

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Gestão e Avaliação da**  
**Construção Civil**

Gabriel Paiva Ribeiro

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NO CONCRETO: Uso do**  
**Bagaço de Cana-De-Açúcar**

Belo Horizonte  
2024

Gabriel Paiva Ribeiro

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NO CONCRETO: Uso do  
Bagaço de Cana-De-Açúcar**

Monografia de especialização apresentada ao curso de Especialização em Gestão e Avaliação da Construção Civil do departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Danielle Meireles de Oliveira

Belo Horizonte  
2024

R484u	<p>Ribeiro, Gabriel Paiva.  Utilização de resíduos agroindustriais no concreto [recurso eletrônico]  : uso do bagaço de cana-de-açúcar / Gabriel Paiva Ribeiro. – 2024.  1 recurso online (56 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Danielle Meireles de Oliveira.</p> <p>Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Gestão e  Avaliação da Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG.</p> <p>Bibliografia: f. 54-56.</p> <p>1. Construção civil. 2. Resíduos agroindustriais. 3. Bagaço de cana.  4. Concreto. 5. Resistência à tração. I. Oliveira, Danielle Meireles de.  II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.  III. Título.</p>
	CDU: 69



## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: GABRIEL PAIVA RIBEIRO

MATRÍCULA: 2020722075

### RESULTADO

Aos 21 dias do mês de junho de 2024 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:  
"UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NO CONCRETO: USO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR"

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: 85

CONCEITO: B

### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Danielle Meireles de Oliveira

Nome

Danielle Meireles de  
Oliveira:04897576695

Assinado de forma digital por  
Danielle Meireles de  
Oliveira:04897576695  
Dados: 2024.06.21 14:37:35 -03'00'

Assinatura

Documento assinado digitalmente



SIDNEA ELIANE CAMPOS RIBEIRO  
Data: 21/06/2024 14:38:31-0300  
Verifique em <https://validar.br.gov.br>

Prof. Dr. Sidnea Eliane Campos Ribeiro

Nome

Assinatura

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E AVALIAÇÕES NAS CONSTRUÇÕES"

Belo Horizonte, 21 de junho de 2024

Antônio Neves  
de Carvalho  
Júnior

Assinado de forma  
digital por Antônio  
Neves de Carvalho Júnior  
Dados: 2024.06.28  
09:47:25 -03'00'

Coordenador do Curso

## RESUMO

A indústria cimenteira, com o processo produtivo do cimento, e a agroindústria, com a produção e eliminação de toneladas de resíduos, têm sido responsáveis pelo agravamento das emissões de poluentes, e resíduos, contribuindo para a poluição global. Haja vista a necessidade de se pensar sobre sustentabilidade, e novas alternativas para utilização e reutilização de materiais na construção civil, realizou-se uma revisão bibliográfica, utilizando a abordagem qualitativa, visando compreender acerca da utilização de resíduos agroindustriais no concreto, em especial, das cinzas provenientes do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA). Foram utilizados artigos científicos, dissertações, monografias e trabalhos de conclusão de curso, em língua inglesa e portuguesa, publicados nos bancos de dados da CAPES e sites governamentais que respondiam à questão. Verificou-se, no decorrer da pesquisa, que a adição de CBCA pode melhorar a resistência à compressão e à tração do concreto. No entanto, também foram encontrados resultados negativos em relação ao ganho de resistência das características mecânicas do concreto, indicando a necessidade de estudos mais aprofundados. Conclui-se que o CBCA possui potencial para reduzir o descarte de resíduos agroindustriais e contribuir para a produção de um concreto mais sustentável, mas sua eficácia deve ser investigada de maneira mais detalhada.

Palavras-chave: Resíduos Agroindustriais; Bagaço de Cana-de-Açúcar; Concreto; Ensaio de Tração; Ensaio de Compressão.

## **ABSTRACT**

The cement industry, with its cement production process, and the agro-industry, with its production and disposal of tons of waste, have been responsible for worsening emissions of pollutants and waste, contributing to global pollution. In view of the need to think about sustainability and new alternatives for the use and reuse of materials in civil construction, a literature review was carried out using a qualitative approach to understand the use of agro-industrial waste in concrete, especially ash from sugarcane bagasse (CBCA). Scientific articles, dissertations, monographs and course completion papers, in English and Portuguese, published in CAPES databases and government websites that answered the question were used. It was verified, in the course of the research, that the addition of CBCA can improve the compressive and tensile strength of concrete. However, negative results were also found in relation to the strength gain of the mechanical characteristics of the concrete, indicating the need for more in-depth studies. It is concluded that the CBCA has the potential to reduce the disposal of agro-industrial waste and contribute to the production of a more sustainable concrete, but its effectiveness should be investigated in more detail.

Keywords: Agro-industrial waste; Sugarcane Bagasse; Concrete; Tensile Tests; Compression Tests.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de Cimento .....	20
Figura 2: Tipos de Resíduos de Cana.....	22
Figura 3: Proporção de Cinzas do Bagaço de Cana de Açúcar. ....	23
Figura 4: Resultados dos Ensaios de Compressão.....	26
Figura 5: Resultados dos Ensaios de Tração.....	26
Figura 6: Resultados dos ensaios de compressão .....	29
Figura 7: Resultados dos ensaios de tração. ....	30
Figura 8: Resultados dos ensaios de compressão e tração.....	31
Figura 9: Resultados dos ensaios de compressão.....	32
Figura 10: Resultados dos ensaios de compressão.....	35
Figura 11: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.....	36
Figura 12: Resultados dos ensaios de compressão.....	37
Figura 13: Resultados dos ensaios de tração. ....	38
Figura 14: Resultados dos ensaios de compressão.....	39
Figura 15: Resultados dos ensaios de tração. ....	40
Figura 16: Resultados dos ensaios de compressão.....	41
Figura 17: Resultados dos ensaios de tração. ....	41
Figura 18: Resultados dos ensaios de compressão.....	42
Figura 19: Resultados dos ensaios de compressão.....	43
Figura 20: Resultados dos ensaios de compressão.....	44
Figura 21: Resultados dos ensaios de compressão.....	45
Figura 22: Resultados dos ensaios de compressão.....	46
Figura 23: Resultados dos ensaios de compressão.....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/Ag - Água/Aglomerante

A/C - Água/Cimento

AR - Antes da Requeima

Ca(OH)<sub>2</sub> - Hidróxido de Cálcio

CR - Concreto de Referência

IAP - Índice de Atividade Pozolânica

MC - Concreto Controle

PR - Após a Requeima

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACBC - Areia da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CBCA - Cinzas do Bagaço da Cana-de-Açúcar

CC – Concreto Convencional

CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono

CP - Cimento Portland

CP-30-R - Cimento Portland Comum

CPI - Cimento Portland Comum

CPII - Cimento Portland Composto

CPII-E-32 - Cimento Portland Composto com Escória Granulada de Alto-Forno

CPII-F-32 - Cimento Portland Composto com Material Carbonático

CPII-Z-32 - Cimento Portland Composto com Pozolana

CPV-ARI - Cimento Portland V - Alta Resistência Inicial

CSH - Silicato de Cálcio Hidratado

ETC - Concretos Ternários Ecológico

F<sub>ck</sub> - Resistência Característica do Concreto à Compressão

GGBS - Escória Granulada de Alto-Forno Moída

Gt - Gigatonelada

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MPa - Mega Pascal

NBR - Normas Brasileiras Regulamentadoras

OPC - Cimento Portland Ordinário

RHA - Cinza de Casca de Arroz



SF - Sílica Ativa

SNIC - Sindicato Nacional da Industria do Cimento

SMC - Materiais Cimentícios Suplementares

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	9
CAPÍTULO 1: RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS .....	11
1.1 Aspectos dos Resíduos Agroindustriais.....	11
1.2 Aspectos gerais da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	14
1.3 Utilização da CBCA no concreto.....	15
CAPÍTULO 2: METODOLOGIA.....	18
CAPÍTULO 3: RESULTADOS.....	19
3.1 Tipos de Cimento Utilizados .....	19
3.2 Resíduos de Cana-de-Açúcar Utilizados .....	21
3.3 Proporção das Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar.....	22
3.4 Ensaios de Compressão e Tração.....	24
CAPÍTULO 4: DISCUSSÃO .....	48
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

## INTRODUÇÃO

A indústria do cimento produz atualmente cerca de 7% das emissões mundiais de dióxido de carbono. Este processo produtivo é responsável pelo agravamento das emissões de poluentes e tem levado ao aumento da intensidade das investigações de impacto em todo o mundo. O Brasil é um dos países que apresentam uma baixa participação na emissão de CO<sub>2</sub> com participação de cerca de apenas 2,6%, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019).

Dado este cenário, onde o concreto contribui para a poluição global, é necessária uma nova perspectiva sobre a sustentabilidade. Aliado a este conceito, a utilização e reutilização de materiais e seus resíduos torna-se inevitável.

Neste contexto, a indústria cimenteira tem vivido mudanças e evoluções na sua perspectiva nos últimos anos. Segundo o SNIC (2019), a indústria cimentícia vem buscando a sustentabilidade em sua caminhada, e procura conciliar suas atividades com a preocupação em ajudar a sociedade e a proteção com o meio ambiente. Esse compromisso da indústria do cimento vem se fazendo presente com a procura de novas alternativas a fim de intensificar o uso de matérias-primas, resíduos agroindustriais e combustíveis alternativos, até a redução do consumo energético de produção e das emissões de CO<sub>2</sub>.

A aplicação dos resíduos agroindustriais no concreto pode gerar a possibilidade de redução nos impactos causados no meio ambiente, pois o uso dos resíduos agroindustriais também implica em uma destinação mais politicamente correta, já que a grande maioria dos resíduos não teriam utilização e seriam descartados no meio ambiente. Vale ressaltar que, com a aplicação destes resíduos, tem-se a redução, por consequente, no consumo de cimento, ajudando assim a diminuir os índices de emissões de CO<sub>2</sub> na produção do concreto. A adição de resíduos agroindustriais também tem como função promover melhorias no despenho do concreto.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), apenas em 2022 foram produzidas mais de 724.428.135,00 toneladas de cana de açúcar no Brasil, este volume é utilizado nas indústrias em diversos seguimentos, gerando um alto volume de resíduos agroindustriais. Segundo estudos da FIESP/CIESP (2001),

para cada tonelada produzida de cana-de-açúcar é gerado cerca de 260 kg de resíduo seco de bagaço, assim apenas em 2022 o Brasil produziu cerca de 2.786.262,00 toneladas de biomassa.

A mistura de novos componentes ao concreto depende de vários fatores como viabilidade financeira ou resultado positivo nos ensaios laboratoriais. Um dos resíduos mais promissores na atualidade, que vem sendo estudado, é a adição de cinzas provenientes do bagaço da cana-de-açúcar. Diante disso surgiu o questionamento: a aplicação de resíduos agroindustriais como cinzas provenientes do bagaço da cana de açúcar pode aprimorar características primárias do concreto?

Tendo em vista tal questionamento, o presente trabalho busca através de uma revisão bibliográfica compreender o que são os resíduos agroindustriais, assim como aspectos gerais do uso das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar como composto da mistura ao concreto. Ainda, abordará uma breve análise sobre a resistência da força de compressão e tração entre o concreto e o concreto com adição de Cinzas do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA).

Por fim, o presente trabalho justifica-se, a princípio, pela relevância ao demonstrar a implicação acadêmica, no que tange aos assuntos diretamente ligados ao uso de resíduos agroindustriais no concreto e como ele pode ser inserido no cenário atual da construção civil, sendo assim, a utilização do CBCA no concreto torna-se extremamente relevante, já que o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, desta maneira a utilização do CBCA apresenta características positivas em relação ao concreto, gerando assim uma atratividade para novos estudos e pesquisas desta mistura com o intuito de entender melhor sua viabilidade financeira e seus pontos positivos no mercado da construção civil.

E, na medida em que propõe reflexões que promovem o desenvolvimento do pensamento crítico a respeito da poluição gerada pelo concreto, o estudo apresenta alguns resíduos agroindustriais com o intuito de melhorar as condições naturais do concreto e por seu conseqüente reduzir índices de emissão de CO<sub>2</sub>, consumo energéticos e uma destinação adequada de alguns resíduos agroindustriais.

## **CAPÍTULO 1: RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS**

O capítulo 1 trará uma revisão bibliográfica no qual abordará quais são os aspectos gerais dos resíduos agroindustriais, assim como demonstrar os aspectos gerais da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e como poderia ser utilizado o CBCA no concreto.

### **1.1 Aspectos dos Resíduos Agroindustriais**

A agroindústria é a mescla de atividades relacionadas à transformação de matérias-primas da agricultura, pecuária aquicultura ou silvicultura. Cada uma destas matérias-primas abrem um novo seguimento para agroindústria que tem suas variações de acordo com os insumos/produtos a serem fornecidos ao consumidor (Vaz Junior, 2020).

A agroindústria tem o objetivo de transformar matéria-prima através de um ambiente físico equipado, mantendo suas características originais ou melhorando-as, como um aumento no prazo de validade sem reduzir a qualidade. Assim, de forma resumida a agroindústria é o processo de industrialização de produtos do setor agrícola (Vaz Junior, 2020).

Os resíduos gerados pela agroindústria são provenientes da produção agrícola do campo e da indústria, no qual ambos, por meio de vários processos são responsáveis pela produção de produtos, como frutas, carne, vegetais, laticínios, etc., produtos estes responsáveis pela produção de resíduos agroindustriais, resíduos de culturas e resíduos de frutas e vegetais (Yaashikaa, 2021).

Ainda, o setor alimentar, tal como a indústria agrícola, é responsável pela geração de resíduos multicomponentes durante os processos de produção, gerando biomassa através de métodos de tratamento, processamento e eliminação. A quantidade de resíduos gerados nestes setores depende das características das matérias-primas utilizadas, da finalidade do produto final e do tipo de produto obtido (Nayak; Bhushan, 2019).

Em suma, os resíduos agroindustriais, podem ser descritos como biomassa residual, que é uma parcela de matérias-primas que não são utilizadas em processos

de industrialização, tais como: cascas de vegetais e frutas, bagaço de cana-de-açúcar, caroço de açaí, dentre outros.

A maioria destes resíduos apresentam origens agrícolas e grande heterogeneidade devido à complexidade química da biomassa vegetal, tornando as matérias-primas numa variedade de produtos finais, tais como: produção de energia, alimentos, produtos químicos e materiais (Vaz Junior, 2020).

Vale ressaltar também que a indústria gera todos os anos grandes quantidades de resíduos e águas residuais. Para colocar em perspectiva a escala da produção agrícola, os números mais recentes estimam que a produção agrícola global é de aproximadamente 7,26 Gt e a quantidade de resíduos secos pode atingir cerca de 140 Gt, uma quantidade muito grande que poderá constituir um grave problema ambiental. Contudo, graças a novas estratégias, políticas públicas e tecnologias adequadas, o passivo ambiental resultante da produção destes resíduos pode ser reduzido (Vaz Junior, 2020).

Considerando os grandes volumes de resíduos sendo produzidos pela agroindústria, se fez necessária a criação de políticas públicas para uma melhor destinação, fiscalização e reutilização. Isto porque, sem este controle podem surgir questões significativas de passivos ambientais em relação à sua disposição e produção, já que a decomposição de alguns destes resíduos podem agredir o solo, gerar novos poluentes, dentre outros problemas.

