

INSTITUTO FEDERAL
GOIANO
Câmpus Rio Verde

ENGENHARIA CIVIL

**APLICABILIDADE DE CONCRETO ENRIQUECIDO
COM CINZAS PROVINDAS DO BENEFICIAMENTO DA
CANA-DE-AÇÚCAR: UMA REVISÃO LITERÁRIA**

KAIQUE ANTÔNIO ALVES DE FREITAS

Rio Verde, GO
Junho, 2021

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - IFGOIANO
CAMPUS RIO VERDE
ENGENHARIA CIVIL

**APLICABILIDADE DE CONCRETO ENRIQUECIDO COM
CINZAS PROVINDAS DO BENEFICIAMENTO DA CANA-DE-
AÇÚCAR: UMA REVISÃO LITERÁRIA**

KAIQUE ANTÔNIO ALVES DE FREITAS

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano- Campus Rio Verde, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira

Coorientadora: Prof. Me. Bruna Elói do Amaral

Rio Verde - GO
Junho, 2021

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

FF866a Freitas, Kaique Antônio Alves de Freitas
APLICABILIDADE DE CONCRETO ENRIQUECIDO COM CINZAS
PROVINDAS DO BENEFICIAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR: UMA
REVISÃO LITERÁRIA / Kaique Antônio Alves de Freitas
Freitas; orientador Marconi Batista Teixeira
Teixeira; co-orientadora Bruna Elói do Amaral Amaral.
-- Rio Verde, 2021.
42 p.

TCC (Graduação em Engenharia Civil) -- Instituto
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

1. Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. 2. CBC. 3.
Substituição parcial de cimento. 4. Construção
sustentável. I. Teixeira, Marconi Batista Teixeira,
orient. II. Amaral, Bruna Elói do Amaral, co-orient.
III. Título.



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Kaique Antônio Alves de Freitas

Matrícula: 2016102200840660

Título do Trabalho: APLICABILIDADE DE CONCRETO ENRIQUECIDO COM CINZAS PROVINDAS DO BENEFICIAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR: UMA REVISÃO LITERÁRIA

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 04/06/2021

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumprir quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 01/ junho/ 2021.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



Ciente e de acordo:

Assinatura do Orientador



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 35/2021 - UCPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO (TC)

ANO	SEMESTRE
2021	1º

No dia 28 do mês de maio de 2021, às 19 horas e 00 minutos, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes Marconi Batista Teixeira, Michell Macedo Alves e Wilker Alves Moraes, para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado “Proporções granulométricas e aplicabilidade de concreto enriquecido com cinzas provindas do beneficiamento da cana-de-açúcar”, do acadêmico Kaique Antônio Alves de Freitas, Matrícula nº 2016102200840660 do curso de Engenharia Civil do IF Goiano – Campus Rio Verde. Após a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do acadêmico. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que segue datada e assinada pelos examinadores.

Rio Verde, 02 de junho de 2021.

Marconi Batista Teixeira

Orientador

Assinado eletronicamente

Michell Macedo Alves

Membro

Assinado eletronicamente

Wilker Alves Moraes

Membro

Assinado eletronicamente

Observação:

() O acadêmico não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- Wilker Alves Moraes, 2017102320140165 - Discente, em 04/06/2021 17:57:55.
- Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/06/2021 12:28:44.
- Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - UCPG-RV, em 02/06/2021 15:53:07.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/06/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 275921

Código de Autenticação: fb101d781b

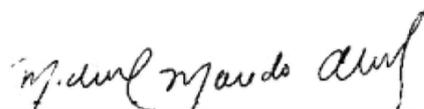


INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600

KAIQUE ANTÔNIO ALVES DE FREITAS

**APLICABILIDADE DE CONCRETO ENRIQUECIDO COM
CINZAS PROVINDAS DO BENEFICIAMENTO DA CANA-DE-
AÇÚCAR: UMA REVISÃO LITERÁRIA**

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 28 de maio de 2021, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:



Prof. Dr. Michell Macedo Alves
IF Goiano Campus Rio Verde



Prof. Dr. Wilker Alves Morais
IF Goiano Campus Rio Verde



Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira
IF Goiano Campus Rio Verde



Prof. Me. Bruna Elói do Amaral

Rio Verde – GO

Junho de 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço a Deus que por sua infinita bondade me concedeu saúde, paz e me permitiu fazer parte da história do Instituto Federal Goiano e do Curso de Engenharia Civil do Campus Rio Verde.

Agradeço aos meus pais, Lindacy e Djalma que sempre me deram todo o apoio necessário em minha vida e na minha trilha acadêmica, não permitindo que faltasse algo em minha vida. A minha irmã, Caroline que se fez presente em todos os momentos difíceis e pode dividir comigo parte da sua caminhada acadêmica e me incentivar a dar o meu máximo todos os dias. Obrigado por serem a base de tudo que planejo construir e nunca desistirem de mim, eu amo muito vocês.

Aos meus amigos e colegas de graduação, Caroline, Leonardo, Vanessa que dividiram comigo toda a dificuldade da vida acadêmica, passaram noites estudando ao meu lado e conseguiram ser um ponto de paz no meio de toda e qualquer dificuldade que foi enfrentada. Estarei ao lado de vocês todos os dias para aplaudir suas vitórias e dividir o peso de suas derrotas. Vocês possuem um significado imenso em minha vida.

Aos demais amigos, Bruna, João Lucas, Hanna, Ana Lídia, Mateus, Saulo, Gabriel que puderam dividir comigo um pouco do grande fardo que foi carregado durante todo esse tempo. Com certeza sem vocês a dificuldade teria sido muito maior

Aos meus avós, Valdir e Maria que são a base e a sustentação de toda nossa família. Esses dois seres humanos incríveis nunca permitiram que um problema fosse capaz de nos abalar e sempre fortaleceram nossa família a todo e qualquer momento de dificuldade

Aos meu orientador, Prof. Doutor Marconi Batista, e minha Coorientadora Prof^ª. Mestre Bruna Elói, o meu muito obrigado por apesar da intensa rotina de trabalho não mediram esforços ao aceitarem meu convite e além de conselhos acadêmicos me escutaram e me deram conselhos de vida. Obrigada pela paciência e dedicação na elaboração e correção deste trabalho final, por todo o encorajamento para que cada etapa

fosse concluída e por todos os ensinamentos que contribuíram na minha formação acadêmica, pessoal e profissional.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Michell Macedo e Prof. Dr. Wilker Morais, pela imensa honra na contribuição deste trabalho final, bem como, para com a minha formação.

Ao Instituto Federal Goiano (campus Rio Verde), por toda infraestrutura, pelos auxílios e por todas as oportunidades que contribuíram na minha formação. Em especial a todos os professores, Mestres e Doutores, que de alguma forma me auxiliaram e impulsionaram ao longo destes 5 anos.

À indústria Denusa, por não medirem esforços na colaboração do estudo de caso

A todos que direta ou indiretamente me incentivaram e fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

FREITAS, Kaique Antônio Alves. **APLICABILIDADE DE CONCRETO ENRIQUECIDO COM CINZAS PROVINDAS DO BENEFICIAMENTO DA CANA DE AÇÚCAR**. 2021. 46p. Monografia (Curso Bacharelado em Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2021.

