

**FACULDADE IMED
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
EM ENGENHARIA CIVIL**

ENG. CIVIL MATEUS ARLINDO DA CRUZ

**CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
CALCINADO SOB DIFERENTES TEMPERATURAS PARA
APLICAÇÃO EM GEOPOLÍMEROS**

Passo Fundo

2021

ENG. CIVIL MATEUS ARLINDO DA CRUZ

**CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
CALCINADO SOB DIFERENTES TEMPERATURAS PARA APLICAÇÃO EM
GEOPOLÍMEROS**

Dissertação apresentada ao Programa de pós-Graduação Stricto Sensu – Mestrado em Engenharia Civil – da IMED, como requisito para obtenção do grau de Mestre no curso de Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Stricto Sensu em Engenharia Civil da Faculdade IMED.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida da Silva

Passo Fundo

2021

CIP – Catalogação na Publicação

C957c CRUZ, Mateus Arlindo da

Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar calcinado sob diferentes temperaturas para aplicação em geopolímeros / Mateus Arlindo da Cruz. – 2021.

68 f., il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade IMED, Passo Fundo, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida da Silva.

1. Geopolímeros. 2. Calcinação – Temperatura. 3. Engenharia Civil. 4. Cana-de-açúcar – Bagaço. I. SILVA, Rodrigo de Almeida da, orientador. II. Título.

CDU: 628.4

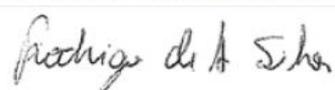
ENG. CIVIL MATEUS ARLINDO DA CRUZ

**CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
CALCINADO SOB DIFERENTES TEMPERATURAS PARA APLICAÇÃO EM
GEOPOLÍMEROS**

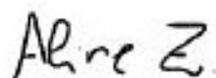
Dissertação apresentada ao Programa de pós-Graduação Stricto Sensu – Mestrado em Engenharia Civil – da IMED, como requisito para obtenção do grau de Mestre no curso de Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Stricto Sensu em Engenharia Civil da Faculdade IMED.

Passo Fundo, 13 de Julho de 2021.

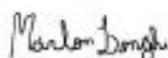
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rodrigo de Almeida da Silva – IMED



Prof. Dra. Aline Zanchet – Externo



Prof. Dr. Márlon Augusto Longhi – UFRGS



Prof. Dr. Richard Thomas Lermen – IMED

Aos meus pais, Antônio e Teresinha por sempre estarem ao meu lado apoiando nos momentos mais difíceis.

A minha namorada Andressa, todo o meu amor e carinho pelos incentivos, apoio e compreensão.

A todos que de uma forma ou outra torceram por mim, serei eternamente grato!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me acompanhar sempre, no percurso diário de 180km de minha residência até a universidade, zelando e protegendo durante estes dois anos. A minha família, meu pai Antônio e minha mãe Teresinha, por fazerem o possível e o impossível para dar o melhor para mim e minha irmã, serei eternamente grato. Minha namorada Andressa, por todo carinho, compreensão, incentivo e paciência. À vocês a minha eterna gratidão.

A minha orientadora, Aline Zanchet, agradeço pelo afinco com o trabalho, sua colaboração foi vital para a realização desta pesquisa. Aos demais professores do programa, pelas valiosas contribuições e por sanar dúvidas que se fizeram presentes. Aos funcionários do laboratório de Arquitetura e Engenharia Civil – IMED, que durante o período de moldagem e ensaios se fizeram presente.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

RESUMO

A busca por materiais menos poluentes ao meio ambiente nos últimos anos vem se intensificando, neste sentido os geopolímeros surgem como um material mais ambientalmente amigável. Por isso, o presente trabalho tem como objeto caracterizar as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar calcinadas em diferentes temperaturas para aplicação em geopolímeros. O bagaço *in natura* da cana-de-açúcar (CBC) foi coletado no município de Porto Xavier no estado do Rio Grande do Sul. Em um primeiro momento, os resíduos foram calcinados nas temperaturas de 500°C, 600°C, 700°C e 800°C, por um período de 1 hora. Após os mesmos passaram por análises com o objetivo de caracteriza-lo, as análises realizadas foram: difração de raio-x (DRX), análise termogravimétrica (TGA), reatividade pozolânica, área superficial e microscopia eletrônica de varredura (MEV). De posse dos resultados das análises iniciais, mudou-se o processo de calcinação do bagaço, utilizando uma pré-calcinação na temperatura de 400°C, por um período de 1 hora, e em seguida calcinando os resíduos mais uma vez nas temperaturas de 500, 600 e 700°C, por um período de mais 1 hora. As novas cinzas geradas foram mais uma vez caracterizadas pelos ensaios de DRX, espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), reatividade pozolânica e área superficial. Após a caracterização das CBC os geopolímeros foram dosados utilizando em sua composição silicato de sódio alcalino (Na_2SiO_3), juntamente com o hidróxido de sódio (NaOH), em diferentes proporções de cinza de cana-de-açúcar e metacaulim. A cura dos geopolímeros foi por meio de cura úmida. A análise de resistência a compressão axial foi realizada nas idades de cura de 7, 14 e 28 dias. Por meio das análises de caracterização percebeu-se que as cinzas oriundas pelo segundo método e calcinadas na temperatura de 500°C foram as que obtiveram melhores índices para materiais precursores. Já os geopolímeros produzidos com cana-de-açúcar e metacaulim tiveram uma queda na resistência a compressão, quando comparados aos geopolímeros produzidos apenas com o precursor metacaulim. Embora tenha ocorrido uma pequena queda no valor de resistência a compressão as cinzas de cana-de-açúcar se mostraram uma excelente opção de precursor, combinada com metacaulim para produção de geopolímeros.

Palavras-chave: Geopolímeros, Bagaço de cana-de-açúcar, Temperatura de calcinação.

ABSTRACT

The search for less polluting materials has been intensified over the last years, therefore geopolymers appear as a more environmentally friendly type of material. Thus, this work's aim is to characterize sugar cane bagasse ashes calcinated in different temperatures for geopolymer application. The raw sugar cane bagasse (SCBA) was collected in the municipality of Porto Xavier, which is located in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. First, the residue was calcinated at 500°C, 600°C, 700°C and 800°C within one hour. After that, it was analyzed for characterization purposes using x-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), pozzolanic reactivity, surface area analysis and scanning electron microscopy (SEM). Following the initial results, the bagasse calcination process was changed. There was an hour-long pre-calcination at a temperature of 400°C, then the residue was calcinated once again at 500°C, 600°C and 700°C for one more hour. The newly generated ashes were characterized once again in XRD, x-ray fluorescence spectrometry (XRF), pozzolanic reactivity and surface area analysis. After the SCBA characterization, the geopolymers were dosed in a composition containing alkaline sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) in different proportions of sugar cane ash and metakaolin. The geopolymers were cured using a wet curing method. The resistance to axial compression was analyzed after 7, 14 and 28 days along the curing process. The characterization analysis showed that the ashes obtained in the second method which were calcinated at 500°C had better rates for precursor materials. On the other hand, the geopolymers produced from sugar cane and metakaolin had less resistance to compression comparing to the geopolymers which had only metakaolin as a precursor. Despite the slight decrease in resistance to compression rates, sugar cane ash proved to be an excellent precursor option combined with metakaolin in the production of geopolymers.

Key-words: Geopolymers, Sugar Cane Bagasse Ash, Calcination Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Impactos ambientais causados pela construção civil.....	17
Figura 02 – Modelo de Glukhovsky	21
Figura 03 – Estrutura molecular típica de um geopolímero.....	22
Figura 04 – Edifício construído sem uso de concreto.....	23
Figura 05 – Aeroporto feito com compósito ativado alcalinamente	24
Figura 06 – Processo de geopolimerização	29
Figura 07 – DRX de uma amostra de cinza de cana-de-açúcar.....	38
Figura 08 – Coleta do bagaço de cana-de-açúcar	42
Figura 09 – Metodologia aplicada no presente estudo.....	44
Figura 10 – Cinzas de resíduos de cana-de-açúcar calcinadas, a) 500°C, b) 600°, c) 700°C e d) 800°C.	46
Figura 11 – Corpos de prova dos geopolímeros	53
Figura 12 – Corpos de prova dos geopolímeros envelopados	53
Figura 13 – Análise termogravimétrica para o bagaço <i>in natura</i>	55
Figura 14 – Curvas TG e derivada para CBC 500°C.....	56
Figura 15 – Curvas TG e derivada para CBC 600°C.....	57
Figura 16 – Curvas TG e derivada para CBC 700°C.....	57
Figura 17 – Curvas TG e derivada para CBC 800°C.....	58
Figura 18 – Difratogramas das cinzas de cana-de-açúcar	60
Figura 19 – MEV das CBC em escala de 20µm.....	62
Figura 20 – MEV das CBC em escala de 2µm.....	63
Figura 21 – MEV das CBC sob escala de 2µm	64
Figura 22 – MEV das CBC sob escala de 1µm	65
Figura 23 – DRX realizado no metacaulim.....	67
Figura 24 – Difratogramas das cinzas de cana-de-açúcar	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Ensaio de compressão simples realizado por Liew <i>et al.</i> (2016).....	31
Gráfico 02 – Processo de calcinação adotado na presente pesquisa.....	49
Gráfico 03 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial simples.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Produção mundial de cana-de-açúcar.....	32
Tabela 02 – Produção agrícola brasileira.....	33
Tabela 03 – Comparação da composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.....	36
Tabela 04 – Uso de CBC em matrizes cimentícias.....	40
Tabela 05 – Formulação empregada na pasta geopolimérica.....	52
Tabela 06 – Perda de massa das CBC.....	59
Tabela 07 – Índice de atividade pozolânica.....	33
Tabela 08 – Área superficial da CBC's.....	65
Tabela 09 – Índice de atividade pozolânica.....	66
Tabela 10 – Composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.....	69
Tabela 11 – Composição química do metacaulim.....	70
Tabela 12 – Área superficial da CBC's.....	71
Tabela 13 – Resistência à compressão para a concentração de álcalis de 20% e módulo de sílica 1,0.....	71
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão.....	74

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Normas Brasileiras de Regulação
CBC	Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar
CV	Cinza Volante
DRX	Difração de raios-X
DTA	Análise térmica diferencial
DTG	Termogravimetria derivada
EDS	Analisador dispersivo em energia
FRX	Fluorescência de Raio X
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
M	Molaridade ou Mol/L
MK	Metacaulim
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
TGA	Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Problema e Justificativa	Erro! Indicador não definido.
1.2 Tema	19
1.3 Delimitação do Tema	19
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo Geral	20
1.4.2 Objetivos Específicos	20
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 Breve histórico sobre os geopolímeros	21
2.1.1 Aplicações dos geopolímeros	22
2.2 Matérias primas para produção de geopolímeros	24
2.2.1 Precursores	24
2.2.1.1 Metacaulim	24
2.2.1.2 Resíduos	26
2.2.2 Ativadores	28
2.2.2.1 NaOH	28
2.2.2.2 Silicato de sódio	28
2.3 Processo de geopolimerização	29
2.4 Cana-de-açúcar	32
2.4.1 Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar	34
2.4.1.1 Características das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar	35
3 METODOLOGIA	42
3.1 Materiais	42
3.1.1 Precursores	42
3.1.1.1 Bagaço de cana-de-açúcar	42
3.1.1.2 Metacaulim	43
3.1.2 Ativador	43
3.2 Métodos	43
3.2.1 Estudo Piloto	45
3.2.1.1 Calcinações do resíduo de cana-de-açúcar	45
3.2.1.2 Análise Termogravimétrica	46
3.2.1.3 Reatividade pozolânica	46

3.2.1.4 Difrações de raio-x	47
3.2.1.5 Microscopias eletrônica de varredura.....	48
3.2.1.6 Área superficial.....	48
3.2.2 Método de calcinação utilizado e Caracterizações.....	48
3.2.2.1 Calcinações do resíduo de cana-de-açúcar	48
3.2.2.2 Reatividade pozolânica	50
3.2.2.3 Difrações de raio-x	50
3.2.2.4 Espectrômetro de fluorescência de Raio-X (FRX).....	50
3.2.2.5 Área superficial.....	51
3.2.3 Ativação.....	51
3.2.4 Resistências a compressão simples.....	52
RESULTADOS.....	55
4.1 Estudos piloto	55
4.1.1 Análises termogravimétrica	55
4.1.2 Reatividade pozolânica	59
4.1.3 Difração de raio-x	60
4.1.4 Microscopia eletrônica de varredura	61
4.1.5 Área superficial.....	65
4.2 Método de calcinação e caracterização	66
4.2.1 Reatividade pozolânica	66
4.2.2 Difração de raio-x	67
4.2.3 Espectrômetro de fluorescência de raio-X (FRX)	69
4.2.4 Área superficial.....	70
4.3 Ensaio de resistência a compressão simples	71
4.3.1 Análise de variância (ANOVA)	73
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6.1 CONCLUSÕES	75
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	76
REFERÊNCIAS.....	77
APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO PARA O 62º IBRACON	86
APÊNDICE B – ARTIGO ACEITO PARA A REVISTA MÁTERIA	87
APÊNDICE C – ARTIGO PUBLICADO NO CINPAR 2021	88

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos negativos da atividade humana sobre o meio ambiente em que está inserido vem sendo estudado por pesquisadores ao longo dos anos. Estas ações são percebidas mais nitidamente nos últimos tempos, em que seus impactos causam sérios danos a população afetada.

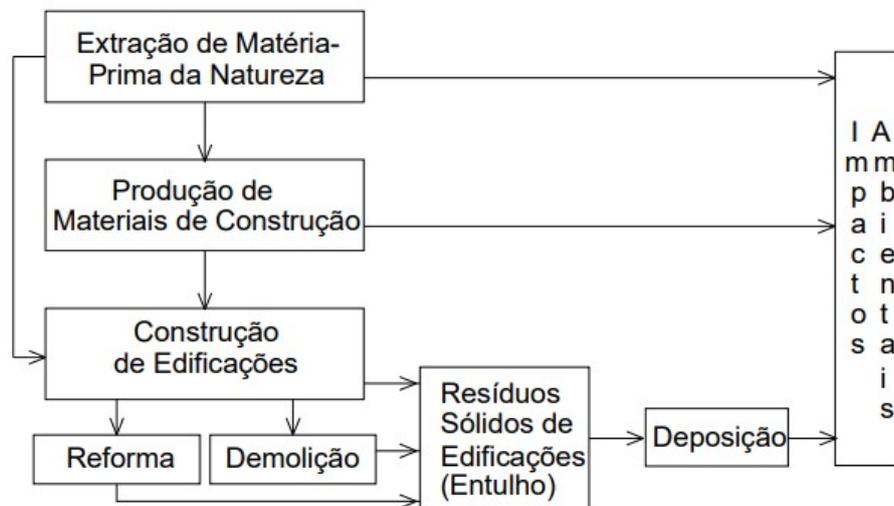
A sustentabilidade vem sendo cada vez mais discutida por diversos campos da sociedade, visando mitigar as ações do homem no meio ambiente. Para isso, uma das estratégias abordadas para possíveis soluções é a busca por construções mais sustentáveis, tendo como objetivo, a utilização responsável e consciente dos recursos de fonte não renovável.