No Brasil atualmente tem-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos que tem como características apresentar:

Princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluída os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010, p. 1).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos é considerada uma ferramenta fundamental para a destinação dos resíduos agroindustriais, atrelado a isto tem-se a busca constante pela sustentabilidade em todos os meios da indústria, comércio e construção, intensificando novos estudos e investimentos tecnológicos para reaproveitamento e melhor destinação destes resíduos.

Apesar dos avanços significativos no que compete às políticas públicas de aproveitamento dos resíduos e aos incentivos científicos para pesquisa e nova destinação dos mesmos. Ainda assim, a utilização dos resíduos agroindustriais é um problema para as indústrias do agronegócio.

A construção civil é uma das principais indústrias mundiais e tem como um de seus principais insumos o Cimento Portland, porém a produção e uso apresentam altos índices de emissão de CO<sub>2</sub>. Sabe-se que a emissão de gás carbônico é bastante prejudicial ao meio ambiente e vem causando uma considerável contribuição para o aumento do efeito estufa mundialmente.

O Brasil produziu aproximadamente 39.496.264 toneladas de Cimento Portland, conforme dados do SNIC (2023). Levando em consideração que cerca de 90% das emissões de CO<sub>2</sub> são resultantes do processo de fabricação, a incorporação de resíduos agroindustriais se mostra uma abordagem interessante, já que utiliza resíduos já existentes na indústria e, conseqüentemente, contribui para a redução na produção de Cimento Portland.

Em busca de reduzir os índices de consumo de Cimento Portland, a indústria da construção civil vem investindo em estudos que possam viabilizar uma mistura com as mesmas características ou superiores ao concreto convencional. Nas últimas décadas a construção civil conseguiu, através de estudos, ensaios e pesquisas, indicadores positivos para obtenção da redução por meio do uso de resíduos agroindustriais, o que, além de ajudar na redução de consumo, propicia um novo destino para estes resíduos que em sua maioria não apresentam um destino final utilizável.

Decorrente da variedade das características dos resíduos agroindustriais à construção civil vem utilizando alguns resíduos e intensificado seus estudos com o intuito de encontrar soluções para o desenvolvimento de um concreto sustentável e com melhores desempenhos.

Alguns estudos utilizam os resíduos agroindustriais como possível aditivo ou como substituto parcial do cimento, por exemplo o uso do bagaço de cana de açúcar, cinza de casca de arroz, cinzas ou caroços de açaí, coco babaçu, sisal, carvão vegetal

dentre outros, compostos que podem ser utilizados na mistura do concreto (FIESP/CIESP, 2001).

Resíduos agroindustriais, como as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, vêm sendo estudados como aditivos ao concreto. Nesse sentido, a indústria da construção tem grande potencial para combinar este composto ao concreto já que nos estudos prévios, o mesmo apresenta resultados positivos em relação às características base/principais do concreto.

## **1.2 Aspectos gerais da cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

Segundo estudos da FIESP/CIESP (2001), para cada tonelada de bagaço de cana-de-açúcar gerado, se produz aproximadamente 24 kg de cinza, somente em 2022 foram produzidas aproximadamente 2.786.262,00 toneladas de biomassa conforme a safra de cana de açúcar produzida em 2022. Conforme estes indicadores este volume seria de aproximadamente 116.094,00 toneladas de cinzas provenientes do bagaço da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar, usada na geração do CBCA, passa por diversos processos, desde o plantio até a queima para produção de etanol. O bagaço, obtido após a extração do caldo, tem múltiplos destinos, como fabricação de painéis, etanol de segunda geração, fertilizante e artesanato. Apesar das diversas finalidades, ainda há um alto volume de biomassa sem destino final, podendo ser queimado para gerar o CBCA.

As indústrias sucroalcooleiras produzem dois tipos de cinzas. As cinzas pesadas são provenientes das caldeiras das usinas, apresentam baixa reatividade, pois durante a queima possuem baixa perda ao fogo e em sua composição alto teor de quartzo (sílica cristalina). As cinzas leves são oriundas dos filtros de chaminés, possuem alta reatividade e perda ao fogo, decorrente da alta taxa de sílica amorfa (Moretti, 2018).

O CBCA possui alta porcentagem de dióxido de sílica com taxas normalmente acima dos 60% de sua composição química, no qual após o processo de queima suas cinzas apresentam um alto teor de sílica que são provenientes basicamente de duas



fontes: raízes de cana-de-açúcar na forma de monossílcio ( $H_4SiO_4$ ) e areia de quartzo proveniente da lavoura (Barboza Filho e Prabhu, 2002 apud Ferreira, 2015).

De acordo com Pádua (2012) e Cordeiro (2006), a qualidade da cinza está diretamente ligada ao processo de queima, uma vez que a temperatura de combustão do material irá determinar a formação de fases amorfas ou cristalinas da sílica contida na cana. Diversos são os fatores que influenciam a composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar: o tipo de cana cultivada, o uso de fertilizantes e herbicidas, o tipo de solo, o período e modo de cultivo, a finura da cinza, o processo de colheita e condições de queima do bagaço (Ferreira, 2015, p. 22).

Na Tabela 1 apresenta-se os diferentes níveis de temperaturas no processo de queima podem influenciar na formação das fases amorfas ou cristalinas da sílica do CBCA.

Tabela 1: Impacto das temperaturas nas propriedades do CBCA

Temperatura de queima do bagaço de cana-de-açúcar (°C)	Modificações ocorridas durante o processo de queima do bagaço
< 100°	Inicialmente, a perda de massa ocorrida à temperatura até 100° C resulta da evaporação da água absorvida.
> 350°	A cerca de 350° C inicia a ignição do material mais volátil. Dando início a queima do bagaço da cana-de-açúcar.
400° < T < 500°	Entre 400 e 500° C, o carbono residual é oxidado, sendo neste estágio observada a perda mais substancial da massa. Após esta etapa a cinza torna-se rica em sílica amorfa.
> 700°	O emprego de temperaturas acima de 700° C pode levar a formação de quartzo, e níveis ainda mais elevados de temperatura podem acarretar na formação de outras formas cristalinas.
> 800°	Acima de 800° C, a sílica presente na CBCA é essencialmente cristalina.

Fonte: De Paula (2006) apud Lima (2018, p. 23).

Dependendo das condições e temperatura de queima utilizadas, se torna possível a manutenção da sílica presente no bagaço da cana de açúcar em estado amorfo. Essa propriedade pode viabilizar a utilização desse resíduo como pozolana, resultando na diminuição das despesas após o processo de queima e do impacto ambiental associados à sua disposição no meio ambiente. Adicionalmente, a incorporação do CBCA pode gerar valor econômico como resíduo agroindustrial e trazer benefícios técnicos e ambientais, ao possibilitar a substituição parcial do cimento Portland (Sessa, 2013).

### 1.3 Utilização da CBCA no concreto

O concreto é um material notável que combina cimento, agregados (como areia e cascalho) e água em uma mistura homogênea. Além das propriedades físicas, como

resistência à compressão e durabilidade, suas propriedades químicas desempenham um papel fundamental em sua performance e aplicação.

O concreto é um produto que tem com seu principal componente o Cimento Portland, este é responsável pelo agrupamento dos agregados, aditivos e água, as ligações dos componentes ocorrem através do aglomeramento das partículas por meio da formação de produtos hidratados (Cincotto, 2014 apud Moretti, 2018).

A NBR 11172:1990 recomenda a utilização do termo "adição" para referir-se a "produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características", e o termo "aditivo" para "produto químico adicionado em pequenas quantidades às pastas, argamassas e concretos, com o propósito de modificar suas características tanto no estado fresco quanto endurecido" (Sessa, 2013).

Segundo Cordeiro (2010), aditivos minerais podem ser definidos como materiais usados em conjunto com o cimento Portland para aumentar o desempenho tecnológico diferenciado dos produtos cimentícios. A utilização desses aditivos em alguns casos pode resultar na redução dos custos de produção, pois permite a substituição de uma parte do clínquer por materiais energeticamente menos nobres, muitas vezes provenientes de resíduos industriais ou agroindustriais.

Os aditivos minerais se distinguem dos aditivos químicos pois podem somar-se ou substituir o cimento devido às semelhanças das propriedades, enquanto os aditivos químicos alteram as características do cimento sem modificar sua proporção na composição (Moraes, 2012 apud Sessa, 2013).

Aditivos pozolânicos, como cinzas volantes ou sílica ativa, são frequentemente adicionados ao concreto para melhorar suas propriedades. Esses materiais reagem com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos adicionais de ligação que aumentam a densidade e a durabilidade do concreto.

Os aditivos minerais mais comumente utilizados em conjunto com o cimento Portland abrangem uma ampla gama de materiais. Isso inclui pozolanas altamente reativas, como sílica ativa, argilas calcinadas e cinzas da casca de arroz, bem como

materiais de menor reatividade, como cinza volante e escória granulada de alto-forno. Esses aditivos desempenham papéis específicos na melhoria das propriedades do concreto, desde o aumento da resistência até a redução da permeabilidade e da retração (Sessa, 2013).

A incorporação de aditivos minerais confere uma significativa vantagem ao concreto, isso porque, quando exposto a altas temperaturas, o aditivo mineral acelera a reação pozolânica, contribuindo para a melhoria das propriedades do concreto (Lima, 2018).

Em geral a utilização de aditivos minerais proporciona uma maior resistência aos compostos produzidos, pois proporciona uma redução da porosidade capilar, assim obtendo menor permeabilidade e absorção no concreto; além disso ajuda na redução da corrosão das armaduras pois possibilita maior resistência a ataques por sulfatos, uma vez que são inibidores de reações álcali-agregado, reduzem a propagação de cloretos e passagem de oxigênio (Ferreira, 2015).

O Cimento Portland é uma matriz cimentícia altamente reativa, apresenta propriedades que permitem sua interação eficaz com diversos materiais complementares. Ao incorporar cinzas leves ao Cimento Portland, é possível não apenas potencializar suas características, como também reduzir o impacto ambiental ao reaproveitar resíduos industriais.

No entanto, é crucial considerar as composições químicas e mineralógicas do CBCA ao utilizá-lo, garantindo uma integração eficiente e segura com o cimento e demais componentes da mistura. Essa abordagem estratégica não apenas maximiza os benefícios técnicos e econômicos, mas também promove práticas sustentáveis na indústria da construção.

Segundo Sampaio (2014), a utilização do CBCA como aditivo mineral ao concreto se mostrou uma opção viável uma vez que proporciona melhorias nas propriedades mecânicas do concreto. Podendo ser utilizado em pré-moldados, pisos e obras de construção civil em geral, além de possibilitar uma destinação adequada a biomassa da indústria sucroalcooleiras.

## CAPÍTULO 2: METODOLOGIA

O presente trabalho adota uma abordagem de revisão de literatura integrativa para investigar a utilização de resíduos agroindustriais, especificamente o bagaço de cana-de-açúcar, na produção de concreto. Esta metodologia foi selecionada por sua capacidade de integrar e sintetizar informações provenientes de uma variedade de fontes, e idiomas.

A pesquisa foi conduzida através da consulta aos bancos de dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Google Acadêmico e sites governamentais relevantes que forneceram dados pertinentes à questão em estudo. As palavras-chave utilizadas para pesquisa foram: "utilização de resíduos agroindustriais", "bagaço de cana-de-açúcar", "concreto", "ensaios de tração" "ensaios de compressão". A seleção dos estudos foi realizada mediante a aplicação de critérios específicos de inclusão e exclusão.

Para esta revisão foram analisados 45 artigos que apresentaram características correlacionadas aos objetivos desta revisão, destes apenas 15 foram considerados aderentes aos objetivos a serem analisados no trabalho.

Os critérios de inclusão consideraram estudos que abordassem diretamente a utilização do bagaço de cana-de-açúcar como um agregado alternativo na produção de concreto, bem como aqueles que oferecessem *insights* significativos sobre os aspectos técnicos, ambientais e econômicos associados a essa prática. Além disso, foram considerados estudos que fossem publicados em periódicos científicos revisados por pares como teses de doutorado, artigos científicos, dissertações, monografias, trabalhos de conclusão de curso, em inglês ou português, que apresentassem uma análise aprofundada sobre o tema.

Por outro lado, foram excluídos estudos que não estivessem diretamente relacionados à utilização de resíduos agroindustriais no concreto, bem como aqueles que apresentassem metodologias pouco rigorosas ou resultados inconsistentes. Também foram excluídos estudos não disponíveis em formato digital ou que não estivessem acessíveis através das plataformas de busca selecionadas.

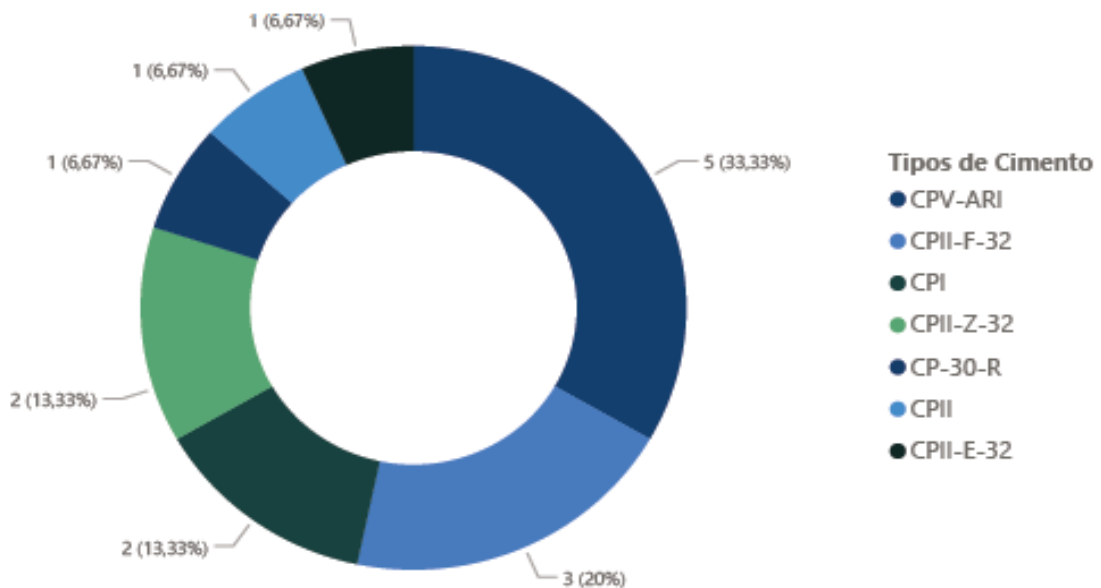
## CAPÍTULO 3: RESULTADOS

Após analisar 15 artigos relevantes sobre a utilização da adição parcial da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) em misturas de concreto, visando avaliar se houve aumento ou redução de resistência à compressão e à tração, foram obtidos os resultados apresentados nos itens a seguir.

### 3.1 Tipos de Cimento Utilizados

A análise dos estudos revelou uma variedade de tipos de Cimento Portland utilizados, com destaque para o Cimento Portland V - Alta Resistência Inicial e o Cimento Portland II-F-32, conforme representado na Figura 1.

Figura 1: Tipos de Cimento



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a) (2024).