O desenvolvimento do país está correlacionado ao avanço da indústria da construção civil, mas esta atividade provoca impactos ambientais. A indústria cimenteira tem grande contribuição para as emissões de CO_2 do mundo. Buscando minimizar os índices de emissões de CO_2 , bem como as consequências do aquecimento global devido ao aumento anual na produção do cimento, vários pesquisadores realizam estudos da substituição do cimento Portland por materiais alternativos. Portanto, este trabalho tem como objetivo mesclar e analisar estudos realizados por diversos autores sobre a cinza do bagaço da cana-de-açúcar da Usina Bioenergética, como substituto parcial do cimento Portland na elaboração do concreto. Além disso, após todo compilado todos os estudos, foi elaborado um estudo de caso para analisar a diminuição dos impactos econômicos e ambientais ao utilizar toda a cinza do bagaço da cana-de-açúcar gerada em uma safra da indústria Denusa – Destilaria Noiva União S/A para substituir 10% do cimento na execução de concretos para construções residências convencionais. Os resultados obtidos nos trabalhos levantados demonstram a efetividade da substituição parcial da cinzas no cimento, principalmente na proporção de 10%, na qual foram observados os melhores valores em relação à resistência e trabalhabilidade do concreto. O estudo de caso desenvolvido evidenciou as vantagens de sua utilização, sobretudo no que tange a fatores econômicos e ambientais.

Palavras-chave: Substituição parcial de cimento. Construção sustentável. Emissão de CO_2 .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Bagaço de cana-de-açúcar e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: (b) cinza com alto teor de carbono, proveniente da combustão incompleta, (c) cinza com menor teor de carbono e (d) cinza após combustão completa.	20
Figura 2 – Denusa – Destilaria Nova União S/A.....	35
Figura 3 – Caldeiras DENUSA	36
Figura 4 – Caldeira DENUSA	36
Figura 5 – Bagaço da cana de açúcar safra 2020/21.....	37
Figura 6 – Cinzas Bagaço da cana de açúcar safra 2020/21.....	37
Figura 7 – Cinzas Bagaço da cana de açúcar safra 2020/21.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das cinzas do bagaço da cana de açúcar em diferentes regiões	20
Tabela 2 - Composição química dos materiais pozolânicos.....	23
Tabela 3 – Propriedades físicas dos materiais pozolânicos.....	26
Tabela 4 – Resultado Slump Test.....	27
Tabela 5 – Comparação da composição química da CBC e cimento Portland	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Consistência de Slump Test e aplicabilidade de concreto conforme NBR 8953	28
Quadro 2 - Características físicas da CBC e mecânicas do concreto	30
Quadro 3 – Propriedades químicas do concreto com adição de CBC em diferentes estudos	32

LISTA DE ABREVIÇÕES, SIGLAS OU SÍMBOLOS

% Por cento

°C Grau Celsius

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 Óxido de Alumínio

CaO Óxido de Cálcio

CBC Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar

Cl Cloro

CO_2 Gás Carbônico

CO_3O_4 Óxido de Cobalto

CP Corpo-de-prova

Cr_2O_3 Óxido de Cromo

C-S-H Silicato de Cálcio Hidratad

Fck Resistência Característica aos 28 dias

Fe_2O_3 Óxido de Ferro

FRX Fluorescência de Raios X

GO Goiás

g Gramas

IAP Índice de Atividade Pozolânica

KPa Quilopascal

kg Quilograma

KO_2 Óxido de Potássio

MgO Óxido de magnésio

Mm Milímetros

m² Metros quadrados

m³ Metros cúbicos

µm Micrometro

MnO Óxido de Manganês

MPa Megapascal

Na_2O Óxido de Sódio NBR Norma Brasileira

P_2O_2 Pentóxido de Fosforo

PIB Produto Interno Bruto

SiO_2 Dióxido de Silício

SO_3 Anidro Sulfídrico

SrO Óxido de Estrôncio T500 Tempo de Espalhamento

TiO Óxido de Titânio

ZrO₂ Óxido de Zircônio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC)	18
2.2	CBC Para Substituição Parcial do Cimento Portland	21
2.3	Atividade Pozolânica da CBC	22
2.4	Adição de CBC em cimento	26
2.5	Propriedades físicas e mecânicas do concreto com adição da CBC	27
2.6	Propriedades químicas do concreto	31
3	METODOLOGIA CIENTÍFICA	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

A construção civil possui grande participação na economia mundial e é um setor que passa por constantes inovações, apresentando novos conceitos de empreendimentos e obras. Em 2019, o Brasil obteve uma alta de 2% no PIB da construção civil de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE, 2020). Isso mostra que há uma demanda muito grande de materiais, sendo o concreto um dos mais consumidos.

Esta alta demanda promove o aumento da produção de cimento, um constituinte de suma importância para a confecção de concreto. Para evidenciar esse alto consumo, a produção nacional do cimento totalizou no ano de 2019 cerca de 54,5 milhões de toneladas (SNIC, 2019). Já em fevereiro de 2021, as vendas de cimento totalizaram 4,7 milhões de toneladas, um crescimento de 14% em relação ao mesmo mês de 2020. Já no acumulado dos últimos 12 meses, o avanço foi de 11,8%, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2021).

O maior problema é que essa atividade gera grandes impactos negativos ao meio ambiente, já que as cimenteiras consomem uma grande quantidade de recursos naturais na produção do clínquer – um dos componentes do cimento Portland e esse processo gera a liberação de gás poluente. De acordo com Castaldelli (2003), 44% da matéria-prima se perde em forma de liberação de gás carbônico nas etapas de produção de cimento.

Com o avanço de estudos e tecnologias, muitos pesquisadores estão em busca de uma forma de diminuir o impacto causado pela produção do concreto. Londero (2017) substituiu parte do cimento por cinza de casca de arroz e avaliou a resistência. Wang et al. (2017) teve como resultados significativas melhorias na durabilidade do concreto com cinzas volantes e sílica. Borja (2011) analisou o efeito de argila expandida e adições minerais na formação de concretos leves. Aksogan et al. (2016) obteve uma melhora nas propriedades do concreto utilizando o talo do milho, a palha do trigo e a cinza do talo do girassol, além de barita e a colemanita como agregado fino.

No Brasil, há diversas pesquisas que abordam sobre a substituição parcial do cimento Portland pelas cinzas do bagaço da cana de açúcar (CBC). O país se posiciona como o maior produtor mundial de açúcar e álcool, e no processo industrial de extração do caldo da cana de açúcar, cerca de 30% da cana se transforma em bagaço. Essa biomassa é utilizada como fonte energética, onde 95% destas são queimadas em caldeiras para geração de eletricidade, produzindo como resíduo final a cinza do bagaço da cana de

açúcar (Paula et al., 2009). A CBC é composta quase que totalmente por sílica – que é um composto com potencial pozolânico. Esse é um motivo que faz com que a cinza do bagaço da cana de açúcar tenha um grande potencial para ser utilizado na confecção do concreto, tanto para substituir uma porcentagem de cimento Portland ou agregados. (FERNANDES, 2014)

2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho possui o objetivo de reunir informações de experimentos onde foi substituído parcialmente o Cimento Portland pelas cinzas do bagaço da cana de açúcar e analisar os resultados e benefícios. Após a análise, foi realizado um estudo de caso dos benefícios da implementação do concreto enriquecido com cinzas em construções convencionais, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Para este fim, foram utilizados dados obtidos de uma usina localizada no estado de Goiás e adotou-se como referência o mercado da construção civil do município de Rio Verde, GO.

2.1 Objetivos específicos

- Através da literatura, reunir dados e gerar gráficos e tabelas comparando resultados físicos e químicos da CBC;
- Analisar caracterização da CBC encontrada em diferentes ensaios;
- Verificar resultados mecânicos obtidos em concreto com adição de CBC;
- Analisar utilização da CBC em construções residenciais convencionais;
- Utilizar a metodologia e os resultados para analisar impactos ambientais e econômicos da utilização prática da CBC em substituição parcial ao cimento em obras residenciais.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A seguir serão apresentados dados e características da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e comparações físicas e químicas com o cimento Portland. Os materiais empregados em todos os trabalhos pesquisados foram o cimento Portland, areia, pedra britada (como agregado graúdo), água e em alguns o emprego de aditivos plastificante e superplastificantes.

