,89
FUNDO		3,20	2,00	1,20	0,16	0,10	0,06	100,00	100,00	100,00	100,00
TOTAL		2001,80	1999,20	1999,40	100,00	100,00	100,00	-	-	-	-

Fonte: Autor (2021).

Figura 8: Curva granulométrica agregado graúdo.



Com base na determinação da NBR NM 248, o agregado graúdo possui dimensão máxima característica de 19 mm e é classificado como brita 1.

4.3.2 Massa específica

Para a determinação da massa específica foi seguido os critérios estabelecidos pela NBR NM 53 (2009), onde os resultados obtidos estão descritos na tabela 6 a seguir:

Tabela 6: Massa específica agregado graúdo.

Descrição	Amostras
Peso (Agregado+Cesto) Imerso (g)	2767,00
Peso do Cesto Imerso (g)	878,40
Peso do agregado imerso (g)	1888,60
Peso do Recipiente + Agregado SSS (g)	3244,40
Peso do Recipiente (g)	236,20
Peso do agregado SSS (g)	3008,20
Peso do agregado seco + recipiente (g)	3233,50
Peso do agregado seco (g)	2997,30
Volume do agregado (cm ³)	1119,60
Volume da parte impermeável do agregado (cm ³)	1108,70
Massa específica aparente do agregado seco (g)	2,68
Massa específica real (g/cm ³)	2,70
Massa específica efetiva (g/cm³)	2,69
Absorção	0,36

Fonte: Autor (2021)

4.3.3 Massa unitária

Assim como o agregado miúdo, para determinação da massa unitária do agregado graúdo seguiu-se os parâmetros da NBR NM 45 (2006), os valores estão demonstrados na tabela 7:

Tabela 7: Massa unitária agregado graúdo.

Descrição	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa do caixote + amostra (g)	25400,00	25250,00	25200,00
Massa do caixote (g)	3200,00	3200,00	3200,00
Massa da amostra (g)	22200,00	22050,00	22000,00
Volume do caixote (cm ³)	14789,25	14789,25	14789,25
Massa unitária (g/cm ³)	1,50	1,49	1,49
Massa unitária média (g/cm³)	1,49		

Fonte: Autor (2021)

4.4 Caracterização do Concreto no Estado Fresco

4.4.1 Ensaio de consistência do concreto – *Slump Test*

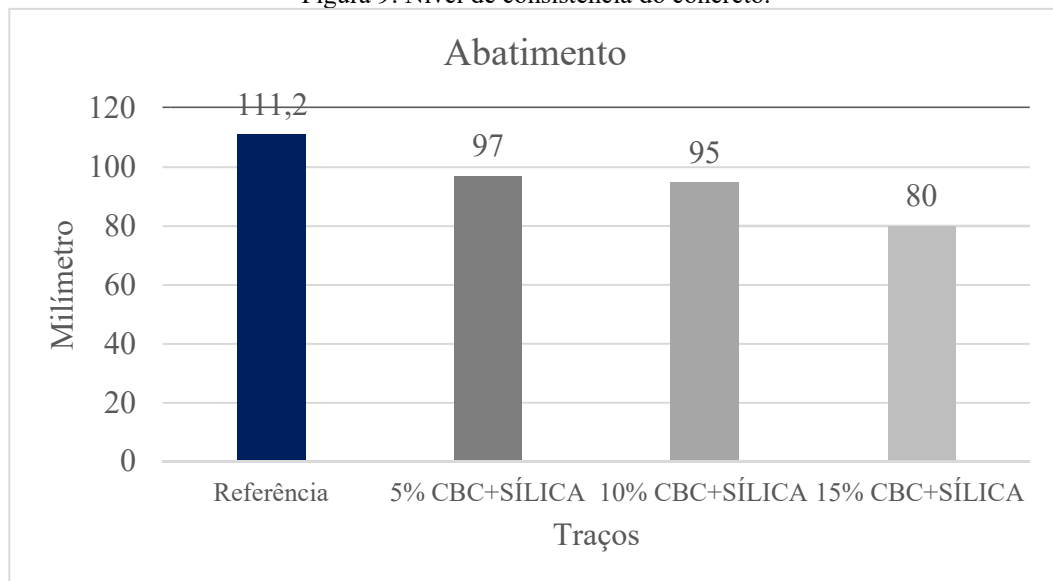
A tabela abaixo expõe os resultados do ensaio de consistência do concreto, seguido do gráfico que confere o que ocorre com o abatimento devido à adição de maior percentual de CBC associada à sílica ativa.