Dentre os estudos que empregaram o Cimento Portland V - Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) como matriz cimentícia principal, destacam-se Berenguer et al. (2021), Dineshkumar e Balamurugan (2021), Zaleski et al. (2019) e Ferreira (2015). Enquanto Berenguer et al. (2021) focaram em ensaios de compressão axial e tração utilizando a mistura de CPV-ARI com amostras de cinza do bagaço de cana-de-açúcar classificadas como CBCA I e CBCA II, Dineshkumar e Balamurugan (2021)

direcionaram seus esforços para concreto de alta resistência com cinza volante e sílica ativa. Esses resultados sugerem uma consistência na preferência pelo CPV-ARI em estudos que demandam resistência inicial e características específicas de reatividade.

Por outro lado, Fernandes et al. (2015) optaram pelo CPV-ARI em um contexto diferente, explorando a substituição parcial de areia por CBCA. Essa escolha foi guiada pela necessidade de avaliar a reatividade do material em questão. Esta abordagem difere dos demais estudos, enfatizando a importância de considerações específicas sobre a composição do concreto.

Os estudos de Teodoro et al. (2013), Lima (2018) e Sessa (2013) destacaram-se pelo uso do Cimento Portland II-F-32. Teodoro et al. (2013) empregaram esse tipo de cimento em concretos para corpos de prova com dosagem calculada para  $f_{ck}$  de 20 MPa, enquanto Lima (2018) priorizou a menor proporção de adições minerais ao longo do processo de trabalho. Por sua vez, Sessa (2013) utilizou o CP II-F-32 em aplicações gerais ao longo de uma obra, ressaltando suas características de baixo teor de adição, composto por fíler calcário (teor entre 6 e 10%), que garantem ao produto resistências iniciais superiores e uniformidade.

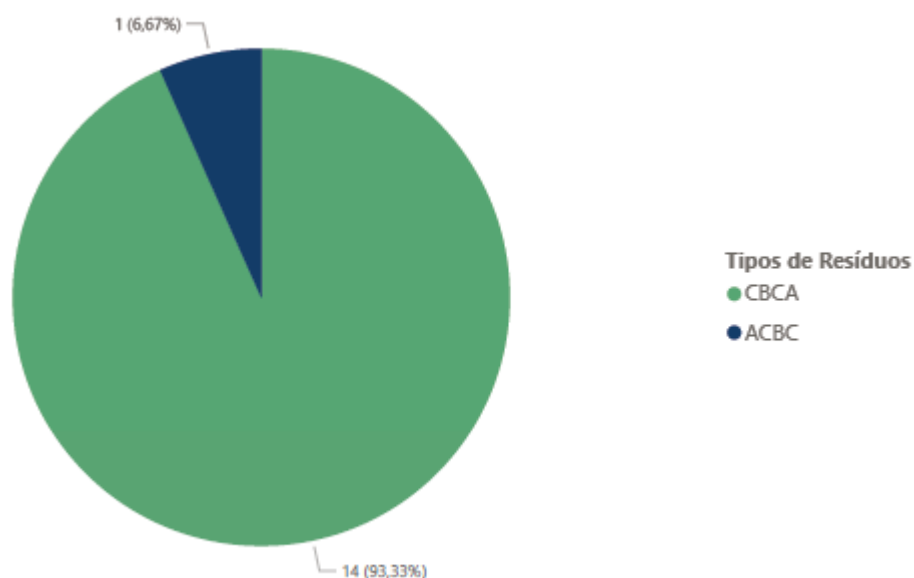
Já os estudos de Rao et al. (2021) e Channa et al. (2021) optaram pelo uso do Cimento Portland Comum, com especificações variadas. Rao et al. (2021) empregou o cimento conforme as especificações da IS 269:2015 de grau 53, enquanto Channa et al. (2021) utilizou o CP da ASTM Tipo I. Essa escolha destaca uma preferência pela simplicidade e conformidade com normas específicas em contextos distintos de pesquisa.

Por fim, Lopes et al. (2018), Delalibera et al. (2014), Almeida et al. (2019), Landa Ruiz et al. (2021) e Cardozo et al. (2023) exploraram outros tipos de Cimento Portland, como o CII-Z-32, o CP II-Z-32, o CII-E32 e o CPC 30R, respectivamente. Essa diversidade ressalta a ampla gama de opções disponíveis e a importância de considerar as propriedades específicas de cada tipo de cimento em relação aos objetivos da pesquisa.

### 3.2 Resíduos de Cana-de-Açúcar Utilizados

Os resíduos de cana-de-açúcar mais comumente utilizados nos estudos foram as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), obtidas a partir da queima do bagaço para geração de energia nas usinas de açúcar e álcool, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Tipos de Resíduos de Cana



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a) (2024).

A coleta e preparação das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) nos estudos variaram significativamente. Dineshkumar e Balamurugan (2021) optaram pela utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar CBCA sem detalhar o processo de coleta. Por sua vez, Rao et al. (2021) e Landa Ruiz et al. (2021) descreveram a coleta das cinzas em usinas de açúcar locais, destacando a origem geográfica específica das amostras. Berenguer et al. (2021) e Ferreira (2015) também mencionaram a origem das cinzas, obtidas de estabelecimentos locais e destilarias, respectivamente.

Zaleski et al. (2019) descreveram um processo detalhado de preparação das cinzas, incluindo secagem em estufa, moagem em moinho de bolas e calcinação em mufla. Os autores Lopes et al. (2018), Teodoro et al. (2013), Delalibera et al. (2014) e Sessa (2013) também detalharam os processos de coleta e preparação das cinzas,

incluindo peneiramento, moagem e secagem em estufa ou ao sol. Por outro lado, Lima (2018) e Cardozo et al. (2023) descreveram processos de coleta e secagem mais simples, realizados em ambientes externos, sem controle específico de temperatura.

Fernandes et al. (2015) detalharam a coleta das cinzas em uma usina de açúcar, descrevendo o processo de formação das cinzas e sua homogeneização antes da secagem em estufa e exposição ao sol.

Já no estudo conduzido por Almeida et al. (2019), foi investigado o uso do subproduto de açúcar como Areia da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (ACBC) como agregado miúdo, substituindo parcialmente a areia natural de quartzo na produção de concreto de cimento-escória. Foram avaliados três níveis de substituição do ACBC em massa: 0% (grupo de referência), 30% e 50%. As composições químicas das amostras de ACBC foram analisadas antes e depois do tratamento de homogeneização.

Essa variedade de abordagens na obtenção das cinzas destaca a importância da consistência nos procedimentos experimentais e da compreensão das características específicas dos materiais utilizados em cada estudo.

### **3.3 Proporção das Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar**

As proporções das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar variaram entre os estudos, com teores que oscilaram de 2,5% a 50,00% em relação à massa total de cimento, conforme apresentado na Figura 3.

Os estudos citados abordam uma variedade de proporções de substituição de materiais e métodos de teste em busca de compreensão e otimização das propriedades do concreto. A seguir apresentam-se os valores de substituição adotados em cada estudo:

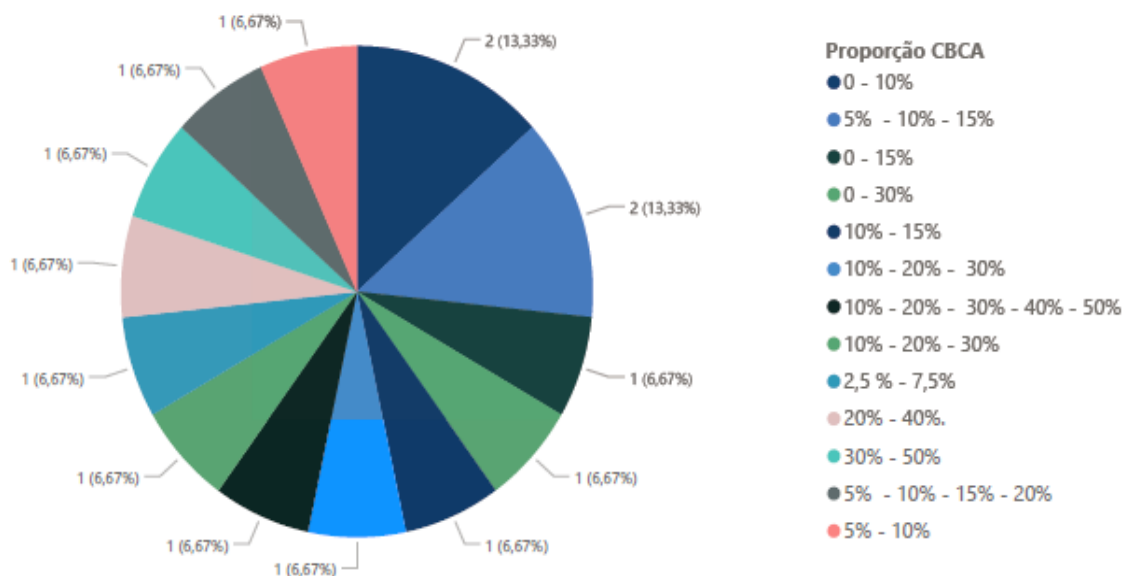
- Rao et al. (2021): realizaram uma comparação entre cinza de bagaço e nanosílica incorporada em concreto em diferentes proporções, variando de 0 a 6%, para idades de cura de 7, 28 e 90 dias.

- Channa et al. (2021): substituíram o cimento Portland por CBCA e cinza de casca de arroz (RHA) individualmente, com proporções de 5%, 10% e 15%, além de



uma combinação de CBCA e RHA com 10%, 20% e 30% em peso de cimento, selecionadas com base em pesquisas anteriores.

Figura 3: Proporção de Cinzas do Bagaço de Cana de Açúcar.



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a) (2024).

- Berenguer et al. (2021): adotaram a substituição parcial de 15,00% do CPV-ARI por CBCA.

- Almeida et al. (2019): consideraram três níveis de substituição do ACBC, em massa: 0% (referência), 30% e 50%.

- Landa Ruiz et al. (2021): produziram seis misturas de concreto, com substituição do CPC 30R por combinações de CBCA e Sílica Ativa (SF) em porcentagens de 10, 20, 30, 40 e 50%.

- Dineshkumar e Balamurugan (2021): testaram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar em proporções de 10%, 20% e 30%, realizando testes de consistência para todas as variações de proporções.

- Zaleski et al. (2019): elaboraram concretos com substituições de cinza do bagaço de cana-de-açúcar pelo cimento em teores de 10% e 15%, além de um concreto de referência.

- Lopes et al. (2018): adotaram traços com substituição de 30% do Cimento Portland por CBCA, 30% de Resíduos da Construção Civil (RCC) em substituição do agregado graúdo, e 30% de CBCA e RCC.

- Teodoro et al. (2013): produziram corpos-de-prova para cada traço do concreto, variando a substituição do cimento em proporções de 0%, 5%, 10% e 15% em diferentes idades de cura.

- Delalibera et al. (2014): fixaram as proporções de substituição de CBCA em 10%, 20% e 30% em massa de utilização da CBCA em substituição ao cimento.

- Ferreira (2015): substituíram 10% da massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.

- Lima (2018): realizaram a substituição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em teores de 5% e 10% para substituir o cimento Portland.

- Sessa (2013): produziram concretos com substituição da CBCA em teores de 20% e 40%.

- Oliveira et al. (2023): definiram três tratamentos experimentais com teores de substituição de 2,5 % - 7,5% de cinzas do bagaço da cana de açúcar.

- Fernandes et al. (2015): substituíram o agregado miúdo por CBCA em proporções de 5%, 10%, 15% e 20%, mantendo a relação a/c em 0,50 e a relação 1:m de 1:5.

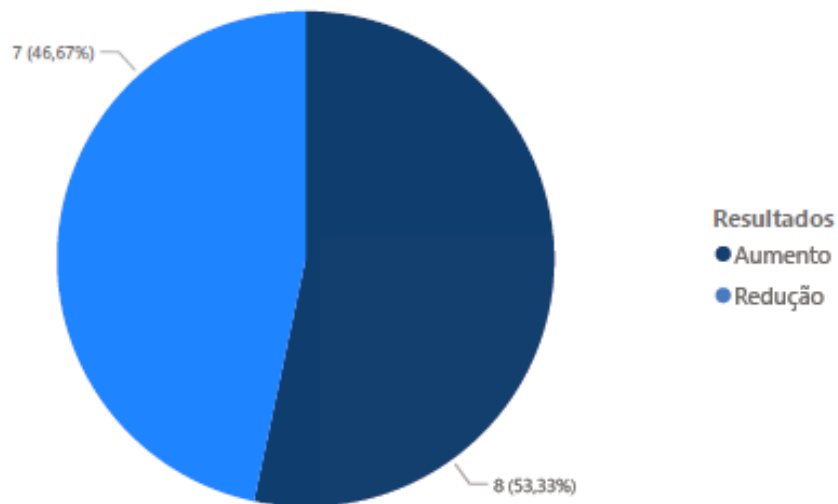
Esses valores variados refletem a diversidade de proporções utilizadas nas substituições parciais do concreto, visando compreender melhor e otimizar suas propriedades para diversas aplicações na construção civil.

### **3.4 Ensaio de Compressão e Tração**

Os estudos investigaram diversas características do concreto sendo a resistência à compressão e à tração uma das mais importantes. Os resultados indicaram uma melhoria significativa de resistência a compressão em 8 dos 15 estudos que utilizaram a adição do CBCA ao concreto conforme apresentado na Figura 4, já nos ensaios a tração dos 15 estudos analisados 7 indicaram aumento de

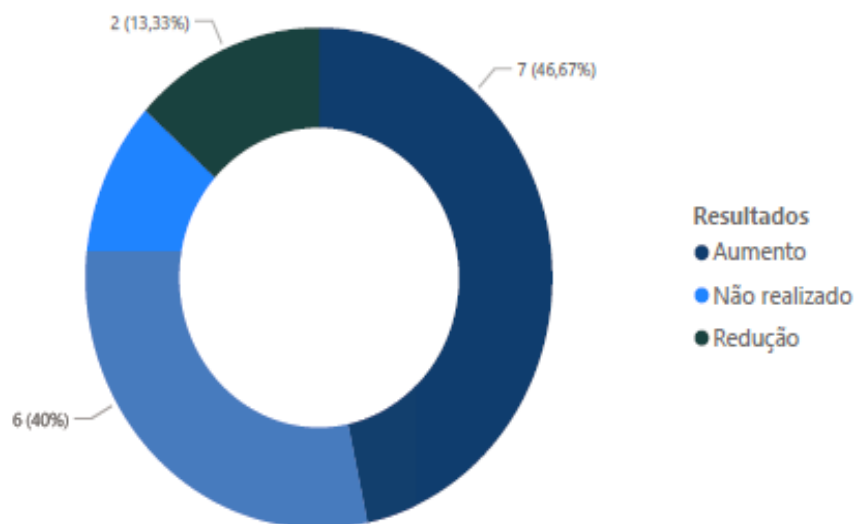
resistência, 6 não realizaram o ensaio e 2 indicaram uma redução de resistência à tração conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 4: Resultados dos Ensaio de Compressão



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a) (2024).

Figura 5: Resultados dos Ensaio de Tração.



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a) (2024).