3.1 A cinza do bagaço da cana-de-açúcar

De acordo com o SIFAEG (2020), produção total de cana-de-açúcar no Estado de Goiás atingiu o total de 75,8 milhões de toneladas (variação de 0,7% em relação à safra anterior), em uma área de 974,4 mil hectares, 3,3% a mais que a safra anterior. Também de acordo com o SIFAEG (2020) na fabricação do etanol, cada tonelada de cana-de-açúcar gera, em média, 250 quilos de bagaço e 200 quilos de palhas e pontas, que garantem a energia elétrica suficiente para abastecer as usinas durante o período da safra. A geração de bioeletricidade permite também que o excedente produzido pelas usinas seja repassado para o sistema elétrico brasileiro.

Os processos envolvidos na obtenção da cana-de-açúcar, como matéria prima, ocorrem da seguinte forma: após a colheita, a cana-de-açúcar é encaminhada para a usina e passa por três moendas, sendo que o produto da primeira moagem é destinado à produção de açúcar, enquanto o produto da segunda e da terceira moagem são utilizados para a produção de álcool combustível. Por fim, o bagaço, oriundo desse processo, é usado como combustível que produz vapor para a geração de eletricidade, constituindo-se de um processo de cogeração de energia. Durante a queima do bagaço da cana-de-açúcar são geradas cinzas residuais que alteram suas propriedades de acordo com as condições de queima e umidade (SALES et al., 2010).

De acordo com Pádua (2012), o processo que dá origem as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar ocorre na queima do bagaço nas caldeiras e raramente possui um controle operacional específico de temperatura, isso faz com que a cinza possa acabar não sendo reativa ou pozolânica, os quais são aspectos essenciais para sua adoção como substituto parcial no cimento. As características físicas e químicas das cinzas são influenciadas diretamente na temperatura e no tempo de queima, uma vez que são fatores característicos da amorficidade e finura da cinza.

De acordo com Vasconcelos (2013), as cinzas são um material pulverulento que apresenta diferentes tons de cinzas caso a temperatura de produção seja variada. A temperatura nas caldeiras varia de 300 °C a 1000 °C, onde não há controle da combustão. De acordo com Cordeiro (2006), as cinzas que são queimadas em temperatura menor possuem um maior teor de carbono e logo são mais escuras, enquanto as cinzas queimadas em temperaturas elevadas possuem uma quantidade menor de matéria orgânica e a cor é mais clara. Pode-se observar na Figura 1.



Figura 1 – (a) Bagaço de cana-de-açúcar e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: (b) cinza com alto teor de carbono, proveniente da combustão incompleta, (c) cinza com menor teor de carbono e (d) cinza após combustão completa.

Fonte: Cordeiro (2006)

Vasconcelos (2013) constatou que as características físicas e químicas das cinzas podem ser influenciadas pela espécie botânica da cana, condições climáticas, tipo de solo, processo de colheita e de moagem, da finura das cinzas produzidas, safra e região de plantio e colheita. Lima (2020) fez uma análise de fluorescência de raio-X (FRX) e comparou com outros estudos as características do bagaço da cana-de-açúcar em diferentes regiões como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das cinzas do bagaço da cana de açúcar em diferentes regiões

Composição química do CBC (%)	Berenguer et al., (2020)	Sua-iam e Makul (2013)	Câmara et al., (2016)	Sampaio et al., (2014)	Joshaghani e Moeini (2017)	Lima (2020)
	Estado/País					
	Pernambuco, Brasil	Singburi, Tailândia	Paraná, Brasil	Rio Grande do Norte, Brasil	Tehran, Irã	Goiás, Brasil
SiO_2	84,86	65,26	76,55	50,01	55,7	30,58
K_2O	1,38	1,99	1,32	14,83	6,1	1,51
Fe_2O_3	3,83	3,65	2,59	1,96	3,51	26,62
CaO	2,96	4,01	1,2	5,92	15,34	1,43
Al_2O_3	1,91	6,91	2,53	8,3	2,86	10,67
Na_2O	0,47	0,33	0,09	-	0,37	-
TiO_2	0,76	-	0,53	0,58	-	10,3
SO_3	0,39	0,21	0,4	5,52	-	-

<i>MgO</i>	2,24	1,1	1,63	5,55	4,08	2,08
<i>ZnO</i>	0,03	-	-	0,05	-	0,09
<i>MnO</i>	0,19	-	0,008	0,23	-	0,34
<i>ZrO₂</i>	0,2	-	0,015	0,04	-	-
<i>P₂O₅</i>	0,38	-	0,69	2,46	-	1,86
<i>Cr₂O₃</i>	0,05	-	-	-	-	0,12
<i>SrO</i>	0,03	-	0,005	-	-	-
<i>Cl</i>	-	-	0,027	-	-	-
<i>Co₃O₄</i>	-	-	0,115	-	-	-

Fonte: Lima (2020)

A maior parte dos estudos apresentados foi realizada no Brasil e pode-se observar que a composição química da cinza pode ser influenciada pela região. É importante salientar que essas diferenças na composição ocorrem inclusive dentro do território de um mesmo país. Pode-se verificar que Lima (2020) fez uma análise recente das características da composição química da CBC do estado de Goiás.

De acordo com Silveira (2010), o cultivo de cana-de-açúcar é propício de acordo com alguns climas durante o ano, sendo que, em algumas regiões são cultivadas o ano todo e outras só em determinadas épocas do ano. Pelas composições químicas apresentadas, verifica-se que a (CBC) é composta por uma grande quantidade de (SiO_2), que de acordo com Bolognini (2016) é um composto químico importante encontrado no cimento que auxilia na formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), ocasionando uma contribuição nas propriedades mecânicas do concreto, argamassa e pasta.

3.2 Cinzas do Bagaço da Cana-de-Açúcar Para Substituição Parcial do Cimento Portland

Segundo a ABNT NBR-5732 (ABNT, 1991), o cimento Portland é um produto constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas. Isto é, endurece sob a ação da água e, depois de endurecido, mesmo que seja exposto a água, a pasta não desagrega.

De acordo com Cabral (2016), as características do concreto e suas propriedades derivam das proporções e da qualidade dos materiais utilizados na sua constituição. O cimento é o principal componente do concreto e das argamassas. Isso ocorre porque o cimento é o material mais ativo quimicamente e possui a função de unir os agregados miúdos e graúdos e contribui com o alcance da resistência desejada.

Ao misturar o cimento com outros materiais, forma-se o concreto. Segundo Sampaio (2013) o concreto é o material resultante da combinação em determinadas

proporções de um aglomerante, como o cimento Portland, de um agregado miúdo, geralmente areia, de um agregado graúdo, normalmente a brita e água. Além disso, podem ser adicionados aditivos que influenciem no desempenho do concreto. Os agregados são materiais granulares, inertes, sem volume e forma definidos. Estes podem ser de origem natural ou artificial, tendo um papel marcante na composição do concreto, pois ocupam quase 80% do peso estrutural (SAMPAIO, 2013).

Para ter um valor suplementar no cimento, a CBC precisa ter componentes silicosos ou sílico-aluminoso devido ser um dos fatores imprescindíveis para que ocorra a reação pozolânica na argamassa e no concreto. A reação pozolânica consiste em uma reação ácido-base, entre o hidróxido de cálcio e o óxido de silício. Outros fatores que influenciam a ocorrência da reação é o tamanho da partícula (área superficial específica) e o estado amorfo da SiO_2 (fase não cristalina). A quantidade de sílica é maior quando o resíduo é calcinado, havendo a retirada da fração orgânica do material (ROSELLÓ et al., 2017).