Tabela 8: Nível consistência do concreto.

Traço	Abatimento (mm)
Referência	111,2
5% CBC+SÍLICA	97
10% CBC+SÍLICA	95
15% CBC+SÍLICA	80

Fonte: Autor (2021)

Figura 9: Nível de consistência do concreto.



Fonte: Autor (2021)

Através do ensaio de abatimento é possível perceber que quanto maior o percentual de CBC associada a sílica ativa adicionado à mistura, menor é a trabalhabilidade do concreto. Em seus estudos, Hwang e Chandra (2002) atribuem o aumento do consumo de água no concreto, para uma dada consistência, às características celulares das partículas que conferem uma elevada superfície específica à cinza da casca de arroz, logo, para alcançar o mesmo abatimento obtido em concretos com cimento Portland é requerido dosagens ainda mais altas de água e aditivos plastificantes.

Cordeiro (2006) para garantir a manutenção do abatimento na faixa de $150 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ utilizou teores específicos de superplastificantes nos concretos com adição de 10%, 15% e 20% de cinza ultrafina do bagaço da cana. A figura a seguir mostra uma comparação entre o ensaio de abatimento feito por Cordeiro antes e posterior a correção da dosagem com aditivo superplastificante.

Figura 10: Ensaio de abatimento do tronco de cone para concreto de 20% de cinza ultrafina da casca antes (a) e após (b) correção da dosagem do aditivo superplastificante.



Fonte: Cordeiro (2006)

Figura 11: Medição ensaio de abatimento.



Fonte: Autor (2021)

4.5 Caracterização do Concreto no Estado Endurecido

4.5.1 Determinação da resistência por compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 5739 (2018). Foi determinada a resistência de 7, 14 e 28 dias, sendo rompidos 3 (três) corpos de prova para cada idade com as diferentes combinações de cimento, CBC e sílica, afim de determinar a influência da substituição do cimento no concreto quanto à resistência.

Após os rompimentos os dados obtidos foram analisados de acordo com a determinação estatística estabelecida pela NBR 5739 (2018), no qual os valores que ultrapassarem 5% de variação seriam descartados, por não tornar a amostra homogênea.

Na tabela 9 e figura 12 apresentados abaixo estão os resultados obtidos para todos os traços.

Tabela 9: Resistência à compressão (Mpa) dos corpos de prova aos 7, 14 e 28 dias.

Traço	Idade (dias)	CP1 (Mpa)	CP2 (Mpa)	CP3 (Mpa)	Média	Desvio Padrão	Variância
Referência	7,00	14,31	13,33	15,65	14,43	0,95	0,90
	14,00	17,89	16,99	19,75	18,21	1,15	1,32
	28,00	26,67	25,14	27,91	26,57	1,13	1,28

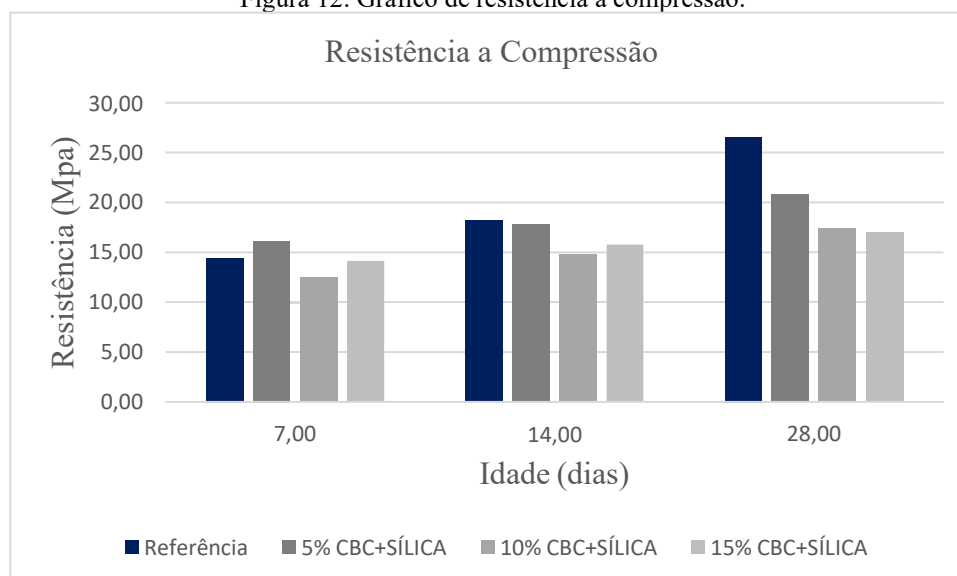
Traço	Idade (dias)	CP1 (Mpa)	CP2 (Mpa)	CP3 (Mpa)	Média	Desvio Padrão	Variância
5% CBC+SÍLICA	7,00	16,60	16,41	15,29	16,10	0,58	0,33
	14,00	16,71	18,87	17,79	17,79	0,88	0,78
	28,00	20,92	20,51	20,93	20,79	0,20	0,04
10% CBC+SÍLICA	7,00	11,47	12,12	13,76	12,45	0,96	0,93
	14,00	16,17	12,46	15,74	14,79	1,66	2,75
	28,00	20,50	15,31	16,51	17,44	2,22	4,92
15% CBC+SÍLICA	7,00	14,40	13,82	14,11	14,11	0,24	0,06
	14,00	16,50	15,37	15,37	15,75	0,53	0,28
	28,00	16,85	17,34	16,78	16,99	0,25	0,06