O estudo conduzido por Berenguer et al. (2021) apresentou os seus resultados após um período de cura de 28 dias, a resistência à compressão axial dos CBCAs

aumentou para uma média de 50 MPa, comparada à referência de 45 MPa, representando um acréscimo de 11%. A adição de CBCA resultou em incremento na resistência à compressão axial em todos os períodos de cura considerados, sendo mais pronunciado após 365 dias, quando a resistência à compressão axial do concreto de referência atingiu 58 MPa, enquanto a dos concretos com cinzas de bagaço de cana alcançou em média 62 MPa, representando aumentos de 29% e 24%, respectivamente, em relação aos valores correspondentes após 28 dias.

Em relação aos ensaios de tração Berenguer et al. (2021) demonstra que a resistência também é influenciada pela presença de cinzas de bagaço de cana e pelo tempo de cura do material. Por exemplo, após 28 dias de cura, os valores de resistência à tração para os materiais de referência, CBCA I e CBCA II, foram de 5,02 MPa, 4,68 MPa e 5,19 MPa, respectivamente. Após 365 dias de cura, esses valores aumentaram para 5,49 MPa, 5,78 MPa e 6,60 MPa, representando aumentos de 9%, 24% e 27%, respectivamente. Um aspecto mecânico relevante ao comparar os três tipos de concretos é que a adição de CBCA I não altera as propriedades mecânicas do concreto resultante em períodos de cura prolongados, indicando que esta cinza possui potencial como substituto parcial mais ecológico do cimento.

Os resultados de Berenguer et al. (2021) mostraram um aumento significativo na resistência à compressão axial, com incrementos de 11% após 28 dias e até 24% após 365 dias de cura, em comparação com o concreto de referência. Além disso, os ensaios de tração revelaram melhorias nas propriedades mecânicas dos concretos com adição de CBCA, sendo mais pronunciadas para o CBCA II. Interessantemente, a CBCA I não afetou as propriedades mecânicas do concreto em períodos de cura prolongados, sugerindo seu potencial como um substituto mais sustentável do cimento. Esses resultados destacam a viabilidade técnica e o potencial ambiental das cinzas de bagaço de cana na produção de concretos de alto desempenho.

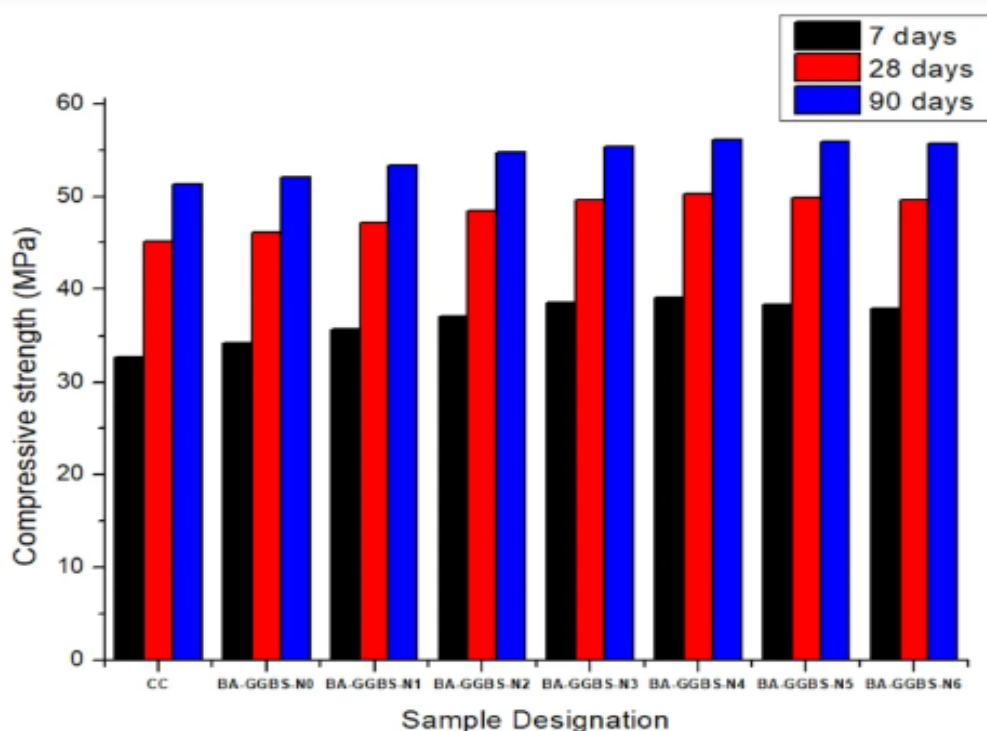
O estudo conduzido por Rao et al. (2021) investigou a resistência à compressão de amostras de concreto produzidas com a mistura de cinza de bagaço, escória granulada de alto-forno moída (GGBS), nanosílica e agregados de concreto reciclado. Foram avaliadas diferentes proporções de nanosílica, variando de 0 a 6%, em amostras com idades de cura de 7, 28 e 90 dias. A adição de nanosílica e a incorporação de agregados reciclados resultaram em melhorias nas propriedades de

resistência das amostras em todas as idades de cura. A obtenção de resistência nas amostras substituídas por cinza de bagaço e agregados reciclados pode ser atribuída à elevada proporção de sílica, à taxa de reação da cinza de bagaço e do GGBS. Além disso, o ganho de resistência também pode ser devido à fase amorfa e à alta finura da nanosílica e da cinza de bagaço. A reação pozolânica entre o conteúdo de portlandita e a sílica nas cinzas de bagaço também pode contribuir para a melhoria da resistência, conforme indicado em estudos anteriores.

As amostras de concreto com cinza de bagaço, escória granulada de alto-forno moída, nanosílica em 4,00% (BA-GGBS-N4) demonstraram maior resistência à compressão, devido à área superficial mais específica e à reatividade das cinzas de bagaço. O alto consumo de hidróxido de cálcio pela sílica reativa presente no bagaço e na nanosílica melhora a resistência em idades precoces, promovendo a hidratação do cimento. Essa reação eleva a resistência das amostras BA-GGBS-N4 em comparação com outras amostras. No entanto, o calor de hidratação resultante da presença de GGBS e da adição de nanopartículas pode reduzir a resistência dos corpos de prova de concreto após certo ponto de adição. A reatividade da cinza de bagaço e da nanosílica reduziu significativamente os poros capilares das amostras de concreto, melhorando as propriedades mecânicas de todas as amostras (Rao et al. 2021).

A maior resistência à compressão foi observada na amostra de concreto BA-GGBS-N4, alcançando 56,1 MPa aos 90 dias, representando um aumento de aproximadamente 9,87% em relação às amostras de concreto convencionais, conforme apresentado Figura 6. O rápido consumo de hidróxido de cálcio pela cinza de bagaço e pela nanosílica contribuiu para os elevados valores de resistência à compressão das amostras de concreto misturado. O efeito filler e a reatividade pozolânica foram identificados como possíveis causas do aumento na formação de gel, resultando em alta resistência à compressão. No entanto, a incorporação de proporções mais elevadas de cinza de bagaço pode diminuir a taxa de hidratação do concreto devido à menor reatividade. A resistência a longo prazo das amostras de concreto com cinza de bagaço, GGBS e cimento com a mistura de nanosílica foi melhorada devido à formação de gel silicato de cálcio hidratado (C-S-H) pelo consumo de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) da reação de hidratação primária (Rao et al. 2021).

Figura 6: Resultados dos ensaios de compressão

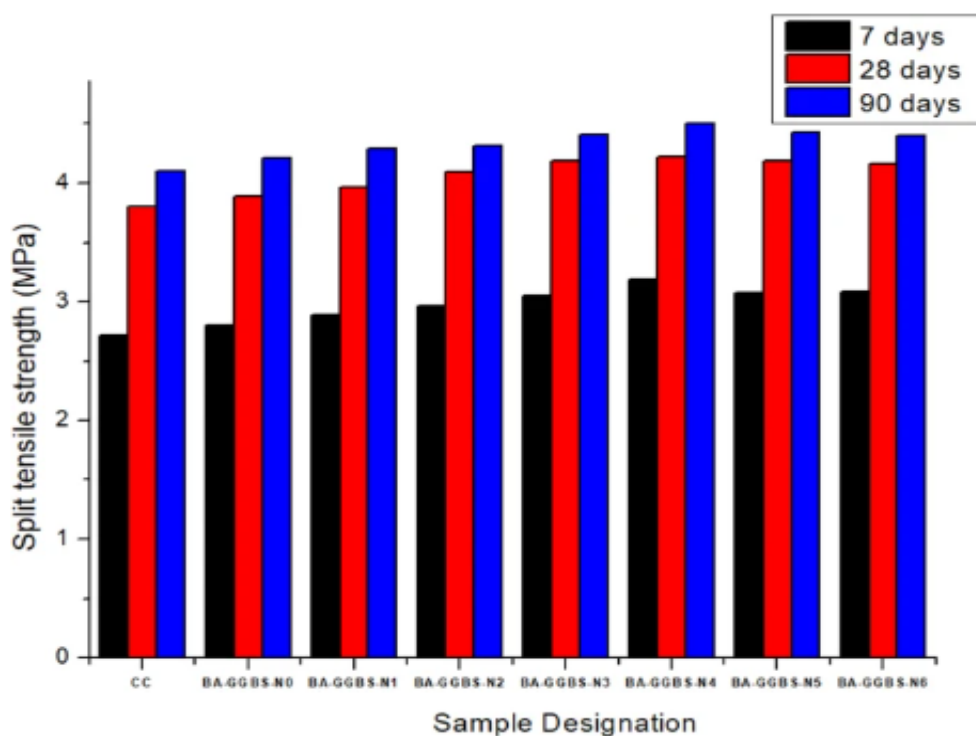


Fonte: Rao et al. (2021, p. 2287).

Os ensaios de tração conduzidos por Rao et al. (2021) envolveram a mistura de agregado reciclado, cinza de bagaço, nanosílica e amostras de concreto incorporadas com GGBS. A maior e a menor resistência à tração foram observadas nas amostras BA-GGBS-N4 e Concreto Convencional (CC), respectivamente apresentados na Figura 7. A resistência à tração na ruptura do BA-GGBS-N4 foi 10,26% superior à do CC após 28 dias de cura. A razão para essa melhoria na resistência é análoga à observada na resistência à compressão. Os valores de tração aumentaram com a maior incorporação de nanosílica, devido à ação pozolânica do GGBS, CBCA e nanosílica rica em sílica. A inclusão de nanosílica e GGBS no concreto à base de Materiais Cimentícios Suplementares (SCM) resultou em maior resistência tanto à compressão quanto à tração por divisão. O concreto com 4% de nanosílica apresentou a maior resistência à tração por divisão em comparação com as misturas de concreto convencionais. A nanosílica atua como uma ponte para selar as microfissuras presentes na matriz de cimento antes do pico de carga. A incorporação de CBCA e GGBS aumentou a resistência à tração em todas as idades de cura, com melhorias variando de 1 a 6% ao longo de 7 a 90 dias de cura. Essa melhoria é atribuída principalmente ao fortalecimento da matriz de cimento por meio

do mecanismo pozolânico. Não houve mudança significativa na tendência dos resultados de resistência à tração e compressão. Os fatores responsáveis pela melhoria na resistência à tração e compressão são associados às melhorias microestruturais e à formação adicional de gel de silicato de cálcio por ação pozolânica.

Figura 7: Resultados dos ensaios de tração.



Fonte: Rao et al. (2021, p. 2288).

Nos resultados de Rao et al. 2021 observou-se que a amostra BA-GGBS-N4 apresentou maior resistência à compressão, atribuída à área superficial mais específica e à reatividade das cinzas de bagaço e nanosílica, promovendo uma hidratação mais eficiente do cimento. Embora o calor de hidratação possa reduzir a resistência em estágios posteriores, a formação de gel CSH contribui para a resistência a longo prazo. Os ensaios de tração demonstraram que a incorporação de nanosílica e GGBS resultou em maior resistência à tração por divisão, atribuída ao fortalecimento da matriz de cimento através de mecanismos pozolânicos e à formação de gel adicional. Esses resultados sugerem que a adição de cinzas de bagaço, GGBS e nanosílica pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas do concreto, oferecendo uma alternativa mais sustentável para a construção civil.

O estudo conduzido por Almeida et al. (2019) examinou os efeitos da inclusão da Areia da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (ACBC) na resistência à compressão do concreto em diferentes estágios de cura. Os resultados indicaram aumentos significativos na resistência à compressão quando à ACBC foi adicionada em comparação com o concreto de referência (CR), tanto aos 28 dias quanto após 182 dias de cura, conforme a Figura 08.

Aos 28 dias, a resistência à compressão aumentou em aproximadamente 8% e 11% para os concretos com substituição de 30% e 50% de ACBC, respectivamente. Após 182 dias, os incrementos foram de 4% e 14% para as classes de concreto C30 e C50, respectivamente. Esses resultados foram atribuídos à reação prolongada do cimento, influenciada pela presença de escória de alto forno e pelos ciclos de secagem/umidificação na solução salina (Almeida et al., 2019).

A análise estatística revelou diferenças significativas na resistência à compressão aos 28 dias entre os concretos com e sem ACBC, destacando o impacto positivo da adição deste material, conforme apresentado na Figura 8. O efeito de empacotamento da ACBC na mistura foi identificado como um mecanismo importante para o aumento da resistência à compressão, preenchendo poros e resultando em uma microestrutura mais densa (Almeida et al. 2019).

Figura 8: Resultados dos ensaios de compressão e tração

Amostra	Resistência à compressão (aos 28 dias)			Resistência à compressão (aos 182 dias)			Resistência à tração (aos 28 dias)		
	Média (MPa)	DP <sup>(1)</sup> (MPa)	CV <sup>(2)</sup> (%)	Média (MPa)	DP <sup>(1)</sup> (MPa)	CV <sup>(2)</sup> (%)	Média (MPa)	DP <sup>(1)</sup> (MPa)	CV <sup>(2)</sup> (%)
CR	36,54	1,77	5	51,26	1,53	3	3,75	0,11	3
C30	39,36	1,53	4	53,51	2,94	5	3,70	0,52	14
C50	40,65	0,67	2	58,74	1,95	3	4,21	0,58	14
ANOVA e teste t	CR/C30 e CR/C50 estatisticamente significativos			CR/C30/C50 não estatisticamente significativo			CR/C30/C50 não estatisticamente significativo		



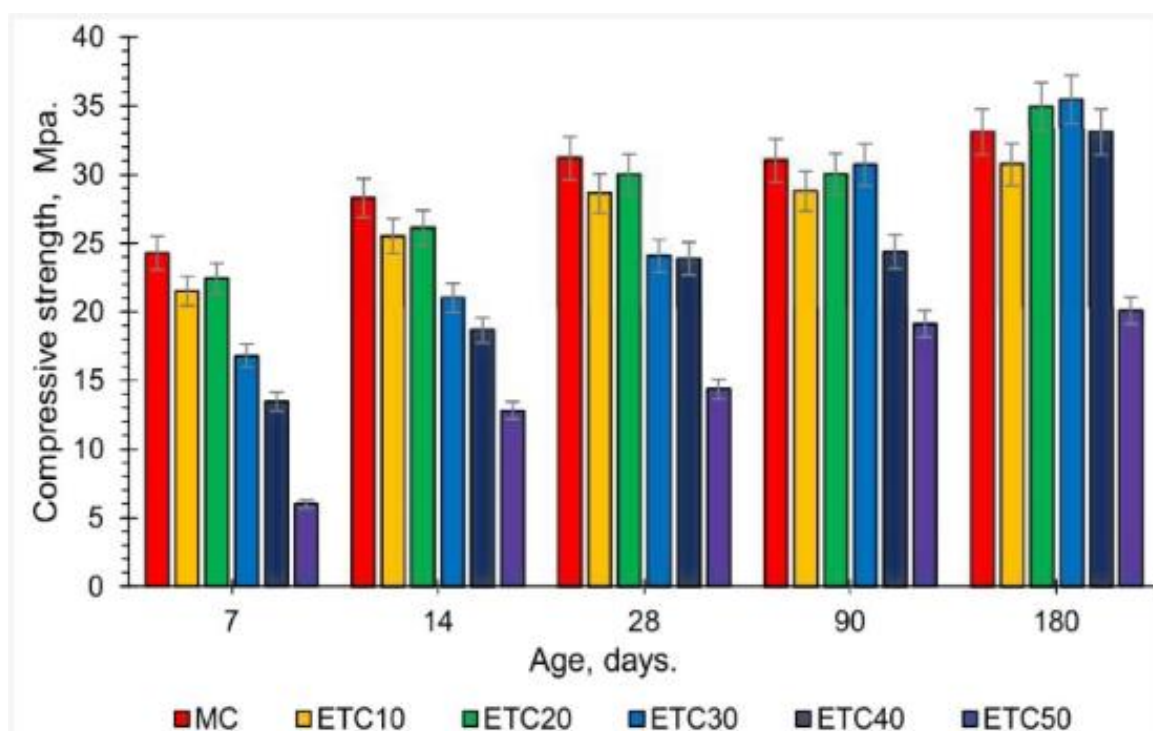
Fonte: Almeida et al. (2019, p. 77).