3.3 Atividade Pozolânica da CBC

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015), os materiais pozolânicos são silicosos ou sílico aluminosos, isto é, possuem alto teor de SiO_2 e/ou Al_2O_3 , porém quando isolados possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante (cimentícia), mas divididos e na presença de água, possuem a capacidade de formar compostos aglomerantes em temperatura ambiente ao reagirem com o hidróxido de cálcio. Mehta e Monteiro (2014), classificam materiais pozolânicos como aditivos minerais, cimentantes e materiais tanto cimentantes como pozolânicos.

A norma classifica esses materiais em três classes:

- Classe N: Pozolanas naturais e artificiais;
- Classe C: Cinzas volantes, produzidas da queima do carvão mineral em usinas termoelétricas;
- Classe E: Qualquer pozolana que difere dos itens anteriores e obedece aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015).

Exigências quanto a características físicas e composição química de um material pozolânico devem atender à Tabela 2 e a Tabela 3.

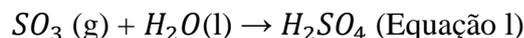
Tabela 2 - Composição química dos materiais pozolânicos.

	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$, %min	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$
SO_3 , %máx.	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Teor de umidade, %máx.	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2015).

É importante atender a quantidade mínima de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) previsto na Tabela 2 devido os dois compostos serem responsáveis pela reação com o hidróxido de cálcio liberado no processo de hidratação do cimento. Isso forma os silicatos de cálcio hidratados (AC-H) e/ou silícoaluminosos de cálcio hidratados (S-A-C-H) (MACEDO, 2009).

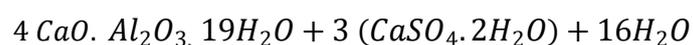
A quantidade máxima de óxido de sulfúrico SO_3 deve ser no máximo 5% da quantidade da composição do composto. De acordo Souza (2016) o SO_3 é hidratado, ou seja, entra em contato com a água (H_2O), tem-se a formação do ácido sulfúrico H_2SO_4 .



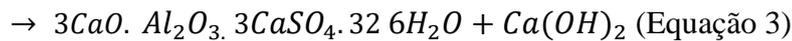
O cimento possui o óxido de cálcio CaO em grande parte da sua composição química, ao entrar em contato com a água o óxido de cálcio forma o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ na pasta de cimento. O ácido sulfúrico produzido é agressivo ao concreto pois na reação com o hidróxido de cálcio produz o sulfato de cálcio na forma de gesso ou gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2SO_4$), conforme equação 2.



O sulfato de cálcio irá reagir com o aluminato de tricálcio hidratado (C_3A), que é o componente responsável pela resistência mecânica. Essa reação produz a etringita, conforme a equação 3, que pode gerar expansão, fissuração e desagregação no concreto.



(aluminato de tricálcio). (gipsita)



(etringita)

(portlandita)

A perda ao fogo é obtida por uma adaptação da NBR NM 18 (ABNT, 2004), onde se utiliza 1 grama de CBC colocada em um cadinho (vaso de material resistente ao fogo) de massa conhecida e essa amostra é calcinada em forno mufla à temperatura entre 900 °C e 1000°C, durante 50 minutos. Após esse tempo, espera-se a amostra esfriar na própria mufla e pesa-se novamente. A perda ao fogo refere-se em grande parte ao dióxido de carbono que determina a coloração do material. O percentual de perda ao fogo é determinado pela equação 4.

$$PF = \left(\frac{Mq - Ms}{Ms} \right) * 100\% \text{ (Equação 4)}$$

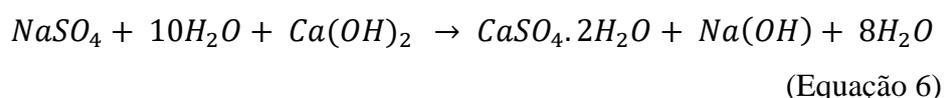
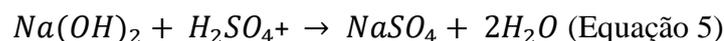
Onde:

PF: Perda ao fogo (%)

Mq: Massa da CBC submetida a temperatura média de 950 °C por 50 minutos (g)

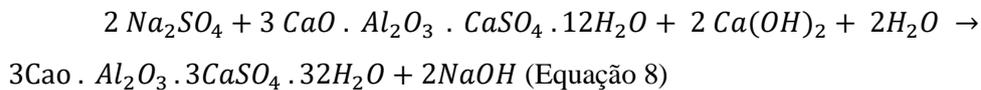
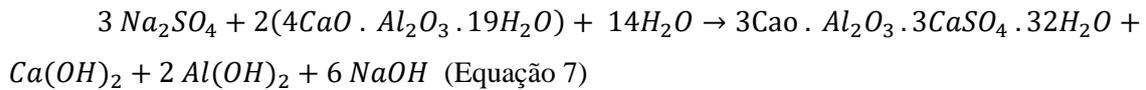
Ms: Massa da CBC seca a 80°C (g)

De acordo com Costa (2004) a quantidade máxima de composição de óxido de sódio (Na_2O) é de 1,5% devido os problemas da formação dos sulfatos de sódio (Na_2SO_4), que apresentam uma solubilidade vinte vezes maior que os sulfatos de cálcio, e são, portanto, mais agressivos. O sulfato de sódio é formado ao reagir o hidróxido de sódio com o ácido sulfúrico (H_2SO_4) conforme equação 5. O sulfato de sódio pode estar presente em dois tipos de reações: uma com o hidróxido de cálcio (portlandita) – $Ca(OH)_2$ e outra com as fases do aluminato de cálcio hidratado, apresentadas respectivamente nas equações 6 e 8.



(sulfato de sódio) + (portlandita) (gesso/gipsita)

Reação do Na_2SO_4 com as fases do C_3A (COSTA,2004), equações 7 e 8.



O ataque do sulfato em concentrações inferiores a $1,0g SO^{-2} /L$ caracteriza-se pela produção de etringita, com subsequente deterioração, após o ataque à fase do aluminato de cálcio hidratado. Em grandes concentrações, a reação é com o $Ca(OH)_2$, produzindo gesso e causando aumento de volume (COSTA, 2004).

Souza (2006) descreve os cinco passos do ataque do sulfato de sódio:

- 1) A solução de Na_2SO_4 invade o interior do material cimentício.
- 2) Nas regiões próximas da superfície, forma-se etringita e gipsita. Tais compostos expansivos não geram tensões internas, pois são formados nos vazios da pasta de cimento;
- 3) Ao preencherem os vazios, esgotando a capacidade de acomodação da estrutura da pasta de cimento, inicia-se a geração de tensões internas no material, devido a continuidade de formação de agentes expansivos, que são suportadas pela região inalterada da pasta de cimento.
- 4) A região inalterada quimicamente não suporta mais as tensões de tração geradas pelos compostos expansivos, e inicia um processo de fissuração.
- 5) A solução agressiva de sulfatos continua a adentrar o material pela área fissurada, reagindo com os compostos hidratados da pasta de cimento. Formam-se etringita e gipsita, que tendem a expandir mais.

Tabela 3 – Propriedades físicas dos materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira com abertura de malha de 45 μ m	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$
Índice de atividade pozolânica:			
Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$
Com a cal aos 7 dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa

Crítérios de uniformidade: a massa específica e a finura de amostras individuais não podem ter variação, em relação à média estabelecida em dez ensaios consecutivos, superior a no máximo 5%, em todos os casos.

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2015).

Muitos pesquisadores relatam o índice de atividade pozolânica das cinzas e constataam que está de acordo com os requisitos da NBR 12653. Berenguer et. al. (2020) ainda ressalta que o material pode estar em conformidade quanto aos requisitos químicos, mas as características físicas podem não ser atendidas devido à baixa ou nenhuma porcentagem de material amorfo. Nesse caso, não acontecerá a atividade pozolânica e consequentemente as classes mencionadas anteriormente não serão atendidas.