A inserção de estratégias ainda em fase de projetos, que visam um sistema construtivo mais sustentável, é o meio mais eficaz para a diminuição da geração de resíduos na construção civil. Para que isso ocorra é necessário que o ambiente da construção civil seja repensado em sua totalidade de etapas, com qualidade no todo, equilibrando a produtividade, lucros, e a questão ambiental (OLIVEIRA, 2020).

Segundo Roth e Garcia (2009), a preocupação com o meio ambiente e com a sustentabilidade tem levado o setor da construção civil a realizar grandes mudanças em seus processos produtivos e construtivos, devido ao grande impacto causado pelas obras no meio ambiente. Algumas práticas da sociedade vêm contribuindo para esta mudança de hábitos no setor, visto que cada vez mais os consumidores buscam empresas e produtos que possuem certificação ambiental, responsabilidade social e ética. A Figura 01 ilustra os impactos ambientais causados pela construção civil.

No país, a indústria da construção civil é um dos setores mais relevantes para a economia. De acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no período de 2010, o Produto Interno Bruto (PIB) atingiu um valor de 13,1% no âmbito da construção civil, correspondendo o maior valor registrado desde os anos 70. O aumento do PIB impacta positivamente no campo da construção. Investimentos em infraestrutura mostram uma demanda a ser atendida, fazendo com que a indústria da construção civil cresça (FENILI, 2019).

Figura 01 – Impactos ambientais causados pela construção civil



Fonte: Roth e Garcia (2009).

Mediante a isso, é de suma importância a atenção quanto ao uso de materiais para evitar a exaustão de recursos naturais, sendo necessário a criação de novas abordagens visando a reutilização e recuperação de materiais. Pois é fato que um setor de extrema importância economicamente para o país não degrade tanto ao meio ambiente, sendo o setor de construção civil um dos maiores consumidores de matérias-primas, englobando ações com grande consumo de energia, onde aproximadamente 80% da energia usada na produção de um edifício é consumida na fabricação e transporte de materiais, além de originar poluição em aproximadamente todas as suas fases. (OLIVEIRA, 2018).

Contudo, a estimativa é que este meio seja responsável por produzir aproximadamente 40% dos resíduos gerados em toda a economia, 75% de todo o resíduo sólido, consumir 2/3 da madeira natural extraída, e por fazer o dispêndio de 20% a 50% dos recursos naturais totais extraídos no planeta (ALBUQUERQUE, SANTANA, 2018). Dentre os materiais mais consumidos no âmbito da construção civil se destaca o concreto, sendo o segundo material mais consumido no mundo (VAN DEVENTER; PROVIS; DUXSON, 2012).

Dentre os materiais que constituem o concreto, se destaca o cimento, sendo este o material responsável pelas principais propriedades do concreto. Segundos dados do Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2021), a indústria brasileira de cimento produziu e vendeu um montante total de 60,8 milhões de

toneladas de cimento (incluindo as importações), o que corresponde que a cada dia útil foram consumidas 208,4 mil toneladas de cimento.

O processo de fabricação do cimento consiste no consumo de elevadas quantidades de matérias-primas, combustíveis, bem como eletricidade, ar e água, visando o aquecimento da mistura de calcário, argila e bauxita em altas temperaturas (LAMAS *et al.*, 2013). O processo supracitado resulta na decomposição de carbono de cálcio em óxido de cálcio, resultando altos teores de emissão de CO₂.

Visto a necessidade do aquecimento para a mistura de calcário, argila e bauxita, para a produção do cimento, a indústria consome cerca de 12 à 15% de toda a energia consumida pelas indústrias no mundo (MADLOOL *et al.*, 2011). Ainda o setor é responsável por cerca de 7% de todas as emissões de dióxido de carbono, sendo que conforme estudos, a cada uma tonelada de cimento Portland produzido é liberado quase uma tonelada de dióxido de carbono na atmosfera (MEYER, 2009).

O uso do cimento implica em danos ao meio ambiente, devido ao seu processo de fabricação. Segundo Ecycle (2016), as industriais de cimento são uma das principais responsáveis pela emissão de CO₂ emitido na atmosfera, sem contar nos outros tipos de poluição que elas são responsáveis.

Na busca por novos materiais capazes de complementar o uso do cimento Portland, os geopolímeros surgem como uma alternativa, em virtude de possuírem propriedades iguais ou superiores às do cimento Portland. Outra vantagem dos geopolímeros são a viabilidade do uso de resíduos provenientes de outros processos para a sua produção.

Visando a diminuição dos impactos ambientais, existem inúmeras pesquisas que tentam desenvolver um material capaz de se apresentar como alternativa para o uso do cimento Portland, visto que, na produção dele são emitidos elevados teores de CO₂ na atmosfera. O principal desafio para estas pesquisas é encontrar um material que possua a mesma ou maior resistência e durabilidade com a mesma praticidade de produção que o concreto possui.

Neste sentido, os cimentos álcali-ativados veem se destacando cada vez mais no cenário da construção civil, surgindo como uma alternativa ao uso do cimento Portland. Estes materiais consistem na relação entre um aluminossilicato, também chamado de precursor (largamente utilizado o metacaulim), e uma solução alcalina, chamado de ativador (DAVIDOVITS, 1991; BIGNO, 2008).

Segundo Longhi (2019) na literatura, dentre o grande grupo de cimentos álcali-ativados, existe um grupo em específico denominado geopolímeros que utilizam como precursor materiais com baixo teor de CaO, apresentando elevado teor de SiO₂ e Al₂O₃. Os geopolímeros são conhecidos por ser um material mais sustentável quando comparado com o cimento Portland, sendo que possibilitam o uso de resíduos que seriam descartados como precursores na relação aglomerante.

Neste aspecto os resíduos agroindustriais tais como cinzas de casca de arroz, cana-de-açúcar dentre outros, surgem como possíveis materiais passíveis de incorporação como precursores na produção de geopolímeros, devido aos seus elevados índices de SiO₂ e Al₂O₃ (CASTALDELLI, 2013). Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, no Brasil, cerca de 69% de todos os resíduos produzidos pela agroindústria, vem da produção da cana-de-açúcar (BRASIL, 2011).

De acordo com Guedes *et al.* (2010), a cada mil quilos de cana-de-açúcar utilizada para a produção de álcool, são gerados 280 kg de bagaço e palha da cana como resíduos. Ainda segundo o mesmo autor, a cultura da cana-de-açúcar ao longo dos anos já causou um enorme dano ao meio ambiente, visto que os resíduos eram despejados sem nenhum tipo de controle em rios.

Embora existam pesquisa sobre o uso de resíduos da cana-de-açúcar para produção de geopolímeros, existe uma lacuna de conhecimento sobre como a temperatura de calcinação destes resíduos podem influenciar as suas propriedades, bem como as propriedades mecânicas dos geopolímeros. Neste sentido o presente trabalho visa preencher esta lacuna, definindo como a temperatura de calcinação do resíduo influência em suas propriedades físicas e químicas, bem como nas propriedades mecânicas do produto final.

1.2 Tema

Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar calcinado sob diferentes temperaturas para aplicação em geopolímeros.

1.3 Delimitação do Tema

O resíduo da cana-de-açúcar foi o bagaço da mesma calcinado em diferentes temperaturas. O ativador foi o hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio

combinados. Os precursores foram o metacaulim e os resíduos de cana-de-açúcar calcinados em diferentes temperaturas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é caracterizar as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar quando calcinados em diferentes temperaturas para sua utilização em geopolímeros.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar as propriedades físicas e químicas dos resíduos de cana-de-açúcar quando calcinados em diferentes temperaturas;
- b) Avaliar e melhorar o procedimento de calcinação a partir de diferentes tempos, patamares e temperatura;
- c) Analisar a influência da temperatura de calcinação dos resíduos de cana-de-açúcar em geopolímeros perante o aspecto de resistência a compressão simples;

2 REVISÃO DA LITERATURA

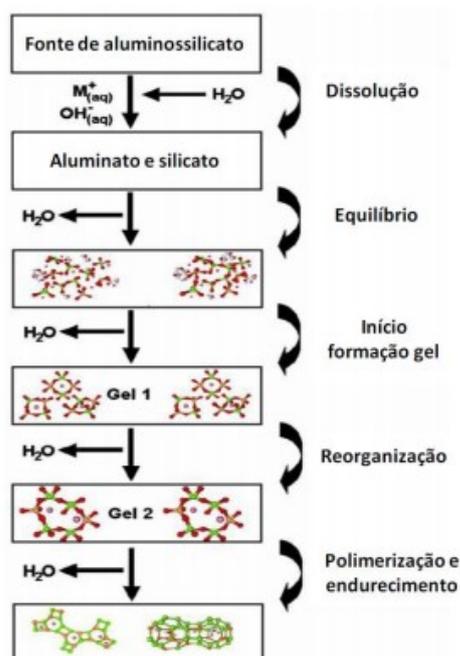
2.1 Breve histórico sobre os geopolímeros

Segundo Pacheco-Torghal (2008), o primeiro estudo sobre materiais ativados alcalinamente foi desenvolvido na Bélgica, pelo pesquisador Jessie Purdon. Em sua pesquisa Purdon obteve um novo material, composto através da adição de escória de alto forno em um meio alcalino. O pesquisador notou que este novo material formado possuía um tempo de pega extremamente avançado.

Outro pesquisador pioneiro sobre o estudo de compósitos ativados alcalinamente foi Victor Glukhovsky, que estudava os tipos de materiais que o império romano utilizava para a construção de suas obras. Em certo nível de sua pesquisa o autor desenvolveu um material ativado alcalinamente, que ele chamou de cimento sólido (KRIVENKO, 2005).

Com a descoberta deste novo material, Victor Glukhovsky em 1959, propôs um modelo simplificado para explicar o processo de ativação alcalina do material. Este modelo (Figura 02) até hoje é utilizado para explicar de uma forma mais simples o processo de geopolimerização de materiais (DUXSON, 2007).

Figura 02 – Modelo de Glukhovsky



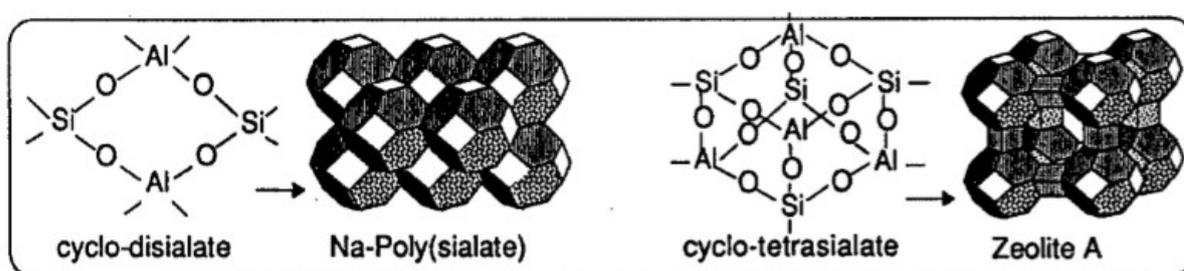
Fonte: Duxson (2007).

Mais tarde na década de 70, devido a busca de um material mais eficaz na resistência ao fogo (alto índice de incêndios na Europa), Davidovits começou a estudar a ativação alcalina mais em específico, tendo denominado estes materiais de geopolímeros, devido a semelhança deste material com os polímeros. Este novo material consistiu na transformação de um material amorfo em estruturas sílico-aluminosas semi-cristalinas e tridimensionais (DAVIDOVITS, 1991).

Ainda de acordo com Davidovits (1991), o processo de produção dos geopolímeros de forma simplificada se baseia na dissolução de uma matéria prima, composta de altos teores de SiO_2 e Al_2O_3 , geralmente com estrutura amorfa e frágil (chamados de precursores), com o uso dos chamados ativadores, sendo que após um certo período de tempo, ocorre a condensação deste material, formando estruturas tridimensionais e semi-cristalinas. Segundo Davidovits (1994), a reação de ativação de um geopolímero ocorre na mistura entre aluminossilicatos e uma solução altamente alcalina.

A Figura 03 ilustra a estrutura molecular típica de um geopolímero. Dentre os aluminossilicatos que podem vir a ser usados para o processo de produção de geopolímeros, destaca-se o metacaulim, cinzas volantes e outros tipos de resíduos (DAVIDOVITS, 1991). De acordo com Bigno (2008), os materiais ativados alcalinamente possuem uma baixa retração, alta resistência mecânica, ao fogo e ao processo de gelo e degelo (congelamento e descongelamento).

Figura 03 – Estrutura molecular típica de um geopolímero



Fonte: Davidovits (1991).

2.1.1 Aplicações dos geopolímeros

Por possuírem ótimas propriedades, os geopolímeros podem ser aplicados em diversos segmentos. Dependendo da relação silício/alumínio que o compósito

possui, ele pode ser resistente ao fogo, ser aplicado em telhas cerâmicas, componentes de indústria, materiais de construção, cimento e concretos (DAVIDOVITS, 1994). Segundo Davidovits (1994), os materiais ativados alcalinamente já foram aplicados nos seguintes ramos:

- Em painéis de madeira resistente ao fogo;
- Isolante de paredes
- Pedras decorativas;
- Painéis geopoliméricos espumosos;
- Materiais de construção de alta e baixa tecnologia;
- Sistema de resinas de altas resistências;
- Itens refratários dentre outros.

Dentre os edifícios a utilizar compósito ativado alcalinamente, destaca-se o Queensland's Global Change, construído em 2013. Segundo a empresa responsável pela construção, com o uso do material supracitado, houve uma redução de duas toneladas de CO₂ lançados na atmosfera (GLOBAL CHANGE INSTITUTE, 2014). Na Figura 05 é ilustrado o edifício supracitado.