No entanto, os resultados referentes à resistência à tração e ao módulo de elasticidade aos 28 dias não mostraram diferenças significativas entre os concretos com e sem ACBC. Embora a hipótese nula não tenha sido rejeitada com base nos dados disponíveis, isso sugere que o desempenho do concreto com ACBC foi comparável ao da amostra de referência para essas propriedades específicas (Almeida et al. 2019).

As descobertas de Almeida et al. (2019) ressaltam o potencial da ACBC como um aditivo eficaz para melhorar a resistência à compressão do concreto em várias condições, oferecendo perspectivas promissoras para sua aplicação na engenharia civil. No entanto, é importante considerar outras propriedades mecânicas do concreto ao avaliar a viabilidade prática da incorporação de SBAS em projetos de construção.

O estudo conduzido por Landa Ruiz et al. (2021) avaliou a resistência à compressão de concretos em diferentes idades de cura, variando a quantidade de materiais pozolânicos alternativos, como cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e Sílica Ativa (SF). Os resultados revelaram um padrão interessante de desenvolvimento da resistência ao longo do tempo conforme a Figura 9.

Figura 9: Resultados dos ensaios de compressão.



Fonte: Landa Ruiz et al. (2021, p.10).

Após 7 dias de cura, os Concretos Ternários Ecológico (ETC) (com adição de materiais pozolânicos alternativos) apresentaram valores de resistência à compressão inferiores à mistura controle. Essa redução foi significativa, variando de 11,32% a 75,31% para diferentes proporções de adição de CBCA e SF. Tal efeito negativo foi atribuído à presença desses materiais, que inicialmente não contribuíram positivamente para a resistência (Landa Ruiz et al. 2021).

Entretanto, aos 14 dias, observaram-se aumentos na resistência dos concretos ETC. Esse aumento progressivo continuou até os 28 dias, onde os concretos ETC-10 e ETC-20 alcançaram cerca de 90% dos valores de resistência à compressão da mistura controle, com valores em torno de 28-29 MPa. Os concretos ETC-30 e ETC-40 atingiram valores um pouco menores, cerca de 22-23 MPa, enquanto o concreto ETC-50 apresentou o menor valor de resistência, com 13 MPa (Landa Ruiz et al. 2021).

Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores que destacam o desempenho superior dos concretos sustentáveis ou ecológicos após os 28 dias, especialmente quando há substituição de até 20% do cimento Portland com materiais suplementares. Esse achado sugere que, apesar do inicial efeito negativo nos primeiros dias de cura, os materiais pozolânicos alternativos contribuem significativamente para o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo (Landa Ruiz et al. 2021).

Aos 90 dias, foram observadas diferenças mínimas entre a resistência à compressão do concreto controle (MC) e os concretos com diferentes proporções de substituição de CBCA-SF (ETC-10, ETC-20 e ETC-30). No entanto, os valores de resistência foram inferiores para as misturas ETC-40 e ETC-50. Em termos percentuais, as diferenças em relação ao MC foram de 7,22%, 3,24%, 1,07%, 21,42% e 38,41% para ETC-10, ETC-20, ETC-30, ETC-40 e ETC-50, respectivamente, sendo a mistura ETC-30 a que apresentou melhor desempenho (Landa Ruiz et al. 2021).

Aos 180 dias, os corpos de prova das misturas ETC-30, ETC-20 e ETC-40 exibiram resistência à compressão superior aos corpos de prova do concreto controle. Com base nos resultados aos 180 dias, foi concluído que a proporção ótima de

substituição de CBCA-SF é de 30%, seguida por 20%, com aumentos na resistência à compressão de 7,13% e 5,58%, respectivamente, em comparação ao MC. A mistura ETC-40 também apresentou resistência à compressão igual à do MC. No entanto, a mistura ETC-50, com substituição de 50% de CBCA-SF, não conseguiu desenvolver resistência mecânica próxima à do concreto controle, atingindo apenas 20,09 MPa aos 90 dias (Landa Ruiz et al. 2021).

Os resultados de Landa Ruiz et al. (2021) evidenciam a importância da seleção cuidadosa das proporções de substituição de materiais suplementares para otimizar o desempenho em termos de resistência à compressão do concreto. A proporção de substituição de 30% se destacou como a mais eficaz, seguida por 20% em relação a amostra referência. Entretanto, proporções mais elevadas, como na mistura ETC-50, mostraram uma diminuição na resistência mecânica. Essas descobertas ressaltam a necessidade de um equilíbrio preciso entre os materiais suplementares para alcançar um desempenho ideal, tanto em termos de resistência quanto de sustentabilidade, na produção de concreto.

Dineshkumar e Balamurugan (2021) investigaram os efeitos da substituição de Cinzas do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA) na resistência à compressão e à tração do concreto. A resistência à compressão inicial da mistura de controle aos 28 dias foi de 63 MPa, aumentando gradualmente em 4% para uma substituição de 10% de CBCA e em 4,35% para uma substituição de 20%. Para uma substituição de 30%, a resistência foi de 4,15%. Assim, a resistência máxima foi alcançada com uma substituição de até 20% de CBCA. Essa proporção oferece não apenas o máximo de resistência, mas também benefícios adicionais, como redução de resíduos e consumo de cimento.

Quanto à resistência à tração, utilizada para avaliar a tendência à fissuração, a resistência inicial da mistura de controle aos 28 dias foi de 7,24 MPa. Houve um aumento gradual em 5,4% para uma substituição de 10% de CBCA e em 5,74% para uma substituição de 20%. Para uma substituição de 30%, a resistência à tração foi de 5,5%. A resistência máxima à tração foi observada com uma substituição de 20%. Em conformidade com a norma IS456:2000, a resistência à tração deve corresponder a pelo menos 10% da resistência à compressão do concreto. A diferença entre a

resistência à tração real e teórica, dividida pela teórica, foi em média de 14,94% (Dineshkumar e Balamurugan, 2021).

Dineshkumar e Balamurugan (2021) destacam a viabilidade técnica e os benefícios econômicos e ambientais da substituição parcial de CBCA no concreto, especialmente na faixa de 10% a 20%, onde são alcançadas melhorias significativas na resistência à compressão e à tração, além de uma redução no desperdício e no consumo de cimento.

Lopes et al. (2018) conduziram ensaios de resistência à compressão em corpos de prova conforme estabelecido pela norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Para cada traço, foram produzidos corpos de prova para ruptura aos 7, 28 e 56 dias. Os resultados mostraram que o traço contendo apenas cinza de bagaço de cana (CBCA) como substituto da areia (T2) apresentou um aumento significativo na resistência à compressão, atingindo 38 MPa aos 28 dias. Esse aumento era esperado devido à composição granulométrica mais fina da CBCA, proporcionando melhor preenchimento dos vazios do concreto, conhecido como efeito filler.

O traço T3, que contém substituição parcial de resíduo de cerâmica calcinada (RCC) por brita 1, obteve resultados semelhantes ao traço de referência, com uma ligeira diferença na resistência aos 56 dias, com um ganho de 2% em relação ao T1. Isso pode ser atribuído à composição heterogênea do RCC, contendo partículas de cal e cimento disponíveis para reações adicionais, bem como partículas de materiais cerâmicos potencialmente benéficas para o concreto estrutural, o que pode resultar em um aumento de resistência em idades mais avançadas (Lopes et al. 2018).

O traço T4 também superou os resultados do traço de referência, indicando que os resíduos analisados separadamente nos traços T2 e T3 também contribuem para o aumento da resistência quando combinados, conforme demonstrado Figura 10 (Lopes et al., 2018).

Figura 10: Resultados dos ensaios de compressão.

Traço	7 dias			28 dias			56 dias		
	Carga (kN)	Resistência (MPa)	DV	Carga (kN)	Resistência (MPa)	DV	Carga (kN)	Resistência (MPa)	DV
1	160,8	20,48	1,4	271,0	34,50	2,8	287,1	36,56	1,5
2	165,4	21,06	0,5	301,6	38,39	1,0	307,1	38,87	1,4
3	184,1	22,87	0,9	274,5	34,71	1,7	295,3	37,60	2,2
4	170,9	21,77	0,9	274,9	35,00	1,2	283,8	36,82	2,0

Fonte: Lopes et al. (2018, p. 223).

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral mostraram um aumento considerável de aproximadamente 11% no traço T2 em comparação com o traço de referência T1, como demonstrado na Figura 11. Isso pode ser atribuído ao melhor preenchimento dos vazios pela CBCA, devido à sua granulometria mais fina em comparação com a areia. O uso combinado dos dois resíduos no traço T4 também resultou em um ganho de quase 7% em relação ao traço de referência. No entanto, o traço T3 não apresentou variações significativas na resistência à compressão, indicando que a presença do RCC não teve um efeito significativo nesse aspecto (Lopes et al., 2018).

Figura 11: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Traço	Carga (kN)	Resistência (MPa)	DV
1	83,57	2,66	0,15
2	93,21	2,96	0,29
3	84,17	2,67	0,42
4	89,31	2,84	0,21

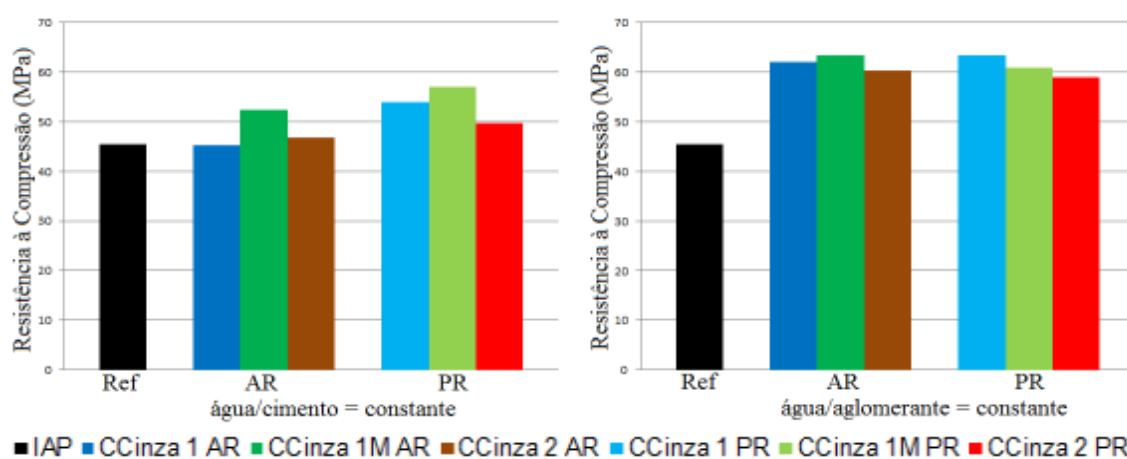
Fonte: Lopes et al. (2018, p. 224).

O estudo de Lopes et al. (2018) observou resultados promissores em diferentes traços de concreto, com os que apresentavam apenas cinza de bagaço de cana (CBCA) como substituto da areia (T2) demonstrou um aumento significativo na resistência à compressão, alcançando 38 MPa aos 28 dias, atribuído ao efeito filler da CBC. O traço T3, com substituição parcial de resíduo de cerâmica calcinada (RCC) por brita 1, obteve resultados semelhantes ao traço de referência, com uma ligeira diferença na resistência aos 56 dias, sugerindo um potencial de aumento de resistência em idades mais avançadas devido à composição heterogênea do RCC. O

traço T4, que combinou os resíduos analisados nos traços T2 e T3, superou os resultados do traço de referência, destacando o efeito sinérgico dos materiais. Além disso, os ensaios de resistência à tração por compressão diametral mostraram aumentos consideráveis no traço T2 e T4, atribuídos ao melhor preenchimento dos vazios pela CBCA e ao efeito combinado dos resíduos, respectivamente, enquanto o traço T3 não apresentou variações significativas na resistência à compressão. Esses resultados sugerem o potencial promissor dos resíduos como substitutos na produção de concreto, destacando a importância do entendimento das interações entre diferentes materiais para otimizar as propriedades do concreto.

Os resultados obtidos por Ferreira (2015) nos ensaios de compressão para os compostos com e sem cinzas, antes da requeima (AR) e após a requeima (PR), são ilustrados na Figura 12, mostrando os resultados de resistência a compressão dos corpos de prova. Observa-se que ao fixar a relação água/cimento (A/C), as resistências são inferiores às obtidas quando se fixa a relação água/aglomerante (A/Ag). Isso provavelmente se deve à água disponível que proporciona maior trabalhabilidade e melhor adensamento das amostras.

Figura 12: Resultados dos ensaios de compressão.



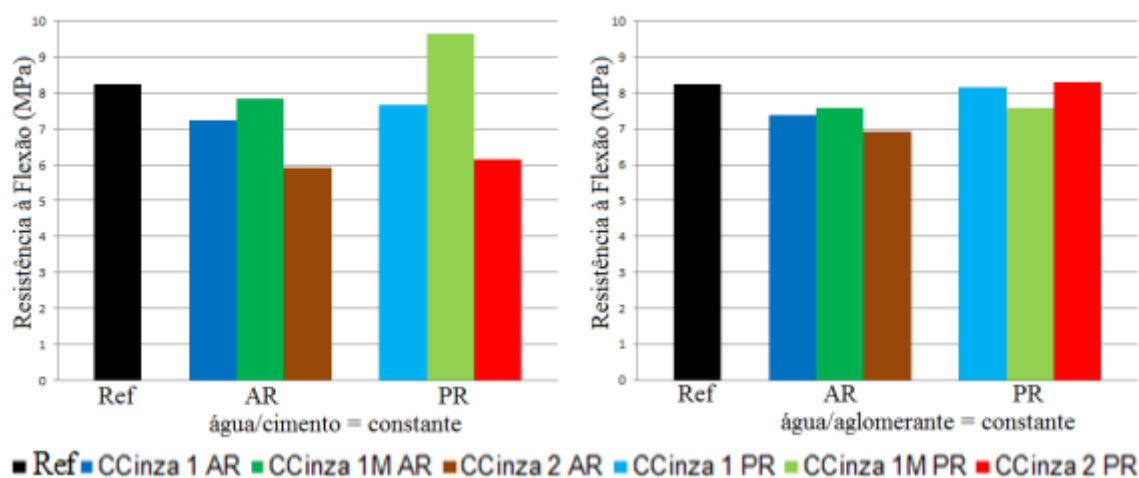
Fonte: Ferreira (2015, p. 49).