A CBC que não apresenta nenhum índice de reatividade pode ser utilizada como material de carga inerte no concreto, ou seja, utilizada na substituição parcial ou total do agregado miúdo em matrizes cimentícias (SALES; LIMA, 2010). Isso mostra que, mesmo não utilizando esse material como um composto aglomerante, pode ser feita a utilização com material inerte, fazendo com que haja um destino para as cinzas, já que esse material é utilizado como adubo nas próprias lavouras de cana-de-açúcar. De acordo com Vasconcelos (2010), este destino não é recomendado devido à carga inerte do material, que possui baixa concentração de potássio e em alguns casos se encontram contaminados por metais pesados, apresentando baixo índice de nutrientes para o solo.

3.4 Adição de CBC em cimento

Sessa (2013) constatou que a primeira utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar foi em 1996 e em um estudo coordenado por Freitas, o qual utilizou um material coletado na Unidade Agroindustrial Usina São José, que fica localizada no Município de Campos dos Goytacazes no Rio de Janeiro. O material foi usado para confecção de tijolos de solo-cimento e foi verificado o aumento na resistência à compressão e redução na absorção de água em todos os traços analisados (FREITAS, 1996; SESSA, 2013).

Fernandes et al (2015) avaliou a utilização da cinza da cana-de-açúcar como adição mineral em concreto realizando substituições parciais da cinza ao agregado miúdo. Os resultados obtidos indicaram a possibilidade de realizar substituição parcial devido a durabilidade do concreto ter se mantido com a adição das cinzas

Já Castro e Martins (2016) analisaram a caracterização da cinza pesada e da cinza volante do bagaço de cana-de-açúcar para apontar a possibilidade de substituição da areia e do cimento simultaneamente. Os resultados apresentados mostraram que a cinza pesada apresentou uma característica semelhante à areia, podendo ser uma fonte viável de substituição como material inerte. Quanto à cinza volante, comprovou-se sua reatividade e sua possibilidade de substituir o cimento em determinadas quantidades (CASTRO; MARTINS, 2016).

3.5 Propriedades físicas e mecânicas do concreto com adição da CBC

Fernandes (2014) realizou o teste adicionando 30%, 40% e 50% de CBC e notou que ao aumentar a quantidade de cinzas o concreto no estado fresco tendia a ficar menos trabalhável, o que é explicado devido a cinza absorver maior quantidade de água – explicado pelo seu alto teor de carbono e seu índice de finura. Raniero e Pereira (2018) fizeram a substituição de 2% e de 5% de cimento Portland pela CBC e conforme apresentado na Tabela 4 quanto maior a porcentagem de cinzas presente no concreto menor o resultado do slump test. A classificação C0, C1 e C2 se trata de uma nomeação para os corpos de prova.

Tabela 4 – Resultado Slump Test

	C0 (0% CBC)	C1 (2% de CBC)	C2 (5,5% de CBC)
Slump test (cm)	11,4	10	5,5

Fonte: Raniero e Pereira (2018)

O slump test - também chamado de teste de abatimento do concreto, é um ensaio realizado para definir a característica de consistência do concreto fresco momentos antes da concretagem de um elemento estrutural (vigas, lajes, pilares, etc) (ABNT NBR NM 67, 1998).

É um ensaio para análise do controle tecnológico e de qualidade dos materiais da obra, ou seja, é possível conferir a trabalhabilidade do concreto por meio da consistência obtida e dessa forma, definir se está de acordo ou não com as especificações solicitadas pelo projetista (ABNT NBR NM 67, 1998).

Com isso, quanto mais alto for o resultado do slump test (consistência) do concreto, maior é a facilidade de fazer seu lançamento e adensamento na obra. Os valores de slump test dependem do tipo de concreto e da necessidade de uso. A ABNT NBR 8953:2015 classifica os concretos quanto à consistência conforme é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Consistência de Slump Test e aplicabilidade de concreto conforme NBR 8953

Classe	Abatimento (slump em mm)	Aplicações típicas
S10	$1 \leq A < 5$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$5 \leq A < 10$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$10 \leq A < 16$	Elementos estruturais com lançamento convencional de concreto
S160	$16 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais ou com alta densidade de armaduras

Fonte: Adaptado ABNT NBR 8953 (2015)

Segundo Marques *et al.* (2019), em estudo realizado com cinza de casca de arroz e cinza de bagaço de cana-de-açúcar, os resultados obtidos apresentam semelhanças quanto ao seu comportamento mecânico, tendo em vista os dois tipos de cinza utilizados.

Observa-se que a resistência à compressão das argamassas estudadas é inversamente proporcional ao teor de cinza adicionado. Para os ensaios de absorção as argamassas com maiores teores de cinza, tendem a ser mais permeáveis. Este fato se deve ao crescimento do fator água/cimento com o objetivo de manter a consistência.

Segundo Fernandes *et al.* (2015), os resultados da determinação da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com diferentes combinações de cimento Portland/cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, aos 7 e 28 dias, apresentaram os maiores valores de resistência alcançados pelas combinações C1 (100% de cimento - 0% de cinzas) e C2 (90% de cimento - 10% de cinzas) e o menor valor pela combinação C6 (50% de cimento - 50% de cinzas). O aumento do teor de cinzas, nas diferentes

combinações testadas, provocou uma diminuição significativa na resistência à compressão dos corpos-de-prova confeccionados com cimento Portland/cinzas de bagaço de cana-de-açúcar a partir da incorporação de 30% de cinzas na mistura, em ambas as idades.

CORDEIRO et al. (2004), concluiu que o tamanho das partículas que é dado em função do tempo de moagem deve ser avaliado ao se optar por utilizar o material como aditivo mineral, devido a tendência do material em absorver água quando se está mais fino. Para alcançar o diâmetro médio de $8\mu\text{m}$ são necessários 960 minutos de moagem, mas foi avaliado que ao dobrar o tempo de 480 minutos para os 960 minutos, a redução do tamanho das partículas não possui muito significado. E que a redução do tamanho das partículas e consequente aumento da superfície específica resultou no aumento da atividade pozolânica da cinza.

A resistência à compressão foi analisada segundo valores mais relevantes, onde observou-se a substituição parcial de cimento Portland por CBC nos teores de: 5%, 10%, 20%, 25% e 30%. No

Quadro 2 são apresentados dados descritos de alguns dos trabalhos utilizados.

Quadro 2 - Características físicas das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e características mecânicas do concreto com adição parcial das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar

Referência	Temperatura de obtenção (°C)	Granulometria (µm)	Peso específico (N/m³)	% de CBC	Resistência média (7, 28 e 90 dias) obtida (Mpa)
Filho et al., (2018)	-	150,00	2,64	10%	40,80
Bahudreen & Santhanam (2015)	900	45,00	1,93	5%	36,00
	800		2,03	10%	48,00
	700		2,05	20%	43,00
	600		2,07	25%	40,00
Cordeiro & Kurtis (2017)	800	29,60	2,53	10%	60,00
				25%	58,00
				20%	55,00
Lima (2020)	800	150,00	2,50	10%	54,26
				20%	45,45
				30%	48,41
Sampaio (2014)	900	120,00	2,30	10%	44,00
				20%	40,00
				30%	27,00
Mansaneira et al. (2017)	600	60,00	-	10%	45,00
				20%	41,00
				30%	42,00

Fonte: Autor (2021)

Pode-se observar que em situação com a temperatura variando de 600°C a 800°C e com a porcentagem de substituição parcial do cimento a 10% os resultados obtidos são mais satisfatórios.

Além dessa análise, os autores Marques *et al.* (2019), Fernandes *et al.* (2015) e Arrebola (2013) concluíram que a incorporação da CBC no concreto aumenta a resistência à compressão pelo efeito filler e o incremento dessa resistência é maior com o aumento dos teores de adição da CBC. Os concretos apresentaram uma redução de no mínimo 10% nas propriedades relacionadas à permeabilidade, e observou-se que

mantendo os teores de incorporação em até 30% pode-se aumentar a durabilidade, pois diminui a porosidade total, a absorção, o índice de vazios e aumenta a resistência.