Figura 04 – Edifício construído sem uso de concreto



Fonte: Global Change Institute (2014).

Em 2014, foi inaugurado o primeiro aeroporto do mundo, construído com compósito ativado alcalinamente, que fica em Toowoomba, na Austrália (Figura 06). Para construção do aeroporto foram consumidos em torno de 40.000 m³ de

compósito, equivalente a uma redução de 6,6 mil toneladas de CO₂ emitidos na atmosfera (GEOPOLYMER INSTITUTE, 2014).

Figura 05 – Aeroporto feito com compósito ativado alcalinamente



Fonte: Geopolymer Institute (2014).

2.2 Matérias primas para produção de geopolímeros

As matérias primas para a produção de geopolímeros são basicamente fontes de aluminossilicato e um ativador alcalino. Segundo Longhi (2015), os aluminossilicatos devem apresentar quantidades consideráveis de material amorfo, tendo ainda dimensões granulométrica adequada. Já os ativadores, segundo o mesmo, devem apresentar pH elevado, para ele ser capaz de dissolver a parcela amorfa do precursor sólido.

2.2.1 Precursores

2.2.1.1 Metacaulim

O metacaulim que é originário do caulim ativado termicamente, é amplamente utilizado por inúmeros pesquisadores como precursor para a produção de

geopolímeros. O caulim utilizado no Brasil, consiste em um mineral a base de aluminossilicato hidratado, encontrado próximo a superfície da terra, porém para o mesmo ser utilizado na indústria, o mesmo deve possuir pureza superior a 90% (LONGHI, 2015).

Após a extração do caulim de elevado pureza, o mesmo é calcinado entre faixas de temperatura de 500 e 850°C, provocando a dexidroxilação da água na estrutura e gerando um material que antes era cristalino em amorfo (metacaulim) (PROVIS E BERNAL, 2014). Nos geopolímeros, a reatividade do metacaulim depende do tamanho de suas partículas, sendo que quanto menor sua partícula, maior será sua reatividade (LONGHI, 2015).

Segundo Longhi (2015), outra característica do metacaulim para o uso em geopolímeros é a sua elevada área superficial, o que ocasiona em uma maior reatividade inicial, e conseqüentemente gerando um maior consumo de água no momento da mistura. O mesmo autor ainda cita que a velocidade da reação de formação do produto, depende do tipo de precursor utilizado.

Provis, Yong e Duxson (2009), citam que os geopolímeros a base de metacaulim apresentam as seguintes etapas:

- O ataque alcalino no metacaulim resulta na liberação de silicato e aluminato na solução;
- As interações dos elementos dissolvidos levam a formação de oligômeros de aluminossilicato;
- A dissolução avança até onde a dissolução do aluminato é suficientemente alta para desestabilizar a solução do silicato com conseqüente precipitação de espécies dissolvidas para início de formação do gel;
- O gel formado inicia o seu desenvolvimento do ponto onde o material inicia a solidificação, sendo que o tempo necessário para isso depende em grande parte da concepção da mistura e da temperatura de cura, ainda dependendo da presença de outros contaminantes.

Embora existam métodos que tentam explicar e propor modelos para correta dosagem dos geopolímeros a base de metacaulim, não se tem um método consolidado na área para dosagem do material. Neste sentido Provis, Yong e

Duxson (2009), citam algumas características do processo de produção dos geopolímeros:

- As características estruturais dos geopolímeros são definidas pela relação de Si/Al e pela natureza do cátion alcalino presente;
- Cada ligação de alumínio tetraédrico é equilibrada pelo cátion de um metal alcalino;
- O gel formado quando bem curado é predominantemente conectado e possui algumas não pontes de oxigênio, porém se não bem curado o mesmo pode possuir alguns sítios de não-pontes de oxigênio.

A característica de resistência mecânica da pasta é determinada pela relação de Si/Al, sendo que para a ativação do metacaulim com NaOH há formação de estruturas predominantemente do tipo sodalita. A relação de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de geopolímeros produzidos com metacaulim ou com outro tipo de precursor são similares, sendo que a relação de $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ pode ser ajustado com o uso de um ativador (LONGHI, 2015).

2.2.1.2 Resíduos

Uma das vantagens dos geopolímeros é a oportunidade de se utilizar resíduos como matéria prima. Neste contexto Álvarez-ayuso *et al.* (2008), estudou o uso das cinzas de combustão do carvão como fonte de sílica e alumina para a produção de matrizes geopoliméricas. O autor supracitado utilizou solução de hidróxido de sódio - NaOH (5%, 8% e 12%) em relação a massa total de sólidos, com variações do tempo de cura (6h à 48h) e temperatura (40°C à 80°C), tendo conseguido obter como resultado 60 MPa no ensaio de resistência a compressão simples, quando utilizado 12% de NaOH, em 48 horas de cura a uma temperatura de 80°C.

Torres-carrasco e Puertas (2015), realizaram pesquisas utilizando resíduos de vidro como ativador alcalino para geopolímeros. Os autores utilizaram NaOH nas proporções de 8% e 10%, combinado com 15% de resíduo de vidro em substituição ao ativador alcalino, tendo obtido como resultado que o vidro pode ser utilizado

como substituto (em porções de até 15%) do ativador alcalino para matrizes geopoliméricas sem comprometer a resistência mecânica das mesmas.

Geopolímeros produzidos com escória granulada de alto-forno possuem uma alta resistência a compressão simples e resistência ao fogo, conforme destaca Cheng e Chiu (2003). Os autores utilizaram a escória granulada combinada com diferentes concentrações de hidróxido de potássio, adição de metacaulita e silicato de sódio, tendo obtido para o geopolímero uma resistência a compressão simples de 79 MPa. Ainda os mesmos autores moldaram uma parede de 10mm de espessura e expuseram a uma chama de 1100°C, após 35 minutos de exposição a temperatura no lado reverso da parede atingiu menos de 350°C, destacando a alta resistência ao fogo do geopolímero.

Outro resíduo pesquisado como matéria para composição de pastas geopoliméricas são os resíduos cerâmicos. Sun *et al.* (2013), moldaram uma pasta geopolimérica utilizando os resíduos supracitados, tratados em diferentes temperaturas, combinados com NaOH, os autores constaram que a temperatura do material ativador do geopolímero pode afetar suas propriedades, pois o maior valor de resistência a compressão simples foi de 75,6 MPa aos 28 dias de cura, quando os resíduos cerâmicos foram tratados a uma temperatura de 1000°C.

De acordo com Tchadjíé *et al.* (2016), quanto maior a relação de Na₂O na mistura do geopolímero, maior será o valor de resistência a compressão simples. O autor chegou a esta conclusão observando o comportamento do geopolímero quando adicionado resíduo de granito como ativador, tendo obtido variações de valores de resistência a compressão de 6,25 a 40,25 MPa dependendo da quantidade de Na₂O utilizada na fusão alcalina.

A casca do óleo de palma vem sendo estudada como ativador para geopolímeros por Kupaei *et al.* (2013), o autor obteve como resultado aos 28 dias de cerca de 28 MPa, ainda ele define que o índice de molaridades acima de 1,4 não resulta em efeitos nos parâmetros mecânicos dos geopolímeros.

Com base no exposto pelos estudos dos diversos autores apresentados neste capítulo, pode-se definir que o uso de resíduos na produção de materiais ativados alcalinamente tem obtido ótimos resultados perante os aspectos mecânicos.

2.2.2 Ativadores

2.2.2.1 NaOH

Na produção de geopolímeros o NaOH é o mais utilizado como ativador, devido ao seu baixo custo e maior disponibilidade. Porém o mesmo, tem como desvantagem o seu alto poder corrosivo, sendo assim necessários equipamentos de proteção para o seu manuseio.

Geopolímeros quando ativados com NaOH tendem a apresentar formação de estruturas zeolíticas, que segundo Provis (2009), apresentam uma resistência inferior ao N-A-S-H formado, sendo ainda que conforme autor, ao longo do tempo a um declínio de resistência. O autor ainda cita que a mistura tende a apresentar sinais e eflorescência devido à baixa reatividade antes do endurecimento, o que ocasiona na formação de uma solução rica em álcalis e uma matriz geopolimérica porosa.

2.2.2.2 Silicato de sódio

Os silicatos são produzidos por meio da calcinação de um carbonato combinado com uma fonte de sílica em uma temperatura entre 1400 e 1500°C. Os mais comercializados e conhecidos são os de sódio e potássio, sendo que o de sódio possui um processo de produção mais simples, sendo que por consequência seu preço menor (LONGHI, 2015).

Segundo Longui (2015), o silicato de sódio é formado a partir da combinação de SiO_2 , Na_2O e H_2O , sendo altamente solúvel em água quando o mesmo se encontra no estado sólido. O silicato é representado quimicamente pela equação $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, em que a relação molar $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ representa o módulo de sílica. O módulo de sílica pode variar conforme for as características necessárias para o material, sendo que quanto maior for o valor de pH da mistura, maior será a viscosidade do silicato (LONGHI, 2015).

2.3 Processo de geopolimerização

Com o passar dos anos, foram surgindo novas pesquisas sobre os geopolímeros e compósitos ativados alcalinamente, visando encontrar um material capaz complementar ao cimento Portland nas construções. Os materiais geopoliméricos e ativados alcalinamente surgem como alternativa, pois no processo de geopolimerização a emissão de CO₂ é menor do que no do cimento Portland (Apolonio, 2007).

Comumente, na área da construção civil, tem certa dificuldade de se definir qual o termo correto, geopolímeros ou compósitos ativados alcalinamente. Segundo Longhi (2015), os ligantes ativados alcalinamente podem ser divididos em dois grandes grupos, o primeiro resultante do uso de precursores com presença de CaO, SiO₂ e Al₂O₃, sendo este primeiro rico em CaO. Já o segundo grupo utiliza precursores com baixos teores de CaO a base de aluminossilicatos, sendo estes ativados com o uso de silicato e hidróxido, estes chamados de geopolímeros.

A estrutura química define as propriedades dos geopolímeros. Logo a relação atômica na estrutura de Si/Al influencia as propriedades e onde os compósitos podem ser aplicados (DAVIDOVITS, 1994). Na Figura 04 é ilustrado o processo de geopolimerização descrito por inúmeros autores como Khale e Chaudhary (2007), Davodovits (2011), Novais (2016), Vafaei e Allahverdi (2016), Wan *et al.* (2017), Santos, Melo Filho e Manzato (2018) dentre outros.

Figura 06 – Processo de geopolimerização



Fonte: Apolonio (2017).

Duxson *et al.* (2006), explica que a dissolução de aluminossilicato ocorre de forma mais rápida quanto maior for o pH, sendo criada uma solução saturada em aluminossilicato. Esta etapa de dissolução depende da concentração alcalina, do cátion metálico alcalino a ser utilizado na solução ativadora, velocidade da mistura, composição das fontes de Al-Si, dentre outros fatores (MELO, 2011).

Outro fator determinante para se definir a quantidade do precursor a ser dissolvida pelo ativador é o grau de amorfismo do precursor, sendo este responsável por estimar a sua parte não reativa. Quando dissolvidos os aluminossilicatos começam a formação de um gel, formando ligações em rede, sendo que este processo resulta na liberação da água, antes consumida no processo de dissolução (DUXSON *et al.*, 2006).

Formado o gel, a estrutura da solução começa a se reorganizar e rearranjar, resultando em ligações tridimensionais. Esta reorganização estrutural contínua ocasiona a expulsão da água pelos poros maiores do ligante, sendo que após esta expulsão, da água por meio da evaporação é iniciada a etapa de solidificação. Ainda nos geopolímeros a etapa de solidificação pode ocorrer por lixiviação e difusão das partículas para com o gel por meio de reações químicas (DUXSON *et al.*, 2006).

Segundo Longhi (2015), o primeiro gel formado na geopolimerização é o N-A-S-H, com posterior formação de alguns tipos de zeólitas. O N-A-S-H é a abreviação para o gel sódio aluminossilicato formado, em que o mesmo se apresenta como material amorfo ou ainda semi-cristalino (FERNANDEZ-JIMENEZ e PALOMO, 2009).

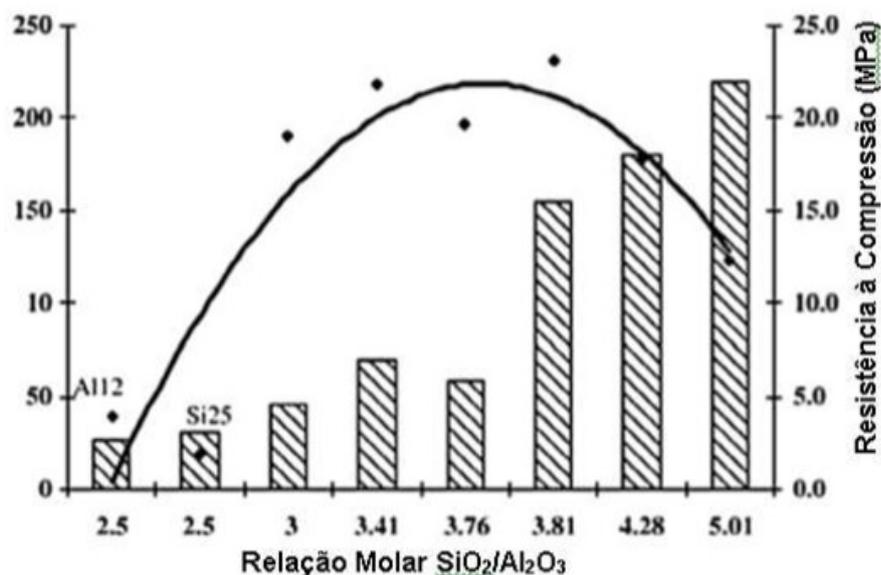
De acordo com Davidovits (1991), o gel é apresentado na forma de $M_2O.mAl_2O_3.nSiO_2$, em que geralmente o m diz respeito a parcela do álcali, tendo valor de aproximadamente 1, e o valor de n , varia entre 2 e 6. Já a parcela de Si é proveniente do precursor, bem como do ativador, sendo que no uso do silicato, o Si é incorporado ao gel pela sua solubilidade elevada. A presença de Si e Na são fatores determinantes para a formação do N-A-S-H, visto que o grau de polimerização da solução é relacionado diretamente a relação de SiO_2/Na_2O (FERNANDEZ-JIMENEZ e PALOMO, 2009).