Fonte: Autor (2021).

É possível observar que o maior valor de resistência alcançado foi do traço de referência, atingindo a resistência de projeto (f_{cj}) para a idade de 28 dias, enquanto os traços com percentual da mistura de cinza e sílica não atingiram. Também pode-se verificar que há diminuição da resistência quanto mais se adiciona cinza e sílica, mesmo que com pouca diferença, como ocorreu no com o traço de 5% e 10% aos 7 dias.

Analisando a figura 10 é possível concluir que o traço de 5% obteve valores melhores que o traço referência na primeira idade (7 dias), e valores equiparados na segunda idade (14 dias), entretanto aos 28 dias atingiu uma diferença significativa de 5,79 Mpa. Com isso é possível afirmar que o traço referência deteve os melhores resultados no ensaio de resistência a compressão.

Figura 12: Gráfico de resistência a compressão.



Fonte: Autor (2021).

O efeito filer, reação almejada neste trabalho, de acordo com Neville (2016, p. 700), contribui para o desenvolvimento da resistência inicial, até aproximadamente sete dias, que

provavelmente decorre do melhor empacotamento ao aprimorar a região de interface com o agregado. Neville (2016, p. 90) também cita que o efeito não deve afetar negativamente a resistência do concreto em logo prazo, mas que esse problema não foi observado.

Não há indícios de atividade pozolânica da mistura, já que em idades avançadas a substituição decaiu a resistência. Cordeiro (2006) estudou a utilização de uma cinza ultrafina para aplicação no concreto, que foi moída de diferentes formas. Essa adição possibilitou a manutenção das propriedades mecânicas, redução do consumo de cimento e o melhoramento do slump test devido à sua atividade pozolânica. Já a utilização da cinza residual sem moagem obteve significativa redução da resistência em relação ao traço referência, resultado este atribuído a baixa atividade pozolânica do material.

4.5.2 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Para a determinação da resistência à tração, foram rompidos 3 corpos de provas somente para a idade de 28 dias, para os 4 traços. Os valores obtidos estão descritos na tabela 10 e na figura 13 a seguir:

Tabela 10: Resistência à tração para idade de 28 dias (Mpa).