É importante notar que neste estudo não foram avaliadas possíveis patologias que podem ocorrer devido à presença de matéria orgânica nas amostras produzidas. No entanto, para ambos os casos, constata-se que o uso de 10% de cinzas em substituição ao cimento contribui consideravelmente para o aumento da resistência à compressão. No entanto, essa contribuição é mais significativa para o traço com

relação A/Ag constante. No caso da relação A/C constante, a requeima contribui para um aumento da resistência. No entanto, para a relação A/Ag constante, não é possível identificar um aumento percentual da resistência à compressão com a requeima, sugerindo que o mecanismo de ação das cinzas é de preenchimento de vazios (efeito filler) (Ferreira, 2015).

Os resultados do ensaio de resistência à tração pela flexão, apresentados na Figura 13, seguiram a mesma abordagem do Índice de Atividade Pozolânica e Módulo de Elasticidade, com as relações A/C e A/Ag constantes antes e após a requeima. A resistência à tração na flexão dos corpos de prova produzidos com relação A/C, em sua maioria, é inferior à amostra de referência. Somente o traço produzido com a Cinza 1M pós-requeima obteve resultado superior (Ferreira, 2015).

Figura 13: Resultados dos ensaios de tração.



Fonte: Ferreira (2015, p. 52).

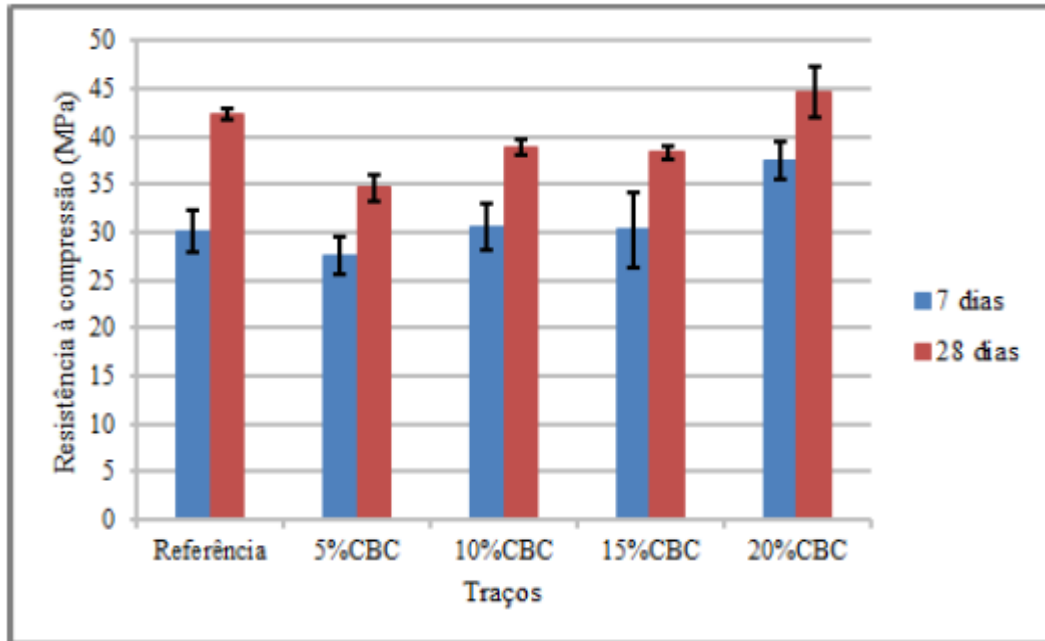
Em relação ao processo de requeima, não foi possível identificar a efetividade do beneficiamento para todas as amostras com relação A/C constante. Para a relação A/Ag constante, apenas a amostra produzida com a Cinza 2 pós-requeima atingiu resistência superior à referência. No entanto, a maioria dos compostos produzidos com as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar obteve resistência superior a 90% da resistência da amostra de referência. A ineficiência do processo de beneficiamento para a relação A/Ag é mais evidente, uma vez que a variação da resistência com o tratamento térmico é muito pequena (Ferreira, 2015).

Os resultados obtidos por Ferreira (2015) nos ensaios de compressão e tração flexional ilustram a influência das cinzas de bagaço de cana na resistência mecânica do concreto, tanto antes quanto após a requeima. A fixação da relação água/cimento (A/C) resultou em resistências inferiores em comparação com a fixação da relação água/aglomerante (A/Ag), sugerindo que a água disponível pode afetar a trabalhabilidade e o adensamento das amostras. O uso de 10% de cinzas em substituição ao cimento contribuiu significativamente para o aumento da resistência à compressão, sendo mais expressivo quando a relação A/Ag é constante. A requeima também demonstrou contribuir para o aumento da resistência, especialmente quando a relação A/C é constante, indicando um possível efeito filler das cinzas. Os resultados dos ensaios de resistência à tração flexional seguiram uma tendência semelhante, com algumas amostras superando a resistência da amostra de referência, especialmente após a requeima. No entanto, a eficácia do processo de beneficiamento foi mais evidente para a relação A/Ag, uma vez que a variação da resistência com o tratamento térmico foi mais discreta. Esses resultados destacam a complexidade da interação entre as cinzas de bagaço de cana e as propriedades mecânicas do concreto, ressaltando a importância de considerar diferentes variáveis na formulação de misturas de concreto para garantir um desempenho adequado.

No estudo realizado por Fernandes et al. (2015), observa-se que o traço com 20% de adição de cinza de bagaço-de-cana (CBCA) foi o que obteve os melhores resultados de resistência à compressão em comparação com as séries de traços produzidos, conforme ilustrado na Figura 14. Em comparação com a amostra de referência, esse traço apresentou resultados semelhantes em termos de resistência à compressão.

Figura 14: Resultados dos ensaios de compressão.

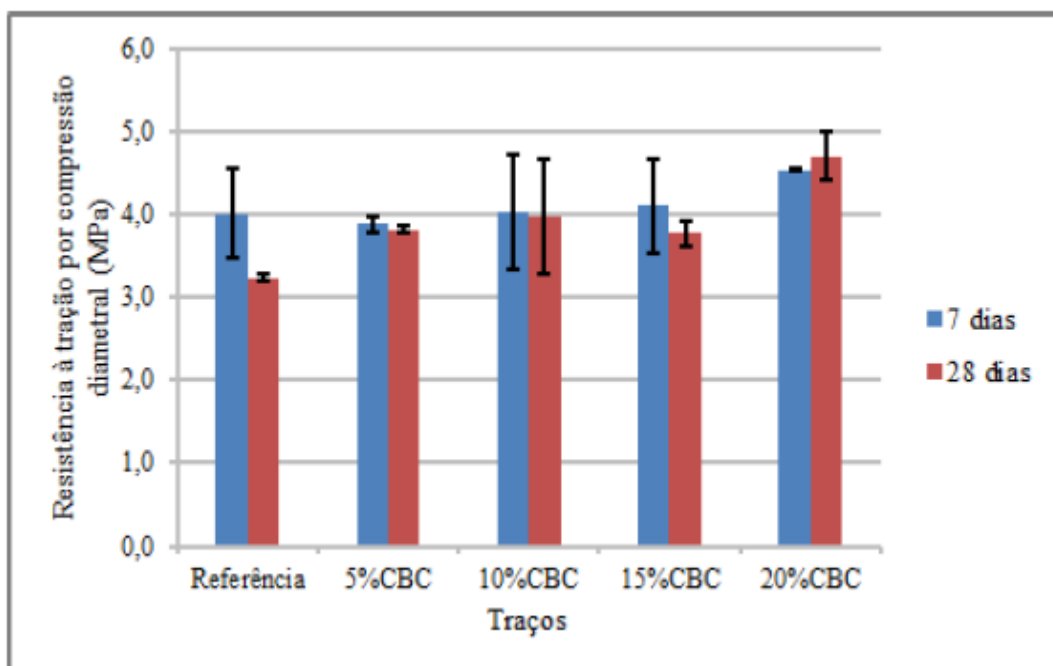




Fonte: Fernandes et al. (2015, p. 915).

Analogamente, pela Figura 15, verifica-se que o comportamento da resistência à tração por compressão diametral seguiu a mesma evolução dos concretos em relação à resistência à compressão. Nesse sentido, o traço com 20% de adição de CBCA foi o que demonstrou resultados ligeiramente superiores em comparação com os demais traços (Fernandes et al. 2015).

Figura 15: Resultados dos ensaios de tração.

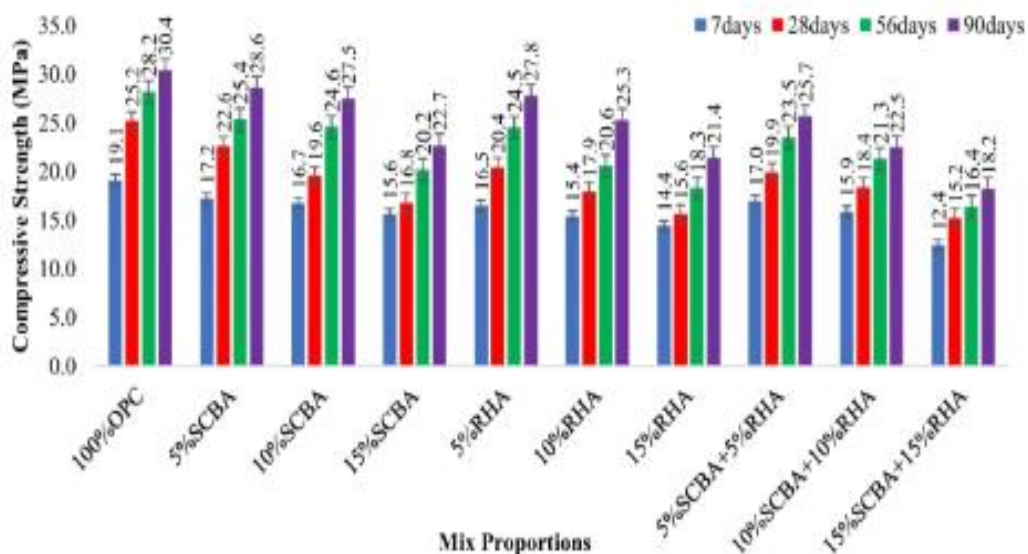


Fonte: Fernandes et al. (2015, p. 916).

Fernandes et al. (2015) indicam que a adição de 20% de CBC parece ser uma opção viável para melhorar tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração por compressão diametral do concreto, sem comprometer significativamente o desempenho em relação à amostra de referência.

No estudo conduzido por Channa et al. (2021), a Figura 16 apresenta a mistura de concretos contendo diversas proporções de Cinzas de Casca de Arroz (RHA) e Cinzas do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA) como material de substituição parcial do cimento Portland ordinário (OPC) para determinar a resistência à compressão do concreto em diferentes idades de cura. Os resultados indicam que a resistência à compressão foi reduzida ao utilizar CBCA como substituto parcial do OPC na mistura, como por exemplo na amostra com 5% os valores de resistência foram de 17,2 MPa e 28,6 MPa aos 7 dias e 90 dias, respectivamente, números menores em comparação com os valores de referência de 19,1 MPa e 30,4 MPa.

Figura 16: Resultados dos ensaios de compressão

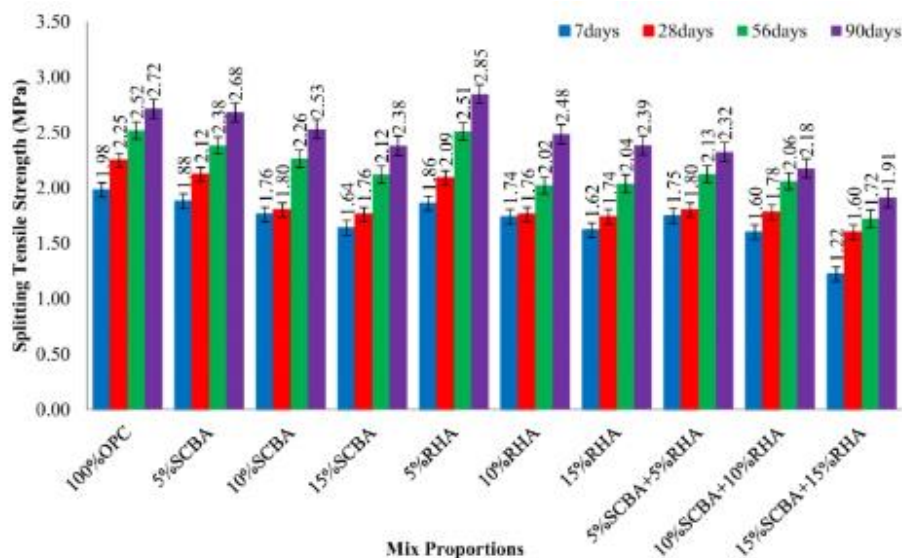


Fonte: Channa et al. (2021, p. 3561).

Na Figura 17, é mostrada a mistura de concreto incorporando diversas proporções de CBCA e RHA como materiais de substituição do OPC para determinar a resistência à tração à ruptura em diferentes idades. Os resultados revelam que a resistência à tração diminui com a adição de CBCA como substituto do OPC na mistura. A menor resistência à tração foi observada em 1,64 MPa, 1,76 MPa, 2,12 MPa e 2,38 MPa com 15% de CBCA como substituto do OPC após 7 dias, 28 dias,

56 dias e 90 dias, respectivamente, em comparação com os valores de referência de 1,98 MPa, 2,25 MPa, 2,52 MPa e 2,72 Mpa (Channa et al. 2021).

Figura 17: Resultados dos ensaios de tração.



Fonte: Channa et al. (2021, p. 3562).

Channa et al. (2021) destacam o impacto da adição de CBCA como substituto do OPC na redução tanto da resistência à compressão quanto da resistência à tração do concreto, sugerindo a necessidade de ajustes nas proporções e na formulação para mitigar esse efeito negativo.

Os resultados obtidos por Zaleski et al. (2019) mostram que as misturas com cura úmida apresentaram uma redução significativa na resistência à compressão uniaxial média quando comparadas com o teor de referência (0%). Para o teor adição de 10% de CBCA, houve um decréscimo de 32,53%, enquanto para o teor de 15%, a redução foi de 24,98%. Por outro lado, para as misturas com cura exposta, também foram observadas quedas nas resistências médias dos teores de 10% e 15%, em 22,86% e 14,86%, respectivamente, em comparação com a referência conforme a Figura 18.

Figura 18: Resultados dos ensaios de compressão.

Teor de substituição (%)	Cura	Resistência à compressão uniaxial média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
0	Úmida	45,19	0,35	0,77
0	Exposta	45,62	1,05	2,31
10	Úmida	30,49	2,90	9,06
10	Exposta	35,19	2,39	6,84
15	Úmida	33,90	0,76	2,25
15	Exposta	38,84	3,97	10,21

Fonte: Zaleski et al. (2019, p. 245).