Outro autor que corrobora com as afirmações supracitadas é Duxson *et al.* (2007), sendo que o mesmo afirma que o responsável pelo nível de eficácia do processo de geopolimerização é a relação de SiO_2/Na_2O . Outro fator muito

importante no aspecto de resistência mecânica do ligante, bem como a sua resistência ao fogo é a relação de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Liew et al. (2016), estudou a produção de geopolímeros com o uso de metaculim, segundo o mesmo, a relação ideal de óxidos ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) que obteve a melhor resistência foi a de 3,81, sendo que quando esta relação foi aumentada, a resistência a compressão teve um declínio. O Gráfico 01 ilustra os resultados obtidos por Liew et al. (2016), no qual é possível verificar o declínio supracitado da resistência a compressão. Liew et al. (2016) explica que esse declínio na resistência ocorre devido que quanto maior a relação de óxidos, mais tempo os geopolímeros demoram para se estabilizar, o autor faz um adendo que mesmos os geopolímeros com relação molar de 5,01 poderiam atingir resistências elevadas (70-100MPa), porém os mesmos necessitariam de um período de cura elevada.

Gráfico 01 – Ensaio de compressão simples realizado por Liew et al. (2016)



Fonte: Liew et al. (2016).

Outro fator interessante que os geopolímeros e compósitos ativados alcalinamente veem sendo estudados, é para enclausurar substâncias tóxicas ou materiais que seriam despejadas no meio ambiente, causando assim algum tipo de poluição a natureza. Destaca-se também que os geopolímeros podem ser produzidos a partir de resíduos que seriam descartados, muitas vezes de forma

incorreta, acarretando sérios danos ao meio ambiente no qual os mesmos seriam depositados (BRASIL, 2019).

2.4 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea, originalmente cultivada na Ásia e na Índia, ela foi implementada no Brasil ainda no período de colonização, nos meados do século XVI (SCHNEIDER *et al.*, 2012). A cana-de-açúcar logo se tornou de fundamental importância para a economia brasileira, devido a sua rápida adaptação ao clima tropical e a sua versatilidade, visto que a mesma pode ser utilizada tanto na forma mais simples (ração para animais), quanto na forma mais refinada (IBGE, 2019).

A cana-de-açúcar é uma das espécies mais cultivadas em todo o mundo. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação - FAO (2009) a cana-de-açúcar é cultivada em mais de 100 países, ainda segundo ela, o Brasil e a Índia, são os maiores produtores mundiais, sendo que os dois juntos correspondem a cerca de metade da produção mundial.

Este aspecto pode ser visto na Tabela 01, que apresenta a produção da cana-de-açúcar nos 10 países de maior produção mundial, destaca-se a produção do Brasil e da Índia, no qual os dois países juntos representam cerca de 50% de toda produção de cana-de-açúcar no mundo.

Tabela 01 – Produção mundial de cana-de-açúcar

País	Área colhida (10 ha)	Produção (10 t)	Área colhida (%)	Produtividade (t/ha)
Brasil	6,153	455,300	30,200	74,000
Índia	4,200	281,200	20,600	67,000
China	1,220	100,700	6,000	82,500
México	0,668	50,600	3,300	75,700
Tailândia	0,936	47,700	4,600	51,000
Paquistão	0,907	44,700	4,600	51,000
Colômbia	0,426	39,800	2,100	93,400

Austrália	0,415	38,200	2,000	92,000
Indonésia	0,370	30,200	1,800	81,600
EUA	0,364	26,800	1,800	73,600
Outros	4,713	276,200	23,100	58,600
Total	20,372	1391,400	100,000	68,300

Fonte: FAO (2009).

Quando comparado apenas a produção agrícola brasileira, é possível notar que a cana-de-açúcar se destaca mais uma vez, sendo a terceira espécie mais cultivada no país em relação a área colhida e a cultura que tem maior produção em toneladas e maior produtividade por hectare dentre as sete culturas mais cultivadas no país (IBGE, 2019). Na Tabela 02 é apresentado um panorama da produção agrícola brasileira.

Tabela 02 – Produção agrícola brasileira

Cultura	Área colhida (10 ha)	Produção (10 t)	Área colhida (%)	Produtividade (t/ha)
Soja	20,58	57,95	35,60	2,82
Milho	13,82	51,83	23,90	3,75
Cana-de-açúcar	6,69	515,83	11,60	77,10
Feijão	3,83	3,25	6,60	0,85
Arroz	2,90	11,05	5,50	3,81
Café	2,22	2,17	3,80	0,97
Mandioca	1,91	26,92	3,30	14,09
Outros	2,06	7,22	3,60	3,50
Total	57,78	-	100,000	-

Fonte: adaptado de IBGE (2019).

Segundo dados do IBGE (2019) a produção brasileira de cana-de-açúcar no ano de 2019 foi superior a 688 milhões de toneladas, tendo como os principais produtores, os estados de São Paulo e Minas Gerais. Toda a produção da agroindústria da cana-de-açúcar, acaba gerando uma quantidade extremamente grande de resíduos sólidos, e ainda resíduos líquidos, provenientes do processo de lavagem da cana-de-açúcar do longo da cadeia de produção.

Com o aumento da produção agrícola e subprodutos, conseqüentemente ocorre o aumento dos resíduos gerados por ela. Estes resíduos podem ser prejudiciais ao meio ambiente, obrigando governos e demais entidades a buscarem a criação de leis e normatizações para o tratamento destes resíduos.

No Brasil destaca-se a NBR 10004/2004, que dispõem sobre o tratamento dos resíduos sólidos. Segundo ela, todo resíduo sólido, ou semissólido proveniente da atividade agrícola, industrial, doméstica entre outros, é considerado um resíduo sólido. A NBR 10004/2004 classifica os resíduos sólidos em 3 classes distintas, sendo que a classe I considera os resíduos perigosos, classe II A os que são não inertes, e classe II B os que são inertes. De acordo com Figueiredo e Scala (2011), dentre os principais resíduos sólidos do processamento da cana-de-açúcar destaca-se o bagaço, a palha, a vinhaça, as cinzas das caldeiras dentre outros. Segundo os mesmos autores o bagaço da cana-de-açúcar é classificado como resíduos de classe II A.

Sobre o bagaço de cana-de-açúcar, Silva e Morais (2008) destaca que o mesmo possui uma umidade média de aproximadamente 50%. Segundo o mesmo autor o bagaço de cana-de-açúcar possui poder calorífico de 2.275 kcal/kg, sendo que em alguns casos este valor pode chegar a 4.360 kcal/kg em condições de umidade 0%.

2.4.1 Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar

Os resíduos da cana-de-açúcar são fontes alternativas de aluminossilicato para a produção de geopolímeros, além de ser extremamente abundante no Brasil. Quando *in natura*, o bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo sólido composto por lignina e celulose quando, proveniente da extração do caldo da cana-de-açúcar. Sua composição é constituída por 50% de umidade, 45% de fibras lignocelulósicas, 2% a 3% sólidos solúveis em água e 2% a 3% de sólidos insolúveis.

Quimicamente a composição do bagaço seco consiste em: 41% de celulose, 25% hemicelulose e 20% lignina (ZARDO, 2004). No Brasil, aproximadamente 95% de todo o bagaço gerado no processo de moagem é queimado em caldeiras para posteriormente gerar vapor. Neste processo de queima do bagaço ocorre a produção da cinza do bagaço de cana-de-açúcar que é composta em sua maior parte por materiais inorgânicos (NUNES *et al.*, 2010).

As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar são oriundas de um processo de geração de energia nos empreendimentos sucro-alcooleiros. Cerca de 10% do total do bagaço queimado se torna cinza. Estas cinzas são utilizadas como adubo nas próprias lavouras de cultivo de cana-de-açúcar, porém, devido à sua difícil degradação, e por não apresentar uma estrutura rica em nutrientes minerais, este resíduo não está sendo mais procurados pelos agricultores (NUNES *et al.* 2010).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar vem sendo estudada por pesquisadores ao longo dos anos (SOUZA, 2011; FARIA, 2012; SATHIYA, 2010; MARTINS; ALTOÉ 2015; CASTRO; MARTINS, 2016; SOUZA, 2019), para o desenvolvimento de materiais de construção, especialmente devido às suas propriedades físicas e químicas, que se assemelham às cinzas volantes (SOUZA, 2011; FARIA, 2012; SATHIYA, 2010; CASTALDELLI, 2013).

2.4.1.1 Características das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar

Em resíduos de cana-de-açúcar Melo Neto (2007), observou que quanto maior a temperatura de calcinação menor será a finura do material. Ainda segundo o mesmo autor em cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC), quanto menor a finura do material, maior será a atividade pozolânica (capacidade do material formar outros materiais cimentantes estáveis) da mesma perante ensaios físicos. Este fenômeno também foi observado por Cordeiro e Kurtis (2017), que testaram a reatividade pozolânica de cinzas de cana-de-açúcar pelo método de Chapelle modificado, e obtiveram que quanto menor a finura do material maior será sua reatividade pozolânica.

Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), analisaram a diferença no índice de atividade pozolânica em resíduos de cana-de-açúcar calcinados em diferentes temperaturas pelo método de Chapelle modificado e NBR 5752:2014. Os autores observaram que pelo método de Chapelle quando maior a temperatura de calcinação, maior será o índice, chegando a valores de 413 mg/g, já pela NBR 5752:2014, os autores não observaram uma constante para o índice de atividade pozolânica.

Ainda a temperatura de calcinação dos resíduos influencia a resistências deles quando submetidos a altas temperaturas. Para resíduos de cana-de-açúcar Cordeiro (2006), observou que na temperatura de calcinação de 400°C, ocorre a

maior perda de massa dos resíduos (cerca de 90%), devido à perda de celulose, lignina, da água livre total e de grande parte do carbono presente das amostras.

Segundo o mesmo autor para temperaturas superiores à 400°C a perda de massa é quase insignificante (cerca de 1,5%), visto que a maior perda de massa já ocorreu no processo de calcinação. A NBR 12653:2014 estabelece os requisitos para que as cinzas possam ser incorporadas a materiais cimentícios. A mesma norma estabelece que as cinzas devem ter perda de massa de no máximo 6% quando submetidas a elevada temperatura.

Na Tabela 03 estão apresentados alguns trabalhos da literatura que avaliaram a composição da cinza de bagaço de cana-de-açúcar, onde é possível notar que em todos eles o elemento predominante, é a sílica. Nota-se que os teores de dióxido de silício (SiO₂) variam entre 50% a 84%, em massa, e, também, observar-se a similaridade dos elementos constituintes da cinza da cana-de-açúcar, independentemente do estudo.

Tabela 03 – Comparação da composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Composição de óxidos	Composição (% em massa)					
	Cordeiro (2006)	Paula (2006)	Castaldelli (2013)	Frias (2011)	Zodinio (2013)	Pereira (2014)
SiO ₂	64,64	83,70	51,83	69,40	50,01	78,60
Al ₂ O ₃	< 0,10	-	26,04	11,26	8,30	4,50
Fe ₂ O ₃	0,10	6,537	11,84	5,41	1,96	4,90
CaO	6,33	1,18	3,03	2,51	5,92	1,30
Na ₂ O	0,74	-	0,46	0,09	-	0,20
K ₂ O	9,57	6,146	2,67	3,45	19,38	2,40
MnO	0,51	0,081	< 0,10	-	0,23	-
TiO ₂	< 0,01	1,16	0,87	1,38	0,58	-
MgO	9,27	-	1,05	1,28	5,55	-
BaO	< 0,16	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	8,84	-	-	1,61	2,46	-
Temperatura de calcinação (°C)	400 á 900	700	650	800	600	-

Fonte: Autor (2021).

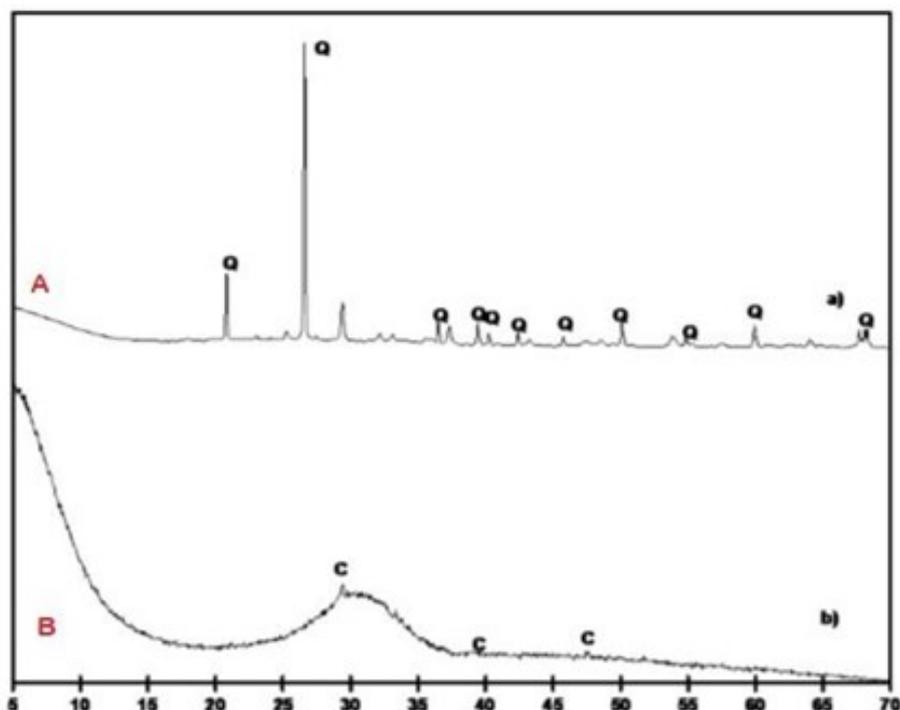
Apesar de se perceber uma variação dos valores de sílica nas amostras, constata-se que este elemento é o composto predominante em todas as cinzas analisadas, independentemente do local de origem ou espécie cultivada. Cordeiro (2006) relata que a composição química encontrada na cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizada em seu estudo apresenta-se adequada ao emprego como adição mineral, esse fato decorre dos teores relativamente elevados de silício e da perda ao fogo no resíduo. Porém, ressalta que devido à granulometria variável do material se faz necessário um processo de moagem controlada, para que seja possível aumentar a reatividade pelo aumento da superfície específica das partículas.