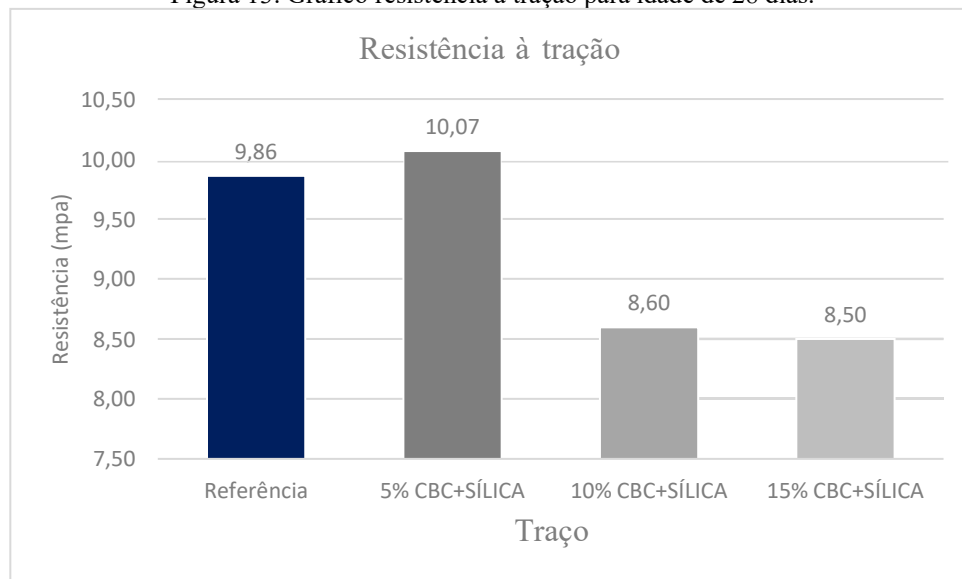
Traço	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio Padrão	Variância
Referência	11,07	9,45	9,06	9,86	0,87	0,76
5% CBC+SÍLICA	10,42	10,56	9,22	10,07	0,60	0,36
10% CBC+SÍLICA	8,05	10,07	7,67	8,60	1,05	1,11
15% CBC+SÍLICA	7,93	8,81	8,76	8,50	0,40	0,16

Fonte: Autor (2021).

Com os valores obtidos no ensaio é possível notar que a resistência à tração dos corpos de prova do traço referência e substituição de 5% se mantiveram próximos, entretanto o traço de 5% superou o traço referência na média.

Os valores em comparação com o traço de compressão axial para os traços referência, 5% CBC, 10% CBC e 15% CBC, são de, respectivamente: 37%, 48%, 49% e 50%.

Figura 13: Gráfico resistência a tração para idade de 28 dias.



Fonte: Autor (2021).

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados do estudo das possibilidades de utilização da cinza do bagaço da cana de açúcar associada à sílica ativa como substituição parcial do cimento Portland, pode-se tirar as seguintes conclusões.

- A análise do espectro de infravermelho indicou a incorporação de material carbonático, também conhecido como filer, na mistura CBC + sílica ativa, com a presença de grupos funcionais das duas componentes da mistura no material do aditivo;
- Quanto a consistência do concreto no estado fresco conclui-se que a cinza influenciou minimamente no abatimento do concreto, pois os valores mantêm-se na faixa estabelecida para o concreto de referência, entretanto diminui com o aumento do percentual de substituição;
- Os resultados mostram que quanto maior o percentual de substituição de cimento Portland por cinza do bagaço de cana-de-açúcar mais a resistência tende a cair em comparação ao traço referência, tendo como fator que pode ter influenciado esse acontecimento a não moagem mecânica da mistura de cinza + sílica, processo que diminui a granulometria das partículas e confere maior reatividade ao material, contribuindo para ganho de resistência a compressão;
- Não há indícios de atividade pozolânica da CBC, pois em idades avançadas a substituição decaiu a resistência.
- Há indícios de que houve reação de efeito filer no traço de 5% devido ao desenvolvimento da resistência inicial do concreto, que foi maior em comparação ao traço referência;
- Houve uma elevação na resistência à tração por compressão diametral do traço de 5% de CBC + sílica ativa em relação ao traço referência;

Em sua pesquisa, Cordeiro (2006) utilizou CBC in natura, que assim como neste trabalho, não passou pelo processo de moagem, e concluiu que a baixa atividade pozolânica foi a provável principal razão para o decaimento das propriedades mecânicas do concreto. Cabe ressaltar que a cinza no teor de 5%, que obteve os resultados mais próximos ao do traço referência, pode ser usada em estruturas que requeiram baixa capacidade de carga, pois sua incorporação reduz o uso de cimento e oferece um melhor descarte da CBC, contribuindo para a sustentabilidade do planeta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11172: Aglomerantes de Origem Mineral – Terminologia.** Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos.** 1 ed. Rio de Janeiro, 2014. 6 p.

_____. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos.** 1 ed. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7222: Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52: Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53: Agregado Graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ALMEIDA, Salvador L. M.; LUZ, Adão Benvindo da. **Manual de Agregados para Construção Civil.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

ALVES, J D.; GOULART, B. C. **Atividade Pozolânica da Cinza de Casca de Arroz.** In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 1981, São Paulo. São Paulo, 1981.