Uma evidência analisada por Sampaio (2014) é que as variedades da CBC influenciaram a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas dos concretos. Foi observada uma alteração na consistência e nos valores de resistência, porosidade, índice de vazios e absorção com a variação dos tipos de CBC.

A utilização das cinzas em substituição parcial do cimento em concretos autoadensáveis de acordo com os ensaios da coluna de segregação mostrou que a fluidez e a pouca viscosidade nos concretos com percentuais de 30% de substituição permaneceram dentro do limite máximo de segregação que seguem a NBR 15823 – Parte 2 (ABNT, 2017) estabelecido pela normativa de ≤ 15 %. Os traços obtidos por Lima (2020) podem ser aplicados em elementos de fundações profundas, pilares, paredes e elementos estruturais complexos e em pré-fabricados.

3.6 Comparação Química das Cinzas do Bagaço da Cana-de-açúcar com o cimento

A composição da CBC estudada em diversas pesquisas foi analisada, conforme o Quadro 3 e comparada na Tabela 5 com os teores da composição química do cimento Portland posposto por Neville & Brooks (2013).

Quadro 3 – Composição química das cinzas obtidas em diferentes estudos

Ref.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2	P_2O_5	MnO	Perda ao fogo
Lima (2020)	30,58	10,67	26,62	1,43	-	1,51	-	-	10,3	1,86	0,34	14,19
Cordeiro & Kurtis, 2017	80,8	5,1	1,6	3,1	-	6,3	-	1,5	0,3	0,8	0,1	0,4
Almeida et al., 2015	80,2	2,6	5,6	1,8	1,6	4	0,2	0,1	1,4	1,4	0,2	0,8
	80,8	2,5	5,8	1,6	1,5	3,9	0,2	0,1	1,3	1,4	0,1	0,7
Bahurudeen et al., 2014	57,63	1,33	1,5	6,14	1,56	7,33	0,22	3,52	-	-	-	21
Arif, Clark & Bindiganavile, 2017	78,6	7,27	3,85	1,28	1,28	1,41	0,7	1,55	-	-	-	-
Gar, Suresh e & Bindiganavile, 2017	69,9	3,34	1,25	2,27	6,68	5,8	1,49	0,4	0,09	6,12	0,1	2,35
Moretti Nunes & Sales, 2018	91,3	2,3	3	0,4	0,2	0,5	-	-	0,9	-	-	1,3
Bahurudeen et al., 2015	75,7	1,52	2,29	6,62	1,87	9,6	0,12	-	-	-	-	5
Filho et al, 2018	97,9	0,3	1,2	0,1	-	0,1	-	-	0,3	-	-	0,1
Maldonado Garcia et., 2018	56,4	14,61	5,04	2,36	1,43	3,3	1,57	-	-	0,85	-	10,53
Subramaniyan & Silvaraja, 2016	76,7	2,13	3,78	5,59	0,92	8,3	0,12	-	-	-	-	5
Arif, 2016	78,5	7,27	3,85	1,28	1,28	1,4	0,7	1,6	-	-	-	-
Cordeiro et al., 2009	78,3	8,55	3,61	2,15	1,65	3,5	0,12	-	-	1,07	0,1	0,42
Cordeiro, Filho & Fairbairn 2009	61	0,09	0,09	5,97	8,65	9	0,7	-	-	8,34	0,5	5,7
Jimenez-Quero et al., 2013	56,4	14,61	5,04	2,36	1,43	3,3	1,57	-	0,96	0,85	0,2	10,53
Frias, Villar & Savastano 2011	69,4	11,26	5,41	2,51	1,28	-	0,09	1,8	1,38	1,61	1,6	1
	56	12,44	6,5	0,84	0,48	-	-	1	2,67	0,98	-	17,98
	66,6	9,46	10,08	1,43	0,92	-	0,22	0,1	2,44	1,04	-	4,27

Fonte: Autor (2021)

Tabela 5 – Comparação da composição química das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e cimento Portland

Óxidos	CBC	Cimento Portland
SiO_2	30,6% - 97,90%	20%
Al_2O_3	0,09% - 14,61%	6%
Fe_2O_3	0,09% - 26,62%	3%
CaO	0,10% - 6,62%	63%
MgO	0,20% - 8,65%	1,50%
K_2O	0,10% - 9,59%	1%
Na_2O	0,09% - 1,57%	1%
SO_3	0,10% - 3,52%	2%
TiO_2	0,09% - 10,3%	0%
P_2O_5	0,80% - 8,34%	0%
MnO	0,06% - 0,48%	0%
Perda ao fogo	0,10% - 21,00%	2%

Fonte: Autor (2021)

Comparativo: Adaptado de CARMO *et al.*, 2019

A pozolanicidade da (CBC) pode ser comparada utilizando como referência aos requisitos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015), conforme dados apresentados na Tabela 2 e 3.

Uma análise comparativa permite observar que os valores mais relevantes são de SiO_2 e CaO. Na composição da CBC, o teor de SiO_2 é muito maior quando comparado ao teor de cimento típico, enquanto o teor de CaO do cimento é muito maior que o da cinza. O alto teor do hidróxido de cálcio confere ao cimento a característica de formar o hidróxido de cálcio quando em contato com a água em temperatura ambiente. O hidróxido de cálcio é o responsável pela formação da pasta aglomerante que é a principal característica física das massas, argamassas e do concreto. Tal análise permite concluir que os teores desses óxidos conferem ao cimento Portland suas qualidades específicas, o que inviabiliza a substituição total do cimento pela CBC.

3.7 Aplicação do concreto com adição de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar

Bessa (2011) utilizou o concreto com a adição de CBC em um projeto urbano na execução de guias urbanas. A análise foi feita utilizando as cinzas em substituição parcial ao agregado miúdo em porcentagens de 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 100%. O estudo foi bem-sucedido e foi verificado que as substituições de 30% e 50% na quantidade

de agregado miúdo geraram resultados satisfatórios quanto a resistência mecânica e durabilidade do material.

Conforme mencionado por Aiticin (2000), do ponto de vista econômico, é interessante substituir parte do cimento por materiais auxiliares cuja granulometria seja muito próxima ou igual à do cimento, pois o preço dos materiais cimentícios auxiliares costuma ser inferior ao do cimento. No caso da CBC, a vantagem econômica é mais destacada, pois o material complementar proposto é um desperdício e não tem outro custo além do transporte, o que pode reduzir o custo de produção do concreto.

A análise da utilização do CBC como substituto parcial do cimento Portland é importante não só do ponto de vista econômico, mas também do ponto de vista ambiental, pois a produção de cimento e o descarte inadequado desses cimentos causam danos à natureza. O uso do CBC no concreto é considerado viável, além dos aspectos ambientais e econômicos, também devem ser considerados os aspectos técnicos, como resistência à compressão do concreto, durabilidade, fluência, retração, reação álcali-agregado, etc. (BESSA,2011)

4 METODOLOGIA CIENTÍFICA

Para avaliar o beneficiamento dessa produção de cinzas da cana-de-açúcar do estado de Goiás, o estudo foi realizado em duas etapas, pelas quais foram abordados os aspectos quantitativos e qualitativos. Os dados utilizados para pesquisa bibliográfica em todas as etapas foram extraídos de livros, artigos de periódicos, materiais disponíveis na internet, legislações e bancos de dados disponibilizados por órgãos públicos.