Os resultados de Zaleski et al. (2019) indicam que a adição de certos elementos nas misturas pode impactar negativamente na resistência à compressão, especialmente quando submetidas a diferentes condições de cura. Essa análise sugere a importância de considerar não apenas os materiais adicionados, mas também as condições de cura durante o processo de formulação do concreto, visando garantir a qualidade e durabilidade adequadas do material final.

No estudo realizado por Teodoro et al. (2013), os corpos-de-prova com o Concreto Referência (CR) e com adição de CBCA foram submetidos a ensaios de resistência à compressão axial aos 2, 7 e 28 dias para determinar sua resistência. Os valores obtidos revelam um aumento gradual na resistência ao longo dos testes, como mostrado na Figura 19. Tanto o traço do CR quanto o traço com 5% de aditivo pozolânico apresentaram resultados satisfatórios nos testes, porém a adição em 5% de CBCA não proporcionou um concreto com maior resistência do que o C, além disso, os traços com 10% e 15% de aditivo mostraram resultados abaixo da meta esperada.

Figura 19: Resultados dos ensaios de compressão.

Característica	Traços			
	CA0	CA5	CA10	CA15
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>				
03 dias	17,3 a	16,6 a	12,2 b	9,6 b
07 dias	21,8 a	20,6 a	15,6 b	12,3 b
28 dias	26,0 a	25,6 a	19,4 b	16,9 b

Fonte: Teodoro et al. (2013, p. 29).

Teodoro et al. (2013) relata que cimentos com aditivos pozolânicos podem apresentar um ganho de resistência mais lento em comparação com o cimento de

controle. Essa característica pode explicar os resultados observados nos traços com maiores teores de aditivo, nos quais a resistência à compressão ficou aquém das expectativas. Essa análise destaca a importância de considerar o tempo de ganho de resistência ao utilizar aditivos pozolânicos na formulação do concreto, garantindo que os traços atinjam as metas de resistência desejadas dentro do prazo esperado.

O estudo realizado por Delalibera et al. (2014) investigou a substituição do cimento Portland pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) em diferentes teores e seus efeitos na resistência à compressão do concreto contendo substituições de 0, 10, 20 e 30% de CBCA “in natura”. Os resultados revelaram que a resistência à compressão diminuiu à medida que a quantidade de CBCA substituindo o cimento Portland aumentou, mesmo com o aumento da idade do concreto. Notou-se que aos 28 dias, a redução da resistência foi acentuada quando a substituição de CBCA foi maior que 10%. Porém, para substituições de 10%, os valores de resistência à compressão foram semelhantes aos da amostra controle.

A análise estatística demonstrou que, em qualquer traço, a substituição parcial de cimento Portland por 10% de CBCA apresentou resistência à compressão estatisticamente semelhante à amostra controle nos 14 e 28 dias de cura. Reduções mais significativas na resistência à compressão foram observadas nas substituições de 20% e 30% de CBCA, especialmente nos traços médio e rico, conforme pode ser observado na Figura 20 (Delalibera et al. 2014).

Figura 20: Resultados dos ensaios de compressão

Traço	Pobre (a/c = 0,65)			Médio (a/c = 0,63)			Rico (a/c = 0,45)		
	7	14	28	7	14	28	7	14	28
0% (Controle)	14,24 a	15,59 a	17,70 a	15,30 a	16,58 a	17,87 a	24,96 a	26,01 a	29,83 a
10%	10,80 b	14,18 a	15,67 a	13,74 a	16,29 a	17,54 a	23,66 ab	24,91 a	28,43 a
20%	7,39 c	9,01 b	8,26 b	10,31 b	12,26 b	12,81 b	18,14 ab	21,22 b	23,62 b
30%	5,70 c	7,45 b	7,00 b	8,49 b	9,58 c	11,09 b	15,44 b	18,04 b	18,37 c

Fonte: Delalibera et al. (2014, p. 37).

Os resultados observados por Delalibera et al. (2014) indicam que as maiores reduções na resistência à compressão ocorreram nas substituições de cimento Portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) nos teores de 20% e 30%.

Isso significa que, à medida que a quantidade de CBCA aumentava nessas proporções, a resistência à compressão do concreto diminuía de forma mais significativa. Por outro lado, o teor de substituição de 10% mostrou-se estatisticamente semelhante à referência. Isso sugere que, com uma substituição de CBCA de 10%, a resistência à compressão do concreto permaneceu próxima dos valores obtidos com o cimento Portland puro, indicando que essa quantidade de substituição não teve um impacto significativo na resistência à compressão.

Ao calcular o Índice de Atividade Pozolânica (IAP), constatou-se que as amostras com 10% de substituição de CBCA apresentaram valores superiores a 75%, indicando um efeito pozolânico. No entanto, amostras com substituições de 20% e 30% não mostraram ganhos significativos de resistência, apesar de terem IAPs superiores a 75%. Isso sugere que a formação de silicatos de cálcio hidratado pelas reações entre os óxidos presentes na CBCA e o hidróxido de cálcio do cimento não foi suficiente para alcançar ou se aproximar da resistência à compressão das amostras de referência (Delalibera et al. 2014).

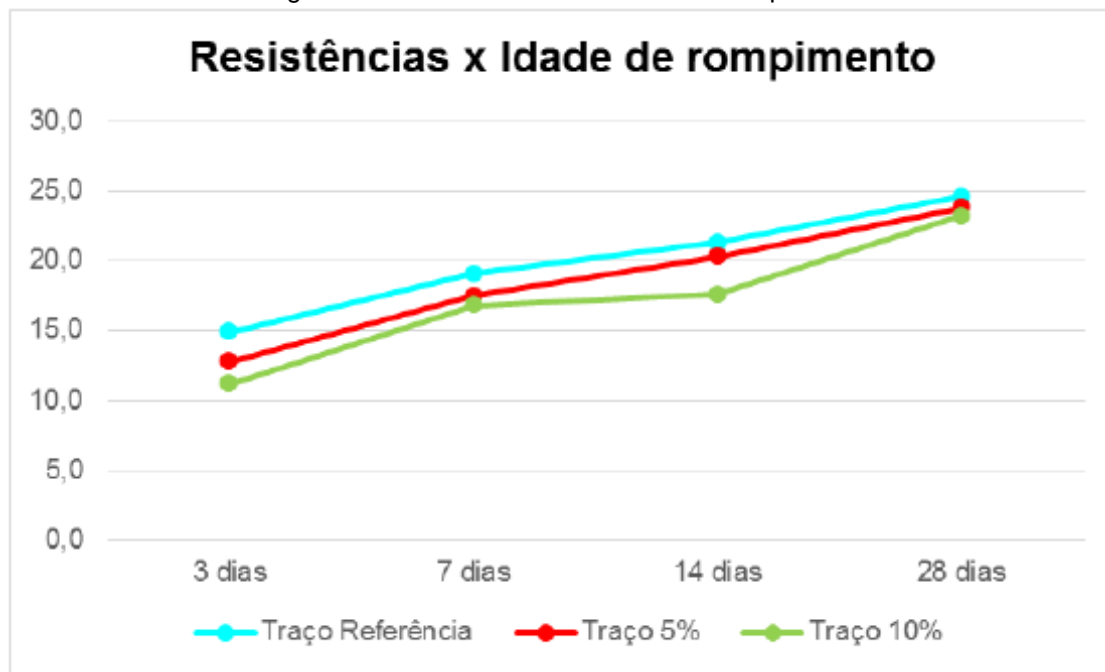
Esses resultados destacam a importância da dosagem adequada da CBCA no concreto para garantir que as propriedades mecânicas não sejam comprometidas. Embora a substituição de 10% de CBCA tenha demonstrado potencial para melhorar a resistência à compressão, substituições mais altas podem resultar em reduções significativas na resistência, especialmente se não houver uma reação pozolânica eficaz (Delalibera et al. 2014).

Os resultados do estudo conduzido por Lima (2018) destacam que o traço referência demonstrou um crescimento constante na resistência à compressão ao longo do tempo. Em contraste, quando comparado com os traços que continham substituições de 5% e 10%, observou-se uma pequena perda de resistência. Essa perda foi mais significativa no traço com 10% de substituição, indicando que quanto maior a substituição, menor será a resistência à compressão.

Analisando o comportamento das resistências em relação à idade de rompimento para cada traço, nota-se que o traço referência atendeu aos critérios estabelecidos, enquanto os outros dois traços apresentaram uma queda na resistência. No entanto, nenhum dos traços alcançou o valor pré-estabelecido durante

o cálculo do traço para  $F_{ck}$ , que considerava a resistência a ser alcançada de 26,6 MPa, conforme mostrado na Figura 21 (Lima, 2018).

Figura 21: Resultados dos ensaios de compressão



Fonte: Lima (2018, p. 53)

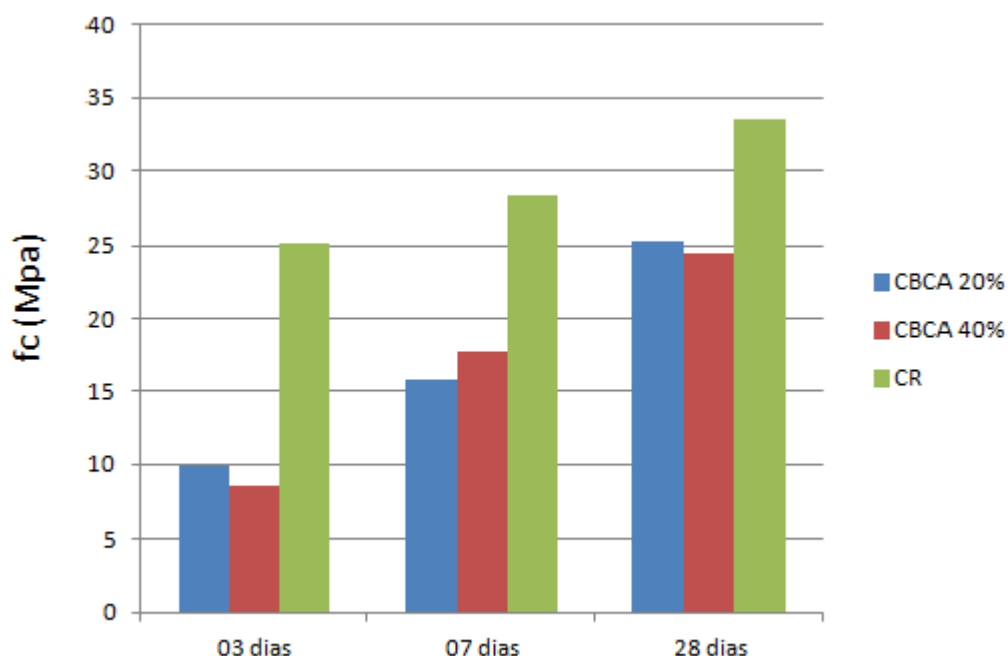
Lima (2018) evidencia que o desempenho das curvas de resistência para os traços de 5% e 10% de substituição é semelhante, com um crescimento gradual, seguido por resistências mais próximas e constantes, e posteriormente um novo aumento nas resistências. Esses resultados ressaltam a importância de considerar cuidadosamente os efeitos da substituição de materiais na formulação do concreto, especialmente em relação às metas de resistência desejadas.

Os resultados do estudo conduzido por Sessa (2013) revelam algumas observações importantes sobre a influência da CBCA na resistência do concreto ao longo do tempo. Inicialmente, foi constatado que quanto maior o teor de CBCA presente na mistura, maior é o retardo no tempo de pega do concreto, como evidenciado pela impossibilidade de realização do ensaio de compressão para a mistura com 40% de CBCA devido à fluidez ainda presente no concreto.

No primeiro dia, o concreto de referência apresentou uma resistência de 14,52 MPa, enquanto o concreto com 20% de CBCA atingiu apenas 1,59 MPa conforme a Figura 22. Isso confirma resultados de estudos anteriores, indicando que a influência

da CBCA na resistência do concreto não é imediata e se desenvolve ao longo do tempo (Sessa, 2013).

Figura 22: Resultados dos ensaios de compressão.



Fonte: Sessa (2013, p. 53).

Aos 28 dias, a mistura com 20% de CBCA alcançou aproximadamente 75% da resistência do concreto de referência na mesma idade, enquanto o concreto com 40% de CBCA atingiu cerca de 73%. Esse resultado pode ser atribuído às diferenças nas tensões superficiais entre a CBCA e o cimento, embora tenha ocorrido uma interação física entre os componentes do concreto, indicando um empacotamento das partículas (Sessa, 2013).

No entanto, em comparação com o concreto de referência, ambas as misturas com CBCA apresentaram resistências significativamente inferiores em todas as idades avaliadas, sugerindo uma baixa atividade pozolânica da cinza. Espera-se que em idades mais avançadas, essa discrepância possa ser minimizada (Sessa, 2013).

Segundo Sessa, (2013) o concreto de referência alcança boa parte de sua resistência total no início do período de cura, resultando em uma taxa de crescimento de resistência menor em comparação com as misturas contendo CBCA. Além disso, observou-se que o concreto com 20% de CBCA apresentou a maior taxa de crescimento de resistência entre as misturas avaliadas. Essas observações destacam



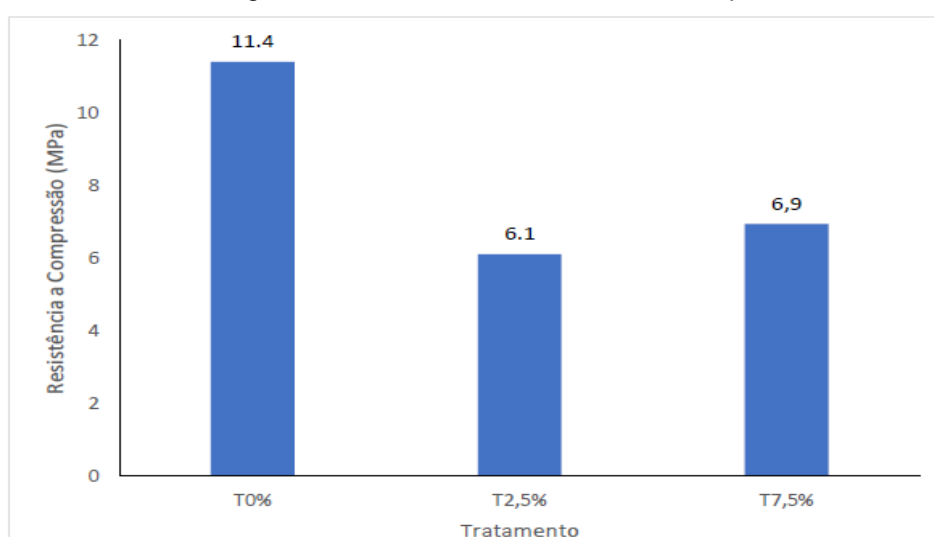
a complexidade da interação entre os materiais constituintes do concreto e a importância de considerar cuidadosamente os efeitos da substituição de materiais na formulação do concreto.

Os dados analisados do estudo de Oliveira et al. (2023) indicam que a dosagem da cinza de bagaço de cana-de-açúcar exerce uma influência direta na resistência mecânica do concreto. Contudo, é fundamental considerar outros aspectos que podem ter contribuído para a resistência inferior à esperada, que era de 25 MPa, conforme evidenciado na Figura 23.