Segundo Cordeiro (2006), a presença de sílica em grande porcentagem decorre pela adsorção do silício do solo pelas raízes da cana na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4). Após a evaporação da água da planta, a sílica se deposita nas paredes externas das células da epiderme. Segundo Sangster (2001), o silício é depositado em forma laminar nas paredes e apresenta-se na forma amorfa. Ainda, de acordo com Cordeiro (2006), outra fonte importante de sílica é a areia (quartzo), presente na amostra pelo processo de colheita.

De acordo com Castaldelli (2013), as propriedades químicas, mineralógicas e morfológicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar influenciam significativamente as propriedades químicas e mecânicas dos concretos e argamassas. Macedo (2009) relata que as diferentes porcentagens de teores de sílica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar não influenciam significativamente na resistência, no entanto as diferenças mineralógicas na forma de sílica (amorfa ou cristalina) influenciam.

Segundo Castaldelli (2013), as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar têm sua estrutura cristalina, em virtude da contaminação de quartzo no processo de colheita da cinza. O quartzo na cinza pode ser removido através de um processo de lavagem do bagaço antes da calcinação. Na Figura 07 é apresentado um difratograma de raios-x (DRX) de uma amostra de cinza do bagaço de cana-de-açúcar que não passou pelo processo de lavagem (Figura 2 (a) CBC lavada, (b) CBC não lavada).

Figura 07 – DRX de uma amostra de cinza de cana-de-açúcar



Fonte: Castaldelli (2013).

Segundo Nobre (2017), a cinza com maior índice de amorfismo é gerada quando o bagaço da cana-de-açúcar é calcinado em temperatura de 600°C durante um período de 6 horas. Segundo o autor, para cinzas geradas sob as condições supracitadas, o grau de amorfismo fica em 80,50%, já o grau de cristalinidade fica aproximadamente em torno de 19,50%.

2.4.2 Utilização de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em matrizes cimentícias

De acordo com Arif, Clark e Lake (2017), a utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na composição da matriz cimentícia melhora a resistência à compressão e, também, a durabilidade do concreto. Esta melhora decorre do fato de a cinza preencher os vazios entre o agregado e a pasta cimentícia e, desta forma, proporcionar ao concreto uma maior densidade. O autor relata também que a incorporação do resíduo no concreto aumenta as reações de hidratação do cimento, e desta forma, pode aumentar indiretamente a reação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) do concreto bem como, melhorar a trabalhabilidade da pasta cimentícia.

Neto *et al.* (2018) estudou a utilização de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar calcinadas por uma indústria sucoenergética do estado do Paraná, na

incorporação em concretos, em substituições de 0 a 50% do valor da massa do cimento. Nessa pesquisa, o autor coletou o resíduo da indústria e aplicou diretamente no concreto, tendo verificado maior consistência e diminuição dos seus vazios em todas as misturas.

Segundo Cordeiro e Fairbairn (2009), os tamanhos das partículas das cinzas dos resíduos de cana-de-açúcar influenciam de forma significativa na reatividade pozolânica do material, porém a temperatura de calcinação não tem ligação direta com o tamanho da partícula do material calcinado. Neste contexto, Paula (2006), destaca que quanto menor a partícula, maior será a sua área superficial e maior será a sua atividade pozolânica, logo, teoricamente maior será a resistência mecânica dos compostos produzidos com esses resíduos.

Nobre (2017) destaca que a quantidade de cinza do bagaço de cana-de-açúcar a substituir o cimento Portland deve ser cuidadosamente analisada. Com uso de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), no concreto há uma redução da quantidade de portlandita disponível em virtude do consumo da mesma pela fase amorfa da CBC. Nobre (2017) destaca ainda, que em pastas cimentícias com teores de substituição de cimento Portland entre 35% a 70% por CBC verificou-se, por meio de difração de raio-x que há o consumo de toda a portlandita. Logo, quando são utilizados altos teores de CBC em concretos, um consumo excessivo de portlandita, é propiciado e, conseqüentemente, a disponibilidade da mesma para reações pozolânicas sofre uma queda. O autor ressalva que, o uso de CBC em um teor de até 20% não provoca redução de portlandita na matriz cimentícia, porém, o que ocorre em teores acima de 35% alterando a distribuição de poros. Essa alteração provoca um aumento da susceptibilidade da matriz à carbonatação.

Neste sentido, a Tabela 04 apresenta estudos que utilizaram a CBC em substituição ao cimento Portland para produção de matrizes cimentícias. O intuito da tabela é comparar os trabalhos realizados pelos autores da área e desta forma verificar as resistências encontradas quando substituído o aglomerante, pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Adotou-se como base a resistência de 100% para os concretos referência (sem substituição do cimento). Nos casos em que a substituição de cimento Portland por CBC resultou em um ganho de resistência, este valor foi transformado em porcentagem e somado aos 100% da resistência do concreto referência. Nos casos em que a substituição de cimento Portland por CBC

resultou em uma perda de resistência, esta perda foi transformada em porcentagem e descontada dos 100% da resistência do concreto referência.

Tabela 04 – Uso de CBC em matrizes cimentícias.

Autor	Moagem	Temperatura de calcinação	Cimento Utilizado	(%) de substituição	(%) Resistência (28 Dias)	Slump (cm)
GORGES <i>et al.</i> (2019)	Moinho de bolas	600°C	CP V ARI	0	100%	26,8
				5	101,16%	26,9
				10	100,77%	27,9
				20	111,52%	27,3
Neto (2018)	-	400°C	CPII – E 32	0	100%	11,6
				10	116%	11,3
				20	83,33%	10,8
				50	41%	10
Teodoro <i>et al.</i> (2013)	Moinho de bolas	-	CPII-F 32	0	100%	8
				5	98,46%	9
				10	74,62%	9
				15	65,00%	7,5
Silveira (2010)	Moinho de bolas	-	CP V ARI	0	100,00%	14,5
				5	89,92%	12,8
				10	94,81%	11
				20	96,62%	7,5
Nunes (2009)	-	500°C a 700°C	CPII-F 32	0	100%	7
				3	100,61%	10,50
				5	102,44%	7,5
				7	107,93%	6,5
				10	105,49%	8,5
				13	106,10%	6
				15	84,15%	5,5
				20	71,65%	5

Fonte: Autor (2021).

Por meio da Tabela 04, é possível verificar que com porcentagens superiores a 20% de substituição de cimento Portland por CBC, ocasionou em uma baixa da

resistência a compressão (NETO, 2018; NUNES, 2009). Estes dados corroboram com os dados encontrados por Nobre *et al.* (2017), que indicam que porcentagens de substituição superiores a 20% ocasionam em um maior consumo de Portlandita disponível na matriz.

Ainda é possível verificar que em porcentagens inferiores a 20% de substituição, os concretos produzidos tenderam a ter um ganho de resistência a compressão simples (GORGES *et al.* 2019; NETO, 2018; NUNES, 2009). Em relação a consistência dos concretos, as substituições de cimento Portland por CBC tenderam a sofrer um leve aumento em sua consistência (NETO, 2018; TEODORO *et al.*, 2013; SILVEIRA, 2010, NUNES, 2009).

2.4.3 Utilização de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em matrizes geopoliméricas

Castaldelli (2013), descreve que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar quando combinada com outros tipos de cinzas volantes e escória de alto-forno apresenta condições positivas para a produção de geopolímeros, tendo ainda elevados índices de resistência a compressão simples (70 MPa).

Outra pesquisa sobre o uso da cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar em compósitos ativados alcalinamente foi a de Fernandes Filho (2012), que utilizou diferentes teores de cinza como precursor. O autor obteve com 100% de utilização de cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar como precursor e utilizando silicato de sódio como ativador, uma pasta ativada alcalinamente com resistência mecânica de 20 MPa. O resultado de Fernandes Filho (2012) é animador para a utilização deste resíduo para produção de materiais ativados alcalinamente.

De acordo com Batista (2018), as cinzas da folha da cana-de-açúcar podem ser utilizadas como precursor para produção de aglomerantes ativados alcalinamente, quando utilizado NaOH como ativador. O autor obteve 41,6 MPa de resistência a compressão simples aos 90 dias de cura, em um geopolímero produzido com 100% de cinza da folha da cana-de-açúcar como precursor.

Os resultados dos autores citados neste capítulo comprovam que os resíduos de cana-de-açúcar podem ser utilizados como precursores para a produção de geopolímeros. Contudo, os autores ressaltam que as propriedades dos geopolímeros poderiam ser otimizadas com um controle melhor dos resíduos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritas as principais características dos materiais utilizados, bem como, a metodologia para os ensaios.

3.1 Materiais

3.1.1 Precursores

3.1.1.1 Bagaço de cana-de-açúcar

Um dos precursores utilizado na mistura foi a cinza de bagaço de cana-de-açúcar calcinada em diferentes temperaturas. O resíduo foi coletado na cooperativa dos produtores de cana-de-açúcar de Porto Xavier - Coopercana, localizado na cidade de Porto Xavier, estado do Rio Grande do Sul. Para a realização dos ensaios, foram coletados aproximadamente 200 quilos de bagaço de cana-de-açúcar *in natura*, conforme ilustra a Figura 08.

Figura 08 – Coleta do bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Autor (2021).

Após a coleta do bagaço *in natura*, o mesmo foi secado, separado e armazenado em bolsas plásticas até o momento de sua calcinação. Para o processo

de calcinação utilizou-se um forno (mufla), com temperatura controlada, conforme processo explicado no tópico 3.2.1.1.

3.1.1.2 Metacaulim

O outro precursor utilizado como referência na composição da pasta geopolimérica foi o metacaulim. Para a pesquisa utilizou-se o MetaMax produzido pela empresa Basf. O metacaulim possui um pH de 6 e um tamanho de partícula de 1,3 μm (BASF, 2021). O metacaulim não sofreu qualquer tipo de tratamento inicial, ou tratamento complementar, sendo utilizado diretamente na mistura do geopolímero.

3.1.2 Ativador

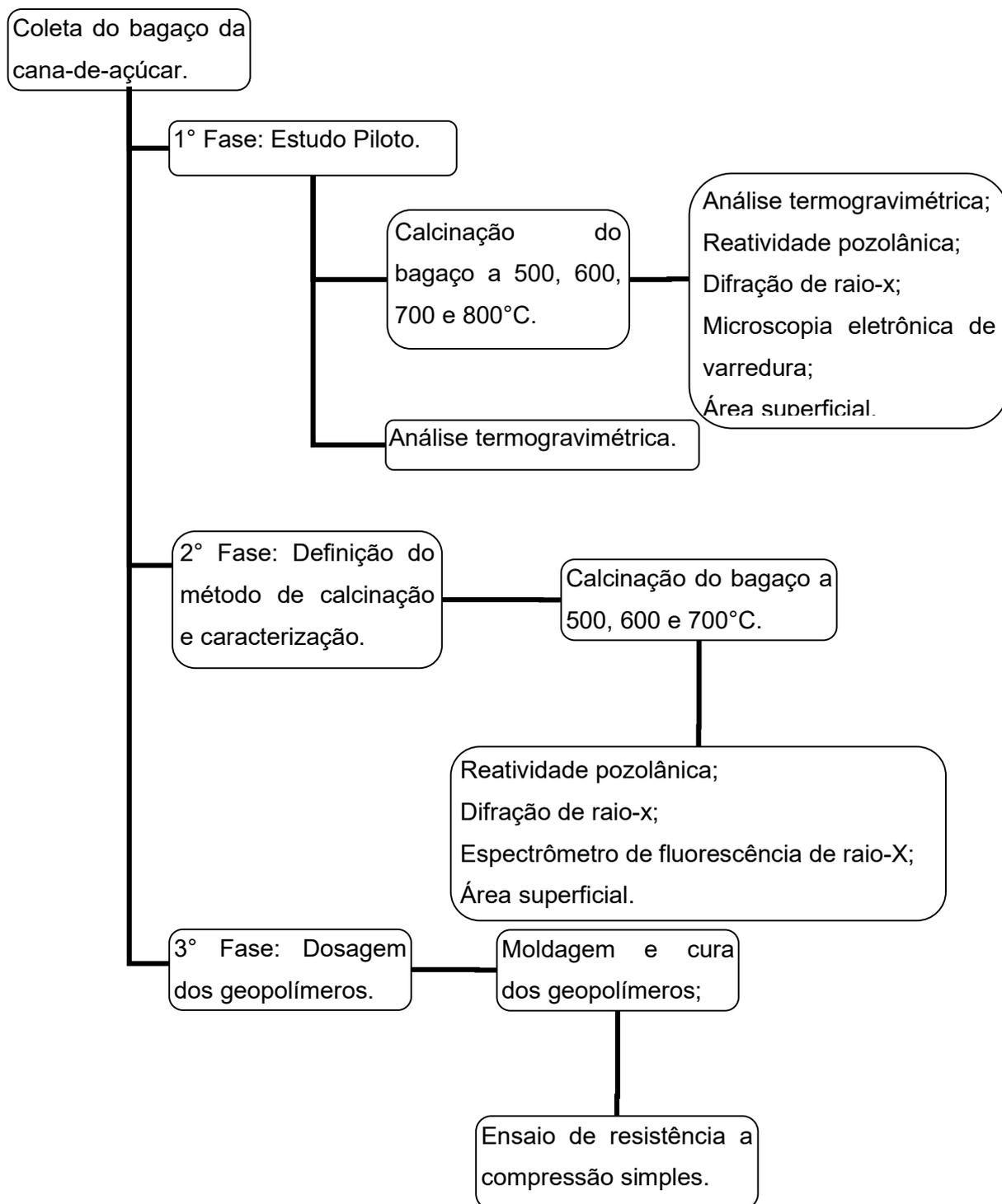
A solução ativadora empregada no estudo foi o silicato de sódio alcalino (Na_2SiO_3), juntamente com o hidróxido de sódio (NaOH), de origem industrial, em escamas, com concentração de 99%, conforme metodologia utilizada por Fernandes Filho (2012).

3.2 Métodos

Para melhor entendimento da metodologia utilizada o método foi dividido em 3 fases distintas. A primeira fase refere-se a realização do estudo piloto, onde teve-se como foco a caracterização das CBC's e o comportamento das mesmas quando calcinadas sob diferentes temperaturas. Após a realização dos testes e ensaios, passou-se para a realização da segunda fase da pesquisa, sendo definido os parâmetros de controle e temperatura de calcinação do bagaço da cana-de-açúcar, bem como a sua caracterização.