Na primeira etapa, foi feita a coleta e a análise de dados obtidos por experimentos realizados por diversos pesquisadores, onde foram obtidos resultados físicos, químicos e mecânicos do concreto com a substituição parcial do cimento pela CBC. Na segunda etapa, foi realizado um tipo de pesquisa denominado estudo de caso, pois verificou-se a problemática que a produção de cimento apresenta, após uma busca em literaturas existentes. Nesse tópico, foram detalhados os dados obtidos e posteriormente os procedimentos adotados para minimizar esses impactos, apresentando solução no âmbito econômico e ambiental.

Os dados utilizados foram obtidos de literatura e fornecidos pela Usina de Açúcar e Álcool Denusa - Destilaria Nova União S/A, que é uma empresa do setor sucroenergético que fica localizada na rodovia BR 060 km 274, Faz. São Pedro, Jandaia, GO (Figura 2).



Figura 2 – Denusa – Destilaria Nova União S/A

Fonte: <https://www.denusa.com.br/> (2021).

Na safra de 2020/21 a Denusa produziu um total de 1.313.910,84 toneladas de cana de açúcar. Conforme informações do supervisor de moenda, foi gerado um total de 9.178,93 toneladas de cinzas de bagaço de cana de açúcar no ano de 2020. Na usina, todo o bagaço é queimado em caldeiras que variam entre temperaturas de 800 a 900 °C que estão dentro da média das temperaturas onde foram obtidos os melhores resultados conforme o

Quadro 2. Nas figuras apresentadas a seguir podem ser observadas imagens das caldeiras (Figura 3 e 4), do bagaço moído (Figura 5), e das cinzas da cana de açúcar (Figura 6 e 7) pertencentes à usina estudada.



Figura 3 – Caldeiras DENUSA

Fonte: Autor (2021)



Figura 4 – Caldeira DENUSA

Fonte: Autor (2021)



Figura 5 – Bagaço da cana de açúcar safra 2020/21

Fonte: Autor (2021)



Figura 6 – Cinzas Bagaço da cana de açúcar safra 2020/21

Fonte: Autor (2021)



Figura 7 – Cinzas Bagaço da cana de açúcar safra 2020/21

Fonte: Autor (2021)

Para análise da aplicabilidade da CBC no concreto, analisou-se a quantidade de cimento utilizado em construções de casas convencionais térreas e de até 150m². Além disso, foi considerada a substituição de 10% de todo cimento necessário por CBC. Esse valor foi adotado porque, de acordo com os estudos prévios analisados, nessa proporção

foram encontrados os melhores resultados de resistência mecânica e trabalhabilidade, além das composições químicas mais próximas do concreto apenas com Cimento Portland.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o Supervisor de Moenda da usina DENUSA, a empresa produz uma quantidade de bagaço de cana-de-açúcar de 264,7 quilogramas por cada tonelada de cana moída. Dessa forma, tem-se (Equação 9):

$$264,7 \frac{\text{kg}}{\text{tonelada}} * 0,001\text{tonelada (Equação 9)}$$

0,267 tonelada de bagaço gerado a cada tonelada de cana-de-açúcar

Considerando a produção de cana da safra 2020/2021, obteve-se a quantidade de bagaço gerado pela equação 10.

$$1.313.910,84 * 0,2647 = 347.792,2 \text{ toneladas de bagaço de cana-de-açúcar} \\ \text{(Equação 10)}$$

Em relação à utilização da CBC para substituição do cimento na produção de concreto, é importante definir um valor base de um traço do produto, para auxiliar a mensuração dos resultados obtidos. O traço do concreto nada mais é do que a proporção de todos os materiais que vão compor sua massa. Quando se tem um traço base, pode-se utilizar esses dados da quantidade de cinzas e substituir pela parcialidade de cimento que deseja retirar da mistura.

De acordo com Barboza (2014), para se obter um concreto com fck (resistência característica do concreto à compressão) de 25 Mpa após os 28 dias de idade, o traço a ser utilizado deve conter para cada quilograma de cimento a seguinte proporção:

1 kg de cimento: 3,85 kg de areia: 3,66 kg de britas e 0,85 na relação água/cimento.

Da mesma forma, contudo alterando as proporções para se obter 1 metro cúbico (m³) de concreto, tem-se um traço de:

292 kg de cimento: 906 kg de areia: 904 kg de britas e 190 kg de água: 4,4 kg de aditivo.

Após a definição do traço, foi preciso determinar dois pontos importantes. Primeiro, qual a metragem quadrada das residências utilizadas e, segundo qual a porcentagem de cimento Portland seria substituída pela CBC.

Em Goiás, são muito populares as construções de “meio lote”, sejam construções já feitas para venda ou com o intuito de ocupação para moradia. Geralmente, essas construções variam entre 70 m² a 150 m², portanto, foi utilizado como base para o desenvolvimento do estudo de caso o valor de 150 m² de área construída. Contudo, é importante validar que os resultados obtidos podem impactar em qualquer metragem de área construída. Outro dado importante é a quantidade de concreto que se utiliza para executar uma construção com essa metragem. De acordo com informações obtidas no escritório de Arquitetura e Engenharia Arte Studio, localizado na cidade de Rio Verde – GO, em uma construção de 150 m² estima-se um consumo em torno de 25 m³ de concreto para execução de todos os elementos estruturais.

No tocante à porcentagem de CBC utilizada, foi considerada a substituição parcial de 10% de cimento Portland. Essa definição se deu pelo fato de que os concretos que foram executados com essa porcentagem apresentaram resultados mais expressivos quanto à resistência mecânica e características físicas e químicas semelhantes ao concreto convencional, de acordo com os estudos prévios levantados, conforme mencionado anteriormente.

Com base nessas considerações adotadas para o delineamento do presente estudo de caso, obteve-se a quantidade de cimento requerida nessas construções, conforme a Equação 11.

$$\frac{292 \text{ kg de cimento}}{1 \text{ m}^3 \text{ de concreto}} * 25 \text{ m}^3 \text{ de concreto} = 7300 \text{ kg de cimento (Equação 11)}$$

Nesse cálculo, foi utilizada a quantidade de cimento presente em 1 m³ de concreto obtido pela traço adotado. Logo após, foi feita a multiplicação dessa quantidade de cimento no total de concreto que é utilizado para uma construção com esse porte.

Como adotou-se 10% de CBC para substituição do cimento, tem-se a quantidade de cinzas que poderia ser utilizada por obra obtida de acordo com a Equação 12.

$$7300 \text{ kg de cimento } 10\% = 730 \text{ kg de CBC por obra (Equação 12)}$$

Ou seja, em construções residenciais de 150 m², cujo consumo de cimento corresponderia à 7300 kg, 730 kg destes poderiam ser substituídos por CBC. Como cada saco de cimento possui 50 kg, tem-se aproximadamente a economia de 15 sacos de cimentos na construção dessa obra. Na cidade de Rio Verde – GO, o preço médio do saco de cimento Portland, quando comprado em lote, está em torno de R\$ 26,50. Dessa forma, a substituição parcial por CBC geraria uma economia de aproximadamente R\$ 400,00 de custo para a obra.

Ao considerar toda a geração de cinzas de bagaço de cana de açúcar produzidas na safra 2020/21 pela usina foco do estudo, 9.178,93 toneladas, mantendo a quantidade de substituição de 10%, estima-se a quantidade de obras que poderiam ser atendidas, conforme a Equação 13.

$$\frac{9.178.930 \text{ kg de CBC (total)}}{730 \text{ kg de CBC por obra}} \cong 12.574 \text{ obras (Equação 13)}$$

Portanto, a utilização de toda CBC produzida na referida safra com a finalidade de substituição parcial na produção de concreto, corresponderia a uma economia de aproximadamente 183.580 sacos de cimentos, ou seja, um valor de R\$ 4.864.880,60, que deixariam de ser gastos com cimento.