ANDRADE, C. **Óxido de Grafeno Agregado ao Concreto.** Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2017.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil**. In: IV Seminário Desenvolvimento sustentável a reciclagem na construção - práticas recomendadas, 2001, São Paulo. IV Seminário Desenvolvimento sustentável a reciclagem na construção - práticas recomendadas, 2001.

ARAÚJO, R.C.L.; RODRIGUES, L.H.V.; FREITAS, E.G.A. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro, 2000. (Apostila)

BAUER, Falcão. **Materiais de Construção**. 5º Ed. São Paulo: LTC, 2000.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash**. Construction and Building Materials, v. 23, p. 3301-3303, 2009.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F.; VALDUGA, L. **Análise comparativa de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007.

COSTA, E. et al. **Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 75-86, abr./jun. 2013.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica**. 1995, 186p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar)**, São Paulo: FIESP/CIESP, 90 p, 2011.

GONG, Kai, et al. **Reinforcing effects of graphene oxide on Portland cement paste**. In: Journal of Materials in Civil Engineering. 2015; Vol. 27, No. 2. pp. 1 - 6.

GOPINATHAN, S.; VENKATESAN, G. **Analyse the Environmental Combine Effect of Graphene Oxide and Rice Husk Ash in Concrete Properties**. Ekoloji, Tiruchirappalli, v. 27, n. 106, p.913-924, 09 maio 2018.

HWANG, C. L., CHANDRA, S., 2002, “**The use of rice husk ash in concrete**”. In: Chandra, S. (ed), Waste materials used in concrete manufacturing, New Delhi: Standard Publishers Distributors, pp. 184-234.

ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2007. 1v. 792 p.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete – Edição 1**. Ed.: SCMSD Canada. ISBN: 0-9731507-0-X. Inglês, p.101. Canadá: 2002.

MAPA. **Safra de cana-de-açúcar deve chegar a 635 milhões de toneladas**. Brasil: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2017. Disponível em: <<<http://www.agricultura.gov.br/noticias/safra-de-cana-de-acucar-deve-chegar-a-635-milhoes-de-toneladas>>>. Acesso em: 30 nov, 2019.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F. M., MIDDEENDORF, B., GEHRKE, M., BUDELMANN, H., 1998, “**Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction**”, Cement and Concrete Research, v. 28, n. 11, pp. 1525-1536.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura Propriedades e Materiais**. Editora Pini, São Paulo, 1ª ed., 1994.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5.ed. São Paulo: Pini, 2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto** [recurso eletrônico] /A. M. Neville; tradução: Ruy Alberto Cremonini. - 5. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2016.

PAN, Z; et al. **Engineering properties of graphene oxide reinforced cement**. In J. G. Teng, J. G. Dai, S. S. Law, Y. Xia, & S. Y. Zhu (Eds.), *Proceedings of the First International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering* (pp. 1336 - 1342). Hong Kong China: The Hong Kong Polytechnic University, 2012.

PEDROSO, F. L. **Concreto**: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. Revista Concreto e Construções. Ano XXXVII. n. 53. São Paulo, SP: IBRACON, 2009.

PEREIRA et al. (1947 apud REIS; NÓBREGA, 2013, p. 86). MASSAZZA, F., 1998, **“Pozzolana and pozzolanic cements”**. In: Hewlett, P. C. (ed), Lea’s chemistry of cement and concrete, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 471-631.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998. 307 p.

SANTOS, L. A. **Uso de Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar na Produção de Concretos Especiais para Aplicação em Meios Agressivos de Instalações Agroindustriais**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). 154 p. Viçosa, MG: UFV, 2013.

SAVASTANO, Jr., WARDEN, P. G. **Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites**. Cement & Concrete Composites, v.25, n.5, p.517-624, 2003.

SILVA, M. G. **Cimentos portland com adições minerais**. In: ISAIA G. C. (Ed). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. v.1, capítulo 23, p. 761-793.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Rio de Janeiro, RJ: GF Desing, 2009.

SINGH, N. B., SINGH, V. D., RAI, S., 2000, **“Hydration of bagasse ash-blended Portland cement”**, Cement and Concrete Research, v. 30, n. 9, pp. 1485-1488.

VASCONCELOS, Y. **Concreto Feito de Cinzas**. São Paulo, SP: FAPESP, 2010.

ZHU, Pan; WENHUI, Duan. **Graphene Oxide Reinforced Cement and Concrete**. AU n° WO/2013/096990, 21 dez. 2012, 04 jul. 2013.