Após caracterizado os precursores, iniciou-se a terceira fase da pesquisa, sendo analisado a dosagem e moldagem dos geopolímeros. A Figura 9 ilustra de forma esquemática a metodologia desenvolvida para a presente pesquisa. A organização foi criada através de um diagrama de blocos.

Figura 09 – Metodologia aplicada no presente estudo



Fonte: Autor (2021).

3.2.1 Estudo Piloto

3.2.1.1 Calcinações do resíduo de cana-de-açúcar

Segundo Cook (1986), a quantidade de sílica oriunda nas CBC's depende tanto da temperatura de calcinação, quanto do período de exposição. Segundo o autor, a temperatura de 500 à 600°C por menos de um minuto resulta em sílica totalmente amorfa. Estes limites de temperatura de queima dos resíduos e exposição não são consenso na área, sendo que algumas pesquisas citam que para se obter uma sílica totalmente amorfa, se faz necessário atingir temperatura de queima de 900°C por menos de uma hora (RODRIGUES, 2004).

Na incineração do bagaço a temperatura de 450 e 500°C, o carbono na cinza é mantido, sendo que a mesma apresenta uma cor escura, sendo um material amorfo, tendo altas quantidades de carbono. Este carbono que encontra-se na cinza pode ser removido através de uma nova queima, porém, a mesma demanda de uma temperatura mais elevada e um período de tempo maior para que possa modificar a estrutura da sílica contida na cinza (COOK, 1986).

Cordeiro (2006) em sua pesquisa obteve que as CBC's quando calcinadas a temperatura de 400 e 500°C apresentam estruturas amorfas, quando a temperatura se eleva para 600°C ocorre a presença de fases cristalinas. O autor ainda informa que a partir de 900°C as cinzas apresentam presença de cristobalita, sendo que, quanto maior a temperatura de calcinação maior será a quantidade de carbono liberada, resultando em cinzas mais claras.

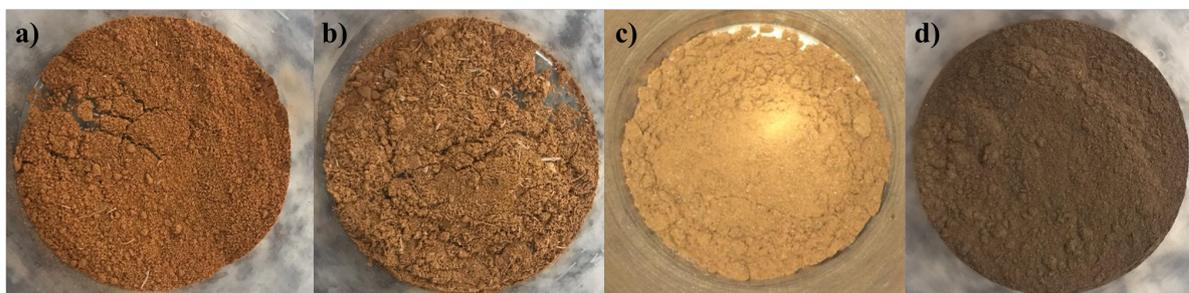
Em virtude da divergência de algumas pesquisas, sobre qual o melhor método de calcinação do bagaço da cana-de-açúcar (Cordeiro, 2006; Fernandes Filho, 2012; Castaldelli, 2013), optou-se por realizar um estudo piloto, para verificar as características resultantes das CBC's sob determinadas condições de queima.

Após a coleta dos resíduos de cana-de-açúcar realizou-se a calcinação em diferentes temperaturas (500°C, 600°C, 700°C e 800°C). Para o processo foi utilizado um forno mufla de marca Romate modelo SP2707-20-7RP, com capacidade de atingir até 1200°C, no laboratório de materiais e pavimentação da Faculdade Meridional – IMED, campus de Passo Fundo.

Os resíduos foram colocados em um recipiente refratário, e posteriormente colocados na mufla até atingir a temperatura desejada. Após atingir a temperatura esperada, o resíduo ficou exposto sob temperatura constante por um período de 1 hora. Após esse período, os resíduos foram retirados da mufla para assim sofrerem resfriamento de forma abrupta, resultando em materiais mais amorfos.

Depois do processo de resfriamento, foi possível obter as cinzas dos resíduos de cana-de-açúcar para as diferentes temperaturas. A Figura 10 ilustra os resíduos calcinados em diferentes temperaturas.

Figura 10 – Cinzas de resíduos de cana-de-açúcar calcinadas, a) 500°C, b) 600°, c) 700°C e d) 800°C.



Fonte: Autor (2021).

3.2.1.2 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA), foi realizada na Universidade de Caxias do Sul – UCS, na cidade de Caxias do Sul, estado do Rio Grande do Sul, e na Universidade Federal de Itajubá, na cidade de Itajubá, no estado de Minas Gerais. A análise teve como finalidade determinar a perda de massa em função da temperatura, tanto do bagaço de forma *in natura*, quanto dos resíduos calcinados a diferentes temperaturas (500°C, 600°C, 700°C e 800°C). As análises foram realizadas em um termogravimétrico Shimadzu – modelo TGA-50. A taxa de aquecimento utilizada nos testes foi de 10°C.min⁻¹, sob fluxo de 50 mL min⁻¹ de nitrogênio, na faixa de temperatura entre 20 e 900°C.

3.2.1.3 Reatividade pozolânica

A reatividade pozolânica das cinzas oriundas de diferentes temperaturas de calcinação (500°C, 600°C, 700°C e 800°C), foram determinadas com base na NBR

15895:2010, pelo método de Chapelle modificado. O ensaio teve por finalidade avaliar qual das cinzas tinha maior reatividade pozolânica, sendo este um parâmetro essencial para materiais cimentantes.

As pozolanicidade das cinzas dos resíduos de cana-de-açúcar foram determinadas com base na capacidade do material de fixar hidróxido de cálcio quando mantido em uma solução aquosa com óxido de cálcio. De forma simplificada, o método consiste em manter em aquecimento sob 90 °C em banho maria, durante no mínimo 16 horas em uma solução com 1,000 g de óxido de cálcio, 1,000 g de cinza e 250,00 g de água isenta de dióxido de carbono.

Ao final do ensaio, o teor de CaO livre é medido por meio de titulação de cerca de 50 mL da solução com ácido clorídrico (HCl) utilizando fenolftaleína (1 g/L) e estima-se a quantidade de CaO que foi combinada com as cinzas. O resultado é expresso pela quantidade de óxido de cálcio fixado por grama de cinza e estimado a reatividade pozolânica do material.

Segundo Raverdy *et al.* (1980), o índice mínimo de consumo de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para um material pozolânico deve ser de 300 mg/g utilizando o método de Chapelle modificado. O ensaio foi realizado no laboratório de química do curso de Engenharia Civil da Faculdade Meridional – IMED, campus de Passo Fundo.

3.2.1.4 Difrações de raio-x

Esta técnica foi utilizada para determinar as fases cristalinas e amorfas do precursor. A difração de raio-x (DRX), baseia-se no método de difração Fraunhoffe, que afirma que quanto menor for a partícula analisada, maior será o ângulo de difração de um feixe luminoso que travessará uma união de partículas.

Todas as cinzas calcinadas sob diferentes temperaturas foram analisadas. O ensaio foi realizado no laboratório de materiais do curso de engenharia química da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, localizada na cidade de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul. O equipamento utilizado no ensaio foi um difratômetro de raios X Rigaku, modelo Miniflex® 300, no qual possui radiação de $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,54051 \text{ \AA}$) e fonte de energia com 30 kV e 10 mA, permitindo aquisição de difratogramas com ângulos entre 5 e 100°.

O método utilizado no ensaio foi o de modo Step, com Scan speed de 0,5s e Scan step de 0,03°. As amostras enviadas para análise foram peneiradas em peneira com mesh de 60mm na porção de aproximadamente 1g.

3.2.1.5 Microscopias eletrônica de varredura

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram realizados com a finalidade de se estudar a morfologia e a superfície do resíduo. As microscopias eletrônicas de varredura foram realizadas no laboratório de materiais da Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Guaratinguetá.

Ainda para as CBC's calcinadas na temperatura de 500°C e 800°C a microscopia eletrônica de varredura foi combinada com a espectroscopia por energia dispersiva – EDS. O MEV combinado com EDS foi realizado na Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR, campus de São Carlos, estado de São Paulo.

3.2.1.6 Área superficial

Há inúmeros métodos de se determinar a área superficial de um material (Blaine, Absorção de éster, dentre outros). No presente experimento foi utilizado o método de consumo de azul de metileno para determinação da área superficial das cinzas calcinadas sobre diferentes temperaturas.

No sentido de avaliar o impacto de condições operacionais sobre a adsorção, os ensaios foram realizados em incubador rotativo a 30 °C e 150 rpm. Todos foram realizados em duplicata. Posteriormente, 1 mL da suspensão foi centrifugado durante 5 min a 8000 rpm, e o sobrenadante foi utilizado na determinação da concentração remanescente a partir da absorbância medida em espectrofotômetro (ThermoSpectronic Genesys 10 UV/Vis), a 660 nm.

3.2.2 Método de calcinação utilizado e Caracterizações

3.2.2.1 Calcinações do resíduo de cana-de-açúcar

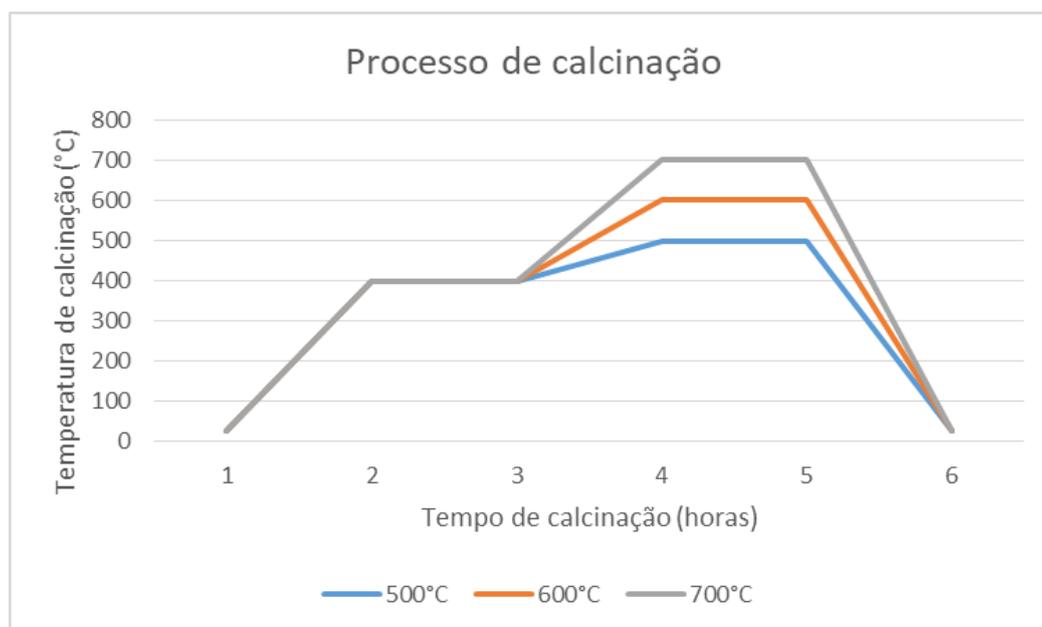
Após análises dos resultados obtidos no estudo piloto (apresentados no tópico 4), optou-se por utilizar as CBC's calcinadas nas temperaturas de 500, 600 e

700°C. As cinzas calcinadas na temperatura de 800°C não serão objeto da análise em virtude de sua baixa quantidade de material resultante após sua calcinação.

Vale ressaltar que o processo de calcinação foi alterado em virtude dos resultados obtidos na análise termogravimétricas das cinzas ainda no estudo piloto, pois observou-se que quando calcinada a temperatura de 400°C ainda havia liberação de carbono. Buscando uma maior quantidade de eliminação de carbono no processo de calcinação, visto que este exerce grande influência no aspecto da resistência mecânica, a cinza foi colocada em um recipiente refratário e permaneceu na mufla até atingir a temperatura de 400°C. O resíduo permaneceu sob essas condições por um período de 1 hora. Findo o processo supracitado, a mufla foi reprogramada para atingir a temperatura de calcinação final (500, 600 e 700°C), sendo atingida a temperatura reprogramada, os resíduos ficaram expostos mais 1 hora.

Após esse período de calcinação os resíduos foram retirados da mufla para assim sofrerem resfriamento de forma abrupta, resultando em materiais mais amorfos. O processo de aquecimento e resfriamento dos resíduos são demonstrados no Gráfico 02.

Gráfico 02 – Processo de calcinação adotado na presente pesquisa



Fonte: Autor (2021).

3.2.2.2 Reatividade pozolânica

A reatividade pozolânica das cinzas oriundas de diferentes temperaturas de calcinação (500, 600 e 700°C), foram determinadas com base na NBR 15895:2010, pelo método de Chapelle modificado. O ensaio teve por finalidade avaliar qual das cinzas tinha maior reatividade pozolânica, sendo este um parâmetro essencial para substâncias que visam ser constituintes de materiais cimentantes. O processo utilizado no ensaio foi o mesmo relatado no item 3.2.1.3.

3.2.2.3 Difrações de raio-x

Esta técnica foi utilizada para determinar as fases cristalinas e amorfas do precursor. A difração de raio-x (DRX), baseia-se no método de difração Fraunhoffer, que afirma que quanto menor for a partícula analisada, maior será o ângulo de difração de um feixe luminoso que travessará uma união de partículas.

O ensaio foi realizado no laboratório de materiais do curso de engenharia química da Universidade Federal de Itajubá, na cidade de Itajubá, no estado de Minas Gerais, nas amostras calcinadas a 500, 600 e 700°C. O equipamento utilizado no ensaio foi um difratômetro de raios X Rigaku, modelo Miniflex® 300, no qual possui radiação de Cu K α ($\lambda = 1,54051 \text{ \AA}$) e fonte de energia com 30 kV e 10 mA, permitindo aquisição de difratogramas com ângulos entre 5 e 100°.

O método utilizado no ensaio foi o de modo Step, com Scan speed de 0,5s e Scan step de 0,03°. As amostras enviadas para análise foram peneiradas em peneira com mesh de 60mm na porção de aproximadamente 1g.