Uma possível explicação reside na dosagem inadequada da cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Um excesso ou uma insuficiência na dosagem podem comprometer as propriedades mecânicas do concreto, resultando em uma resistência abaixo do esperado (Oliveira et al., 2023).

Outro fator a ser considerado é a influência da cura inadequada nos resultados. A falta de tempo de cura adequado ou a ausência de umidade adequada durante o processo de cura podem resultar em um concreto com baixa resistência. A cura adequada é crucial para o desenvolvimento da resistência do concreto (Oliveira et al., 2023).

Figura 23: Resultados dos ensaios de compressão.



Fonte: Oliveira et al. (2023, p. 14).

Além disso, outros fatores, como o teor de carbono não queimado na cinza, a relação água/cimento e a finura e reatividade da cinza, podem ter contribuído para a resistência inferior. Esses aspectos devem ser cuidadosamente considerados durante o processo de dosagem e produção do concreto (Oliveira et al., 2023).

Segundo Oliveira et al. (2023), para alcançar os resultados desejados de resistência, é recomendado realizar estudos mais aprofundados, ajustar a dosagem da cinza de bagaço de cana-de-açúcar, garantir uma cura adequada e verificar a qualidade dos materiais utilizados na mistura. Ao abordar essas questões, é possível minimizar os fatores que podem impactar negativamente na resistência do concreto com cinza de bagaço de cana-de-açúcar e alcançar melhores resultados.

## **CAPÍTULO 4: DISCUSSÃO**

A análise dos resultados dos estudos destaca várias descobertas significativas sobre o uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e outros materiais suplementares na produção de concreto. A seguir apresentam-se algumas observações e conclusões derivadas desses estudos:

### **- Melhoria na Resistência Mecânica**

Os estudos realizados demonstram consistentemente que a adição de CBCA promove melhorias significativas na resistência à compressão e tração do concreto, indicando um potencial promissor para sua aplicação em diversas obras civis.

Rao et al. (2021) corroboram essa constatação ao encontrarem melhorias na resistência à compressão e tração do concreto com a incorporação de nanosílica, escória de alto-forno moída (GGBS) e cinzas provenientes do bagaço de cana-de-

açúcar. Almeida et al. (2019) destacam ainda o potencial da utilização do subproduto da produção de Areia da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (ACBC) para aprimorar a resistência à compressão do concreto em diversas condições, evidenciando a diversidade de materiais suplementares disponíveis para esse fim.

Fernandes et al. (2015) sugerem que a adição de 20% de CBCA parece ser uma opção viável para melhorar tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração por compressão diametral do concreto, sem comprometer significativamente o desempenho em relação à amostra de referência. Este resultado sugere uma proporção otimizada de substituição para obter ganhos significativos de resistência.

É importante notar que o tempo de cura e as proporções de substituição de materiais suplementares exercem influência direta sobre o aumento da resistência, sendo observados incrementos após períodos prolongados de cura. Berenguer et al. (2021) observaram aumentos significativos na resistência à compressão axial e nas propriedades mecânicas gerais do concreto com a adição de CBCA, com um aumento de resistência de até 24% após 365 dias de cura. Esses resultados reforçam a importância da cura adequada para o desenvolvimento das propriedades do concreto.

Por fim, Zaleski et al. (2019) ressaltam a relevância de considerar não apenas os materiais adicionados, mas também as condições de cura durante o processo de formulação do concreto, destacando a necessidade de uma abordagem integrada para garantir o máximo desempenho do material final. Essas conclusões sublinham a importância de uma cuidadosa seleção e dosagem de materiais suplementares, juntamente com práticas adequadas de cura, para otimizar as propriedades do concreto e garantir sua adequação para diferentes aplicações na construção civil.

#### **- Redução da Melhoria na Resistência Mecânica**

A redução na melhoria da resistência mecânica do concreto é uma questão crítica a ser considerada durante o processo de substituição de materiais na sua formulação.

Lima (2018) destacou que o desempenho das curvas de resistência para traços de substituição de 5% e 10% é comparável, sugerindo a necessidade de uma análise criteriosa dos efeitos da substituição de materiais na formulação do concreto,

especialmente em relação às metas de resistência desejadas. Este estudo ressalta que, conforme aumenta a taxa de substituição, há uma tendência de redução na resistência à compressão, enfatizando a importância de considerar este aspecto na concepção de misturas concretas.

Delalibera et al. (2014) observaram que as maiores diminuições na resistência à compressão foram registradas com substituições de cimento Portland por cinzas provenientes do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) nos teores de 20% e 30%. Este resultado evidencia a relevância de uma dosagem adequada do CBCA para evitar comprometimentos nas propriedades mecânicas do concreto, os quais podem resultar em reduções significativas na resistência, especialmente na ausência de uma reação pozolânica eficaz.

Estes estudos enfatizam a importância de uma abordagem cuidadosa na seleção e dosagem dos materiais substitutos, visando equilibrar a busca por redução de impacto ambiental com a manutenção das propriedades mecânicas essenciais do concreto. Estes cuidados são cruciais para garantir a qualidade e a durabilidade das estruturas de concreto em diversas aplicações.

### **- Influência da Composição e Interações dos Materiais**

A influência da composição e interações dos materiais suplementares no concreto é um tema de grande relevância na engenharia de materiais de construção. A incorporação de materiais como escória granulada de alto-forno moída (GGBS), nanosílica e outros aditivos desempenha um papel crucial na melhoria das propriedades mecânicas do concreto.

Landa Ruiz et al. (2021) ressaltam a importância de uma seleção criteriosa das proporções de substituição dos materiais suplementares, destacando que essa escolha pode otimizar significativamente o desempenho do concreto em termos de resistência mecânica. Dineshkumar e Balamurugan (2021) corroboram essa visão ao destacarem os benefícios obtidos através da substituição parcial de CBCA no

concreto, especialmente em níveis entre 10% e 20%, resultando em melhorias substanciais tanto na resistência à compressão quanto à tração.

As interações entre os materiais desempenham um papel crucial no desenvolvimento das propriedades do concreto. O fenômeno sinérgico entre CBCA e outros resíduos pode resultar em aumentos significativos na resistência global do material. Sessa (2013) observou que o concreto contendo 20% de CBCA apresentou a mais alta taxa de crescimento de resistência entre as misturas com CBCA avaliadas, destacando a complexidade das interações entre os materiais constituintes do concreto e a importância de considerar cuidadosamente os efeitos da substituição de materiais na formulação do concreto.

Estudos como os de Ferreira (2015) e Lopes et al. (2018) evidenciam a complexidade das interações entre diferentes materiais e suas implicações nas propriedades mecânicas do concreto. A compreensão dessas interações é fundamental para otimizar as propriedades do concreto e explorar o potencial promissor de resíduos como substitutos na produção de concreto. Essas pesquisas ressaltam a importância de considerar diversas variáveis na formulação de misturas de concreto, visando alcançar os resultados desejados em termos de resistência e durabilidade do material.

#### **- Necessidade de Pesquisa Adicional**

Os estudos mencionados, com destaque para as contribuições de Oliveira et al. (2023), ressaltam a premente necessidade de pesquisa adicional no campo da tecnologia do concreto. É evidente que há lacunas significativas no entendimento das interações entre os materiais e suas implicações nas propriedades do concreto, destacando a importância de estudos mais aprofundados para preencher essas lacunas.

É imperativo que futuras pesquisas se concentrem não apenas na compreensão das interações entre os materiais, mas também na otimização da dosagem de CBCA, na implementação de práticas de cura adequadas e na verificação da qualidade dos materiais utilizados. Esses ajustes são cruciais para maximizar os benefícios do uso de CBCA no concreto, promovendo não apenas a resistência, mas também a durabilidade e a qualidade do material final.

Além disso, os alertas emitidos por Channa et al. (2021) sobre a necessidade de ajustes nas proporções e formulação para mitigar potenciais reduções na resistência, quando da adição de alguns substitutos, reforçam a urgência de pesquisa adicional para resolver essas questões.

As conclusões de Teodoro et al. (2013) e Oliveira et al. (2023) destacam a importância crítica de estudos mais aprofundados, ajustes na dosagem e cuidados durante a cura para garantir os resultados desejados em termos de resistência e qualidade do concreto. Esses apelos por pesquisa adicional são fundamentais para avançar no conhecimento e na prática da produção de concreto, atendendo aos requisitos crescentes e cada vez mais rigorosos da indústria da construção civil.

Em resumo, os estudos revisados destacam o potencial das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como um aditivo eficaz para melhorar as propriedades mecânicas do concreto, mas também apontam para a importância de abordagens cuidadosas na formulação e execução para garantir resultados ótimos. Essas descobertas coletivas fornecem *insights* valiosos para a formulação e produção de concretos de alto desempenho, destacando a importância do uso sustentável de materiais suplementares na construção civil. No entanto, também apontam para a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento para otimizar a eficácia e a sustentabilidade desses materiais na indústria da construção.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A utilização de resíduos agroindustriais, como o bagaço de cana-de-açúcar, na produção de concreto representa uma abordagem promissora e sustentável para a indústria da construção. Esta revisão sistemática demonstrou que a incorporação desse resíduo no concreto pode não apenas mitigar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado, mas também melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade do material. Com os estudos analisados foi possível afirmar que a incorporação do bagaço de cana-de-açúcar pode melhorar diversas propriedades do concreto, incluindo resistência mecânica, durabilidade e retração, enquanto reduz a quantidade de resíduos agroindustriais destinados a aterros sanitários. Além disso, observa-se que a utilização do bagaço de cana-de-açúcar pode contribuir para a sustentabilidade da indústria da construção civil, promovendo a

adoção de práticas mais ecológicas e mitigando o impacto ambiental associado à produção de concreto convencional. No entanto, é essencial ressaltar a importância da pesquisa contínua para otimizar as proporções e técnicas de incorporação, garantindo a segurança estrutural e ambiental do concreto produzido. Em última análise, a integração de resíduos agroindustriais como o bagaço de cana-de-açúcar no concreto não apenas abre novas oportunidades para a indústria da construção, mas também contribui significativamente para a sustentabilidade e eficiência dos processos produtivos, além de apresentar o CBCA como um recurso renovável e sustentável na produção de concreto, apontando para oportunidades significativas de inovação e desenvolvimento na indústria da construção civil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. C. R. et al. Use of sugarcane bagasse ash sand (SBAS) as corrosion retardant for reinforced Portland slag cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 72–82, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.217>. Acesso em: 23 out. 2023.

BERENQUER, R. et al. Thermodynamic, microstructural and chemometric analyses of the reuse of sugarcane ashes in cement manufacturing. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105350, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105350>. Acesso em: 23 out. 2023.

BRASIL. - **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos** – Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em 03 jun. 2022.

CHANNA, S. H. et al. Short-term analysis on the combined use of sugarcane bagasse ash and rice husk ash as supplementary cementitious material in concrete production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 3, p. 3555–

3564, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15877-0>. Acesso em: 23 out. 2023.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar: material pozzolânico de alto potencial para países tropicais. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 1, p. 50–67, mar. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952010000100004>. Acesso em: 23 out. 2023.

DELALIBERA, R. G. et al. Análise da viabilidade da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento Portland (doi:10.5216/reec.V9i3.32023). **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, n. 3, 24 nov. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v9i3.32023>. Acesso em: 30 out. 2023.

DINESHKUMAR, R.; BALAMURUGAN, P. Behavior of high-strength concrete with sugarcane bagasse ash as replacement for cement. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 6, n. 2, p. 63, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00450-4>. Acesso em: 23 out. 2023.

FERNANDES, S. E. et al. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 4, p. 909–923, dez. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150004.0096>. Acesso em: 30 out. 2023.

FERREIRA, R. T. L. Influência da requeima na pozzolanidade de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de diferentes características. 20 jan. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-A5AFER>. Acesso em: 30 out. 2023.

FIESP/CIESP. **AMPLIAÇÃO DA OFERTA DE ENERGIA ATRAVÉS DA BIOMASSA**. , 2001. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=4505>. Acesso em: 26 out. 2023.

IBGE. **Produção de Cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>. Acesso em: 24 out. 2023.

JUNIOR, Silvio Vaz. - **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável**. – Brasília, DF - Embrapa Agroenergia, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126255/aproveitamento-de-residuos-agroindustriais-uma-abordagem-sustentavel>. Acesso em 03 jun. 2022.

LANDA-RUIZ, L. et al. Physical, Mechanical and Durability Properties of Ecofriendly Ternary Concrete Made with Sugar Cane Bagasse Ash and Silica Fume. **Crystals**, v. 11, n. 9, p. 1012, 24 ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cryst11091012>. Acesso em: 30 out. 2023.

LIMA, Alef Junior Oliveira et al. **ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**. Trabalho de



Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas – TO, 2018.

LOPES, J.; RUDNICK, T.; HUMBERTO MARTINS, C. Utilização de resíduos industriais para produção de concreto sustentável [Use of industrial waste for the production of sustainable concrete]. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, 26 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v14i2.49261>. Acesso em: 30 out. 2023.

MORETTI, J. P. Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias. 23 fev. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9935>. Acesso em: 23 out. 2023.

NAYAK, A.; BHUSHAN, B. An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. **Journal of Environmental Management**, v. 233, p. 352–370, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.041>. Acesso em: 30 out. 2023.

OLIVEIRA ET AL, J. P. et al. SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR CINZAS DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR EM CONCRETO. 28 jun. 2023. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/34322>. Acesso em: 23 out. 2023.

RAO, M. S. C.; VIJAYALAKSHMI, M. M.; PRAVEENKUMAR, T. R. Behaviour of green concrete (blended concrete) using agro-industrial waste as partial replacement of cement along with nanoparticles. **Applied Nanoscience**, v. 13, n. 3, p. 2285–2293, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01917-1>. Acesso em: 30 out. 2023.

SAMPAIO, Z. L. M. ET AL. **Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos**. , 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/MfYpn9jKjmy4BTvkKrH4sfp/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 23 out. 2023.

SESSA, T. DA C. Avaliação da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concreto usando construções residenciais de menor impacto. abr. 2013. Disponível em: <http://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9570>. Acesso em: 23 out. 2023.

SNIC. **SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - RELATORÍO ANUAL**. 2019. Disponível em: [http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2019.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf). Acesso em: 24 out. 2023.

SNIC – **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento** – Disponível em: <http://snic.org.br/sustentabilidade-indicadores.php>. Acesso em 28 out. 2023.

TEODORO, P. E. et al. Comportamento físico-mecânico do concreto com substituição de cimento portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 6, n. 2, 16 fev. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v6i2.22022>. Acesso em: 23 out. 2023.

YAMANAKA, Eric Seiti. **Cultivo, extração e beneficiamento do açaí orgânico**. UNESP - SIRT - Sistema Integrado de Respostas Técnicas. 2012. Disponível em: <https://www.ciorganico.agr.br/wp-content/uploads/2012/10/A%C3%87AI-ORGANICO.pdf>. Acesso em 03 jun. 2022.

ZALESKI, A. et al. Paredes de concreto: estudo da utilização de cinza do bagaço da cana-deaçúcar em concretos autoadensáveis. **ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO**, v. 6, p. 239–254, 2019. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3401>. Acesso em: 23 out. 2023.