Os valores obtidos demonstram a relevância econômica da destinação do resíduo produzido pela usina por sua utilização no setor da construção civil. Ademais, vale salientar os aspectos ambientais da redução da utilização do cimento. Como citado na introdução, a produção de cimento tem um grande impacto ambiental devido sua geração de CO_2 e, de acordo com Felix (2018), a produção de cimento é responsável por aproximadamente 5% das emissões mundiais de CO_2 . Dessa forma, efetuar a substituição parcial do cimento Portland pela CBC trás inúmeros benefícios para a sociedade.

Sessa (2013) fez uma análise quantitativa da diminuição de CO_2 na substituição parcial no Cimento Portland por CBC em teores de 40% e 10% em construções residenciais de baixo impacto. O foco da sua pesquisa foram construções contando com 42m² e foi constatado que para uma substituição de 10% há uma diminuição de 3,4% na quantidade de CO_2 produzido. Levando-se em conta que em uma construção de pequeno porte já há um ganho ecológico considerável, esse benefício poderá ser ainda maior em obras mais amplas, cujo consumo de concreto certamente é mais elevado.

6 CONCLUSÃO

Há uma necessidade de otimizar o consumo dos recursos naturais, pois o volume de resíduos industriais são uma ameaça ao equilíbrio ambiental. Como abordado, a indústria da construção civil é uma grande responsável pela poluição do planeta, visto o elevado índice de CO_2 lançado na atmosfera na produção de cimento Portland, além dos resíduos processados diariamente.

Dessa forma, procurou-se efetuar um levantamento de diversas pesquisas onde foi usada a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland na produção de concretos. Assim, verificou-se por meio de dados e resultados se o concreto produzido com a adição suplementar da CBC pode causar menor impacto ambiental para a sociedade.

Foi percebido que ao se substituir 10% da quantidade de cimento por CBC, os resultados são satisfatórios ao se analisar resistência mecânica, trabalhabilidade e características físicas e químicas. Nesse caso, concluiu-se que a cinza pode ser utilizada como uma adição mineral suplementar ao cimento.

Para se comprovar o ganho ecológico e econômico pelo uso da CBC, foi elaborado um estudo de caso utilizando como referência uma construção de 150 m², onde foi considerada a substituição de 10% de cimento pela CBC. A economia obtida foi relevante em relação à diminuição do consumo de sacos de cimentos, o que traz, além de vantagens econômicas, benefícios ambientais pela possibilidade de redução da emissão de CO_2 associada à produção de cimento, e pela destinação final ambientalmente adequada para o resíduo gerado pelo beneficiamento da cana-de-açúcar.

Diante dos objetivos traçados no início do trabalho e as conclusões acima, pode-se afirmar que a pesquisa desenvolvida traz contribuições no âmbito da construção sustentável, indicando que as cinzas produzidas com bagaço de cana-de-açúcar são viáveis ao emprego como aditivo mineral para concreto e, possibilitam agregar benefícios ambientais a este importante material de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____. NBR 12653: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.
- _____. NBR MN 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- _____. NBR MN 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- AÏTICIN, P. C. Concreto de Alto Desempenho. São Paulo: PINI. 2000. 667p.
- AKSOGAN, O.; BINICI, H.; ORTLEK, E. Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 253- 263, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro: ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, 1998.
- BARBOZA, Marcos R. Traços de concreto para obras de pequeno porte. Bauru: Unesp, 2014.
- BERENGUER, R. A.; CAPRARO, A. P. B.; MEDEIROS, M. H. F.; CARNEIRO, A. M. P.; OLIVEIRA, R. A. Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of portland cement: effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. **Revista Journal of Environmental Chemical Engineering**. V. 8, p. 1-7. Amsterdam, Países Baixos, 2020.

BESSA, S. A. L. **Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana**. 2011. 181 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

BOLOGNINI, H. Caracterização química e físico-mecânica de cimentos com adições de fíller calcário. v.5, p. 1 – 13, 2015.

BORJA, E. V. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

CABRAL, Stênio Cavalier. Materiais alternativos para adição ao cimento portland. **Revista vozes dos vales, Diamantina**, v. 10, n. 1, p. 2-2, 2016.

CARMO, M. E. R. Concreto com incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Tocantins: **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 07, n. 2, 2019.

CASTALDELLI, V. N. **Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar**. 2013. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista. São Paulo: Ilha Solteira, 2013

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 485 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe/ufRJ, Rio de Janeiro, 2006.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do upv**. Belo Horizonte, 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2004

DE PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento portland**. 77 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006

FELIX, E. F. Balanço das emissões e da captura de CO₂ em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v.11, n1 p 1 – 14, 2018.

FERNANDES, S. E; TASHIMA, M. M; MORAES B. C; ISTUQUE, B. D; FIORITI, F. C; MELGES, P. J. L; AKASAKI, L. J. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (cbc) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Revista Matéria**, v.20 N.04 p 1 - 15, 2015.

FERNANDES, S. E. **Concreto com adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

FERREIRA, R. T. L. **Influência da requeima na pozolanicidade de cinzas de bagaço da cana-de-açúcar de diferentes características**. 2015. 64 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias.html> . Acesso em: jun. / 2020.

LIMA, Karen Lopes. **Estudo da viabilidade técnica do concreto autoadensável com aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. 2020. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, Rio Verde, 2020.

LIMA, S. A.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; MORETTI, J. P.; PORTELLA, K. F. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, p. 201-212, 2011

LONDERO, C. **Valorização da cinza da casca de arroz com aplicação no concreto**. 2017. 43 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2017.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MANSANEIRA, E. C; SCHWANTES N; BARRETO, F. G; TORALLES, M. B. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic material. *Dyna rev.fac.nac. minas, Medellín*, v. 84, n. 201, p. 163-171, Junte 2017.

MARQUES, Landson Soares. Avaliação da resistência à compressão do concreto utilizando a cinza de rejeitos da agroindústria. **Revista Salvador: Científico**. V. 19, N. 40, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOLIN FILHO, R. G. D. Estudo das resistências à compressão e tração de concreto autoadensável com cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Maringá: **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, 2018.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini, ed. 2, Porto Alegre: Bookman, 2013

PÁDUA, P. G. L. **Desempenho de compósitos cimentícios fabricados com cimentos aditivados com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar in natura e beneficiadas**. 2012. 209 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia, Minas Gerais, 2012.

A. M. Pereira; C. C. Assunção; L. de M. Guimarães; J. A. Malmonge; M. M. Tashima; J. L. Akasaki. Análise microestrutural do potencial das cinzas de bagaços de cana-de-açúcar como material pozolânico em compósitos cimentícios. **In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Natal: 22° CBECiMat, 2016.

RANIERO, J. A.; PEREIRA, J. A. Análise da resistência do concreto com a substituição do traço de cimento pelo composto de cinza e bagaço de cana-de-açúcar. Naviraí: II Encontro Internacional de Desenvolvimento e Inovação, 2018.

ROSELLÓ, J.; SORIANO, L.; SANTAMARINA, M. P.; AKASAKI, J. L.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Rice straw ash: a potencial pozzolanic supplementary material for cementing systems. **Revista elsevier industrial crops and products**. v. 103, p. 39-50. Amsterdam, Países Baixos, 2017.

SAMPAIO, Z. L. M. Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v4 n1 p 8 - 16, 2014.

SESSA, Thiago da Cruz. **Avaliação da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concreto usando construções residenciais de menor impacto**. 2013. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

SILVEIRA, D. A. **Influência da substituição parcial do cimento portland pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual no concreto**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO - SNIC. Disponível em: <http://snic.org.br/> Acesso em: jun./2020.

VASCONCELOS, M. C. A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físico**. 2013. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

WANG, D.; ZHOU, X.; MENG, Y.; CHEN, Z. Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. **Construction and building materials**, v. 147, p. 398-406, 2017.