3.2.2.4 Espectrômetro de fluorescência de Raio-X (FRX)

A técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), é um método para determinação precisa, rápida e não destrutiva para análises elementares, tanto quantitativas quanto qualitativas usando o princípio de medida de comprimento de onda e intensidade das radiações emitidas pelos elementos. Os elementos que compõem a amostra são excitados por uma fonte primária de radiação, que passam a emitir uma radiação de comprimentos de onda característicos de cada elemento (raios-X fluorescentes).

Através de um detector apropriado, pode-se medir este comprimento de onda e consequentemente identificar os elementos (análise qualitativa). Como a intensidade dos raios-X fluorescentes é proporcional a concentração de cada elemento, pode-se então quantificá-los. A técnica de FRX foi utilizada nas CBC's calcinadas na temperatura de 500, 600 e 700°C, para avaliar se a temperatura de calcinação dos resíduos de cana-de-açúcar influencia na relação de Si/Al, o ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização Microestrutural – LAMACI, de Criciúma.

3.2.2.5 Área superficial

O processo foi desenvolvido igual ao citado no item 3.2.1.6 do presente capítulo.

3.2.3 Ativação

A ativação do compósito se deu através da utilização do hidróxido de sódio e silicato de sódio combinados. A escolha dos ativadores decorre do fato de a mesma apresentar resultados satisfatórios quando empregados como ativador na mistura, como relatam os autores Kaze et al., 2018; Rifaai et al., 2019; Livi, 2013; Castadelli, 2013.

O hidróxido de sódio (NaOH) empregado, apresenta-se em formas de micro pérolas com 99% de pureza. O mesmo foi diluído em água comum distribuída pelo sistema público de abastecimento da cidade de Passo Fundo/RS. O Silicato de sódio empregado é do tipo C-112 com densidade de 1,480 ~ 1,670 g/cm³ (25°C), pH de 12,0, viscosidade de 800 ~ 30000 cP, peso molecular de 194,00 e uma relação sílica/sódio de 2,20 com percentuais máximos de 33% de óxido de sílica (SiO₂), 15,5% de óxido de sódio (Na₂O).

Para a presente pesquisa, a dosagem dos geopolímeros seguiu a dosagem proposta na pesquisa realizada pelo autor Longhi *et al.* (2019). Levou-se em consideração a razão do módulo de sílica, expresso como SiO₂/ M₂O, onde utilizou-se o valor de 1,0. A Equação 1 foi utilizada para o cálculo de módulo de sílica.

$$M_{s/s} = \frac{SiO_2 \text{ Silicato de sódio}}{Na_2O \text{ Silicato de sódio} + Na_2O \text{ Hidróxido de sódio}} \quad [1]$$

A concentração do teor de álcalis também seguiu o proposto pelo autor supracitado. Os valores adotados para composição da pasta foi de $M_2O = 20\%$. As porcentagens de incorporação de cana-de-açúcar nas misturas foram respectivamente: 0% CBC, 25% CBC, 50% CBC. A Tabela 5 apresenta a dosagem proposta para cada teor de álcalis, bem como, para cada porcentagem de incorporação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) na mistura. Sendo apenas alterado

Tabela 05 – Formulação empregada na pasta geopolimérica.

Descrição	Mk (g)	CBC (g)	NaOH (g)	SS (g)	H ₂ O (g)
0% CBC [20] (1,0)	50,00	0,00	6,65	32,90	22,4
25% 500CBC [20] (1,0)	37,50	12,5	6,65	32,90	22,4
50% 500CBC [20] (1,0)	25,00	25,00	6,65	32,90	22,4
25% 600CBC [20] (1,0)	37,50	12,5	6,65	32,90	22,4
50% 600CBC [20] (1,0)	25,00	25,00	6,65	32,90	22,4
25% 700CBC [20] (1,0)	37,50	12,5	6,65	32,90	22,4
50% 700CBC [20] (1,0)	25,00	25,00	6,65	32,90	22,4

* Os valores expressos com a simbologia [] representam a concentração de álcalis (NaO₂) em porcentagem e os valores apresentados com a simbologia () representam o módulo de sílica (MS).

Fonte: Autor (2021).

3.2.4 Resistências a compressão simples

A análise de resistência a compressão das amostras geopolimérica, foi realizada de acordo com a ABNT NBR 7215: 1996. Esta norma destina-se à avaliação de amostras produzidas com cimento Portland, porém como não existe padrões para a caracterização e avaliação de pastas geopolimérica, foi utilizado a norma supracitada como base para avaliar a resistência a compressão das misturas.

Foram moldados seis corpos de prova para cada traço e idade, de 1x1cm, para posteriormente a determinação da resistência a compressão, conforme demonstrado na Figura 11.

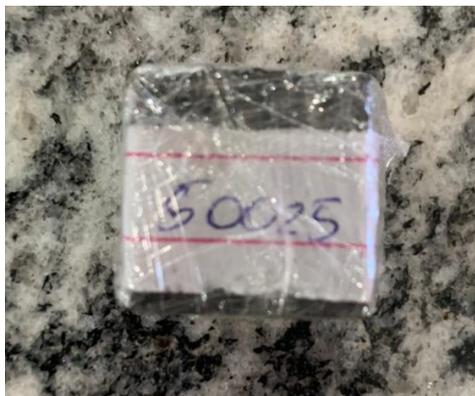
Figura 11 – Corpos de prova dos geopolímeros



Fonte: Autor (2021).

A cura dos corpos de prova foi realizada por meio de cura úmida a temperatura ambiente, com a finalidade de se evitar a perda de água na mistura, os corpos de prova após desmoldados foram envelopados em um papel filme (figura 12) e colocados em uma câmara úmida, conforme recomendação de Fernandes Filho (2012). O rompimento dos corpos de prova por compressão simples ocorreu nas idades de cura de 7, 14 e 28 dias.

Figura 12 – Corpos de prova dos geopolímeros envelopados



Fonte: Autor (2021).

Para tratamento dos dados e análise da influência da temperatura de calcinação das CBC's para produção de geopolímeros, foi utilizado o método ANOVA na análise da variância dos dados de resistência a compressão das pastas geopoliméricas.

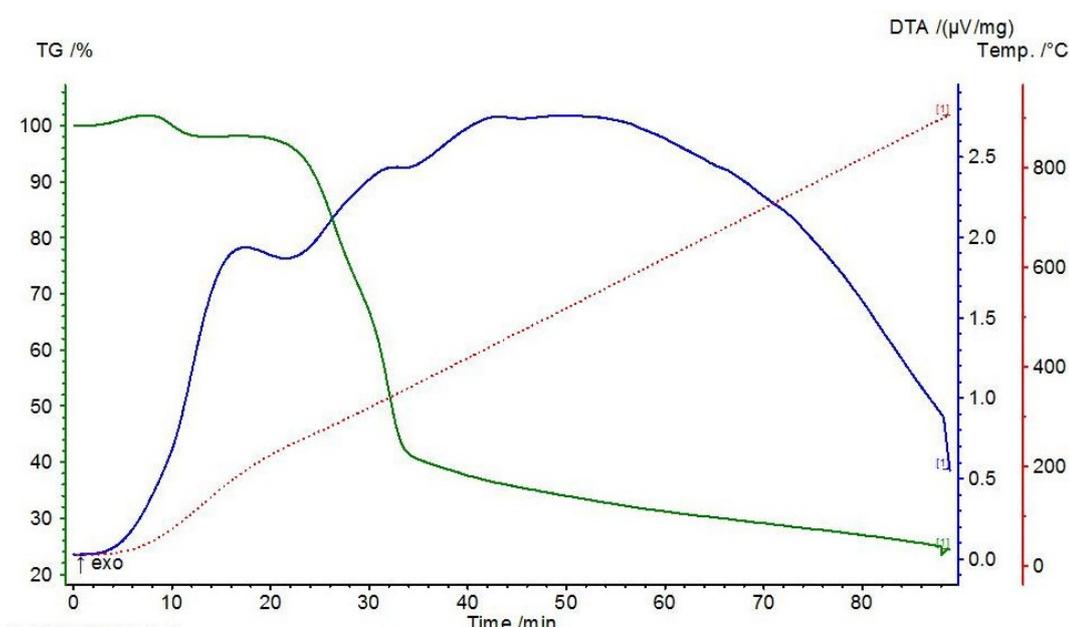
RESULTADOS

4.1 Estudos piloto

4.1.1 Análises termogravimétrica

A análise das CBC calcinadas em diferentes temperaturas por meio da análise termogravimétrica (TGA), determinou a transformação ou decomposição dos materiais quando submetidos a elevadas temperaturas. A Figura 13 apresenta o resultado da análise do bagaço da cana-de-açúcar *in natura*, onde foi possível verificar que na temperatura de 100°C, o resíduo perdeu cerca de 2% de sua massa, sendo esta perda resultante da decomposição da água intracelular na amostra. A 400°C a amostra perdeu cerca de 58% de sua massa, sendo este referente a decomposição da lignina presente na amostra. A 640°C, ocorreu um pico de perda de massa de aproximadamente 68% de sua massa, resultante da perda de quase toda a matéria orgânica da amostra. O último pico de perda de massa, ocorreu a 850°C, nesta temperatura toda a matéria orgânica da amostra foi consumida restando apenas os óxidos não voláteis na amostra.

Figura 13 – Análise termogravimétrica para o bagaço *in natura*

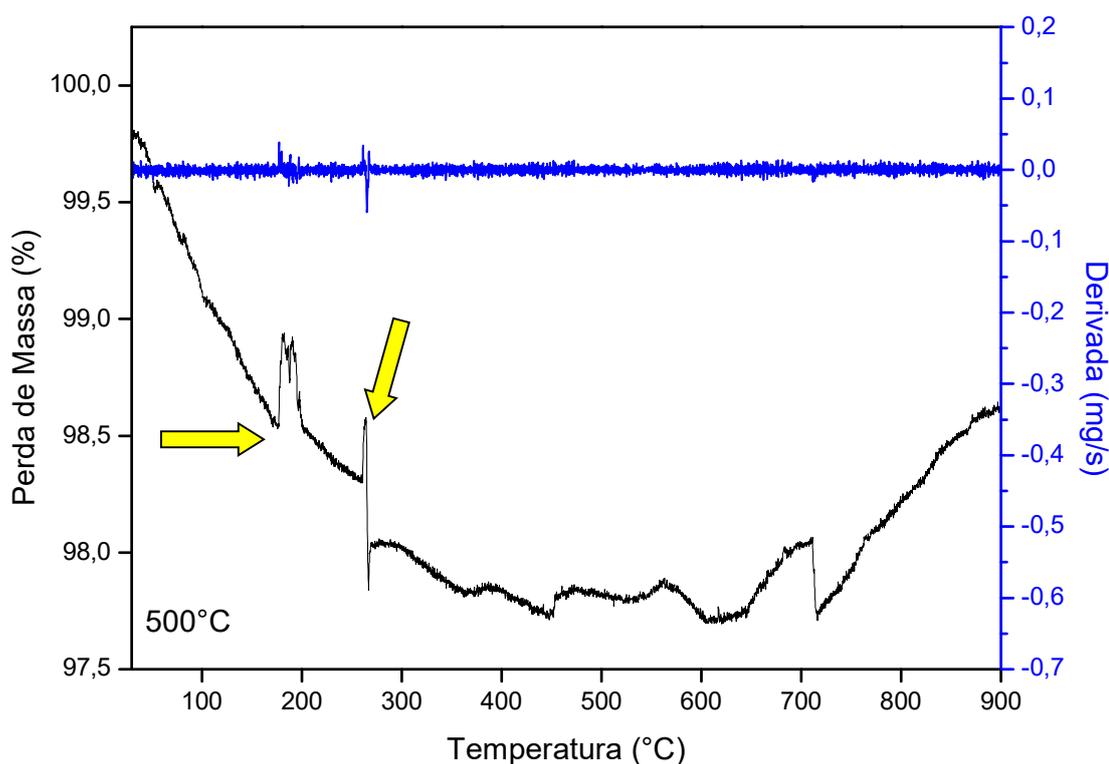


Fonte: Autor (2021).

A Figura 14 apresenta os dados de perda de massa das CBC calcinada a temperatura de 500°C, juntamente com a sua derivada, quando submetidas ao

ensaio de TGA. Através da análise é possível notar que houve uma perda de massa a uma temperatura de aproximadamente 144°C, esta perda diz respeito a decomposição da água intracelular na amostra. A segunda perda de massa da amostra ocorreu na temperatura de 267°C que diz respeito a decomposição da celulose presente na amostra. Os dados obtidos são condizentes aos dados obtidos por Castaldelli (2013).

Figura 14 – Curvas TG e derivada para CBC 500°C



Fonte: Autor (2021).

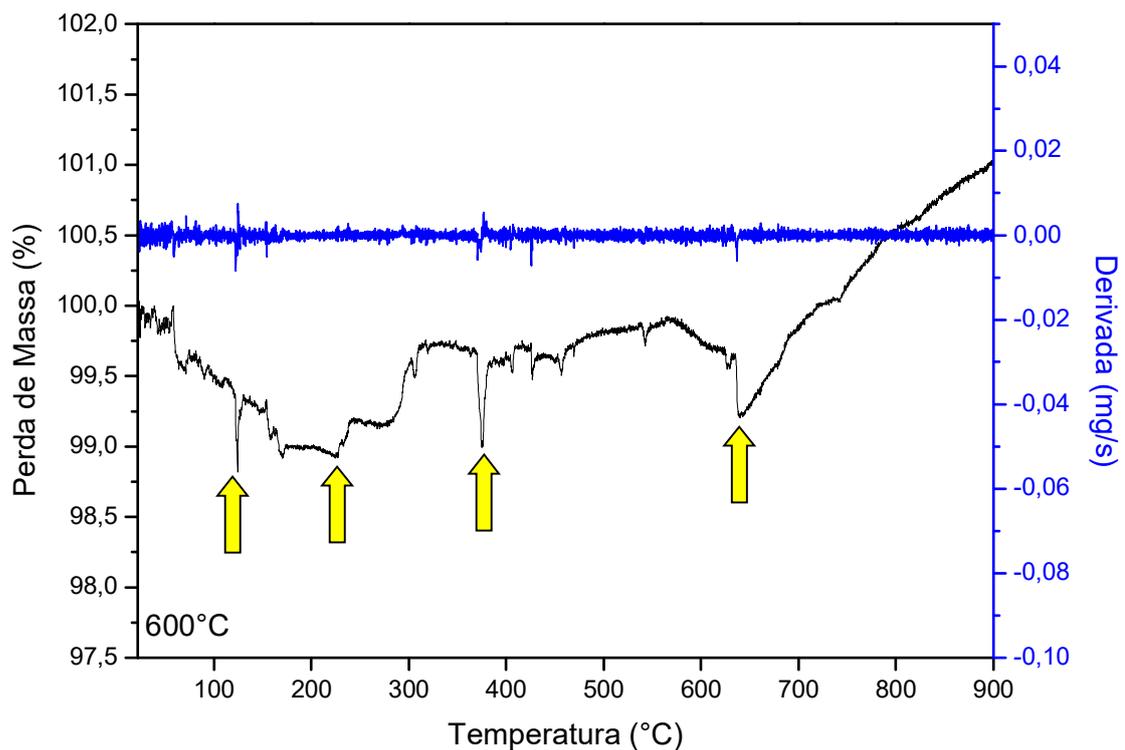
Na Figura 15 é apresentada as curvas TG e derivada para a CBC calcinada na temperatura de 600°C. Ao analisar é possível observar a perda de massa decorrente da decomposição da água intracelular e da celulose nas temperaturas de 112°C e 250°C respectivamente.

Ainda é possível notar uma perda de massa na temperatura de 390°C, está perda de massa diz respeito a decomposição da lignina presente na amostra. A partir da temperatura de 640°C ocorre a decomposição de óxidos presente na amostra, gerando oxidações e conseqüentemente ganho de massa na amostra.

Este comportamento de ganho de massa em resíduos de cana-de-açúcar é reportado discutido na pesquisa de Soares (2007). Segundo o autor, os resíduos de

cana-de-açúcar contêm em sua composição óxidos não voláteis que quando atingem temperaturas acima de 600°C geram um ganho de massa da amostra. Ainda ressalta-se que os dados de perda de massa corroboram com os resultados encontrados na literatura (BIGNO, 2008; CASTALDELLI, 2013).

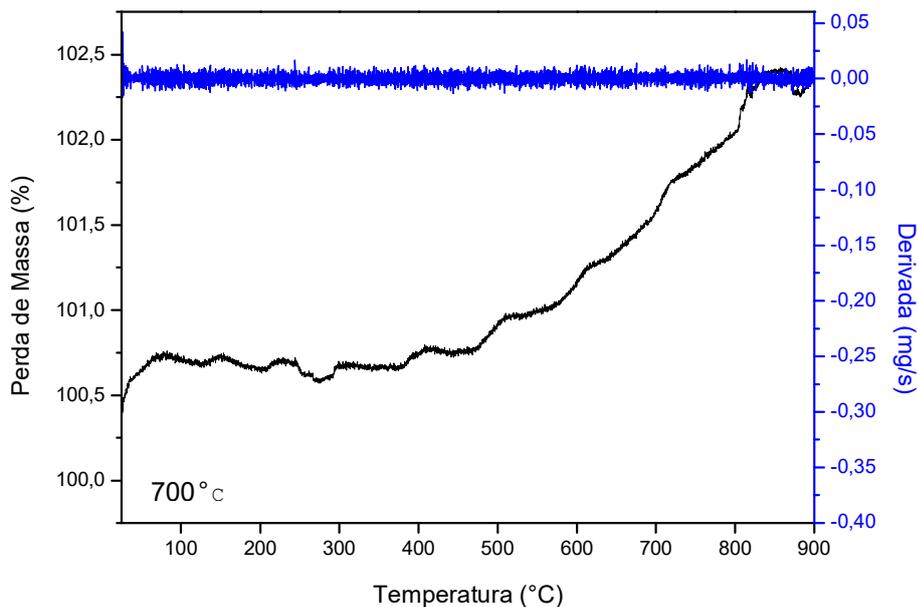
Figura 15 – Curvas TG e derivada para CBC 600°C



Fonte: Autor (2021).

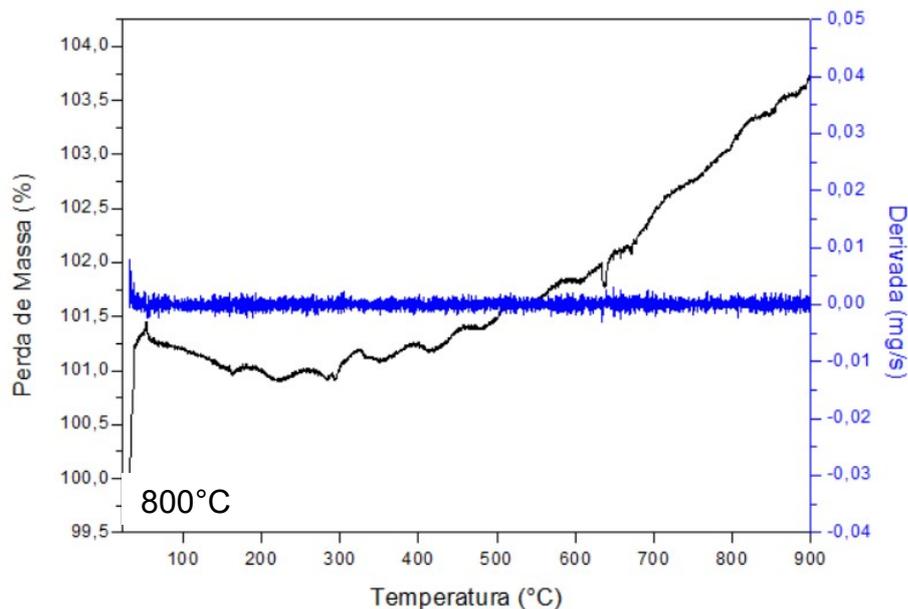
Para as cinzas calcinadas em temperatura de 700°C, observou-se que o resíduo não obteve perda de massa e sim um ganho de massa. Este resultado pode ser justificado pela oxidação do ferro (Fe) presente nas amostras do material (Cordeiro, 2006). Segundo Silva (2013), os óxidos de ferro se transformam em Goethita, Hematita e Magnetita nas temperaturas de 450°C, 700°C e 900°C., com a degradação da matéria orgânica pela temperatura de calcinação, os óxidos presentes nas amostras começam a se transformar. Este fenômeno provoca um ganho de massa na amostra. Este ganho de massa é mais evidente nas curvas de TG e derivada apresentadas na Figura 16 e 17 para a CBC's calcinadas na temperatura de 700°C e 800°C respectivamente.

Figura 16 – Curvas TG e derivada para CBC 700°C



Fonte: Autor (2021).

Figura 17 – Curvas TG e derivada para CBC 800°C



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 06 apresenta os dados de perda de massa de cada CBC produzida em diferentes temperaturas de calcinação. Nela é possível observar que quanto maior a temperatura de calcinação dos resíduos das CBC, menor será a perda de massa do material quando submetido a altas temperaturas.

Estes corroboram com os dados que Cordeiro (2006) obteve em sua pesquisa. Todos as temperaturas de calcinação as CBC's atenderam aos requisitos da NBR 12653:2014 no aspecto de perda de massa.

Tabela 06 – Perda de massa das CBC

Temperatura de calcinação das CBC	Perda de massa (%)
500°C	2,297
600°C	1,086
700°C	-2,390
800°C	-3,695

Fonte: Autor (2021).

4.1.2 Reatividade pozolânica

A reatividade pozolânica das CBC calcinadas em diferentes temperaturas foi definida pelo método de Chapelle modificado. O ensaio teve a finalidade de terminar qual das CBC possui maior atividade pozolânica e consequente maior poder de reação pozolânica quando utilizado para a produção do geopolímero. A Tabela 07 apresenta os índices de atividade pozolânica das CBC obtidos de diferentes temperaturas pelo método de Chapelle modificado.

Tabela 07 – Índice de atividade pozolânica

Temperatura de calcinação das CBC	I Ca (OH) ₂ (mg/g)
500°C	369,86
600°C	367,67
700°C	359,08
800°C	342,61

Fonte: Autor (2021).

Ao analisar a Tabela 07 é possível verificar que conforme a temperatura de calcinação das CBC's foi elevada, ocorreu uma similaridade no índice de atividade pozolânica, sendo verificado que a cinza que resultou em uma maior atividade, foi a cinza calcinada na temperatura de 500°C. Os valores da atividade pozolânica

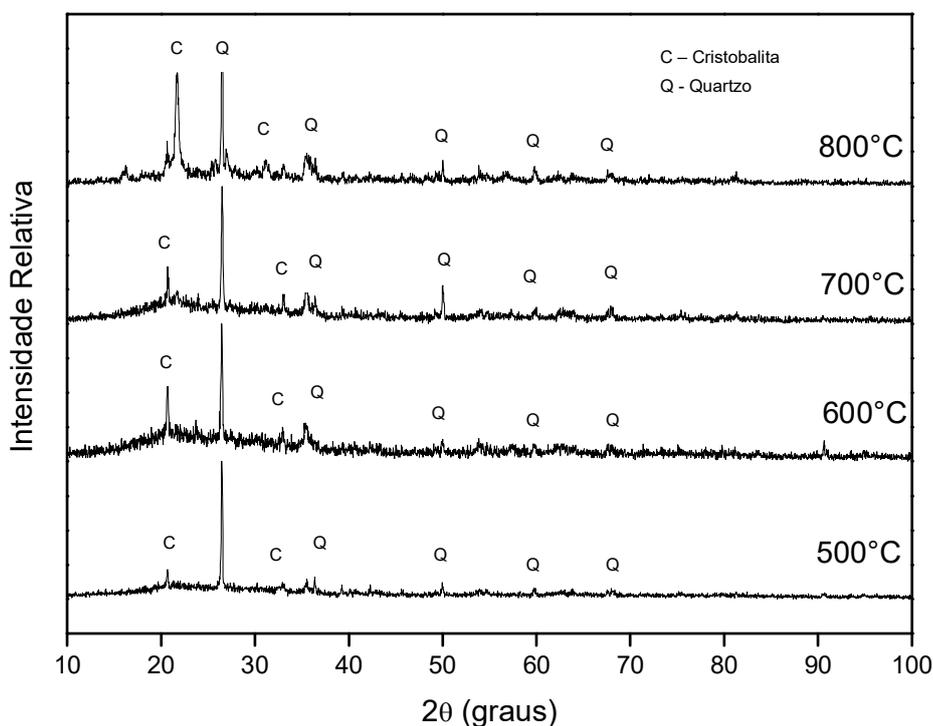
obtidos na presente pesquisa corroboram com os dados obtidos por Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009).

A CBC calcinada a temperatura de 800°C foi a que obteve menor índice de atividade pozolânica, sendo ainda acima do valor mínimo estabelecido por Raverdy *et al.* (1980), de 330 mg/g para um material pozolânico, já as demais cinzas atendem este parâmetro, apresentando uma similaridade entre a temperatura de calcinação e o índice pozolânico.

4.1.3 Difração de raio-x

Através do ensaio de difração de raio-x, foi possível fazer a análise da mineralogia dos materiais, identificando as fases cristalinas e amorfas das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. A Figura 18 apresenta os difratogramas das cinzas calcinadas em diferentes temperaturas.

Figura 18 – Difratogramas das cinzas de cana-de-açúcar



Fonte: Autor (2021).

Ao analisar os difratogramas é possível verificar que ambas as cinzas apresentam picos elevados situados no ângulo de $2\theta \sim 26^\circ$, estes picos são característicos do mineral quartzo (sílica cristalina), presente na composição das

CBC. Ainda a presença do quartzo na amostra pode ser explicada pela contaminação do material na hora da colheita, pelo solo de origem.

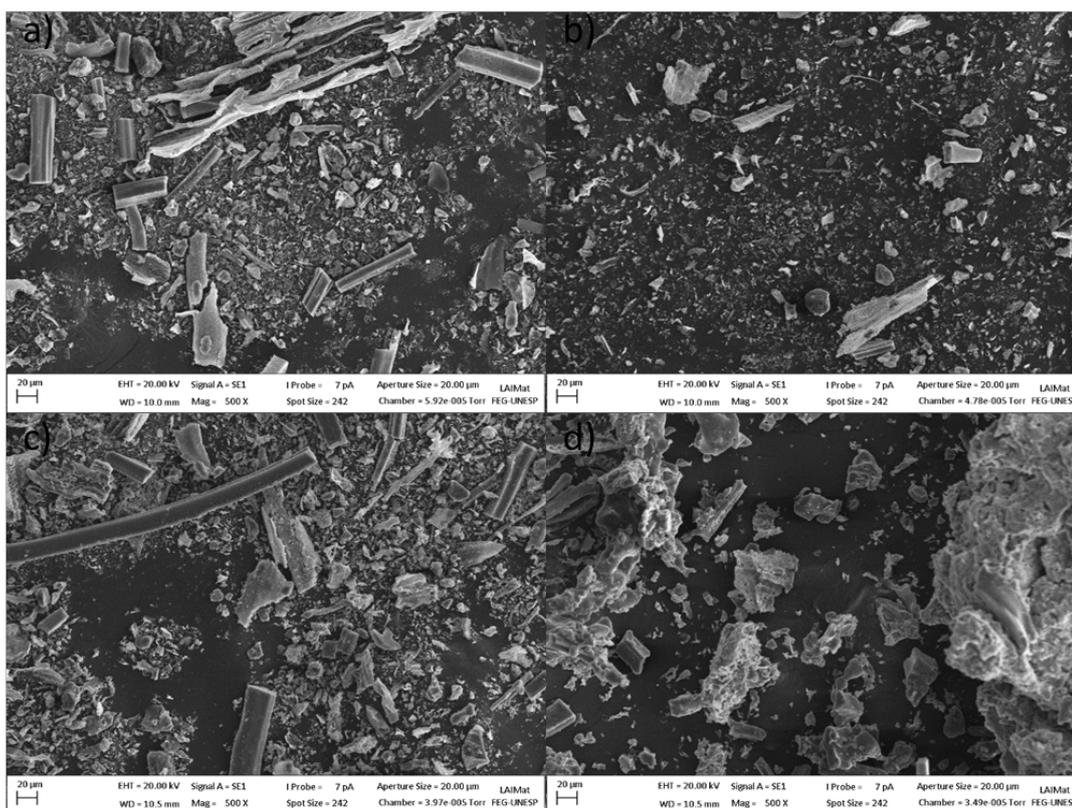
Ainda na posição de $2\Theta \sim 21^\circ$ é possível observar a presença de cristobalita em todas as temperaturas de calcinação, sendo que o grau de cristalinidade da cristobalita vai aumentando concomitantemente a medida em que a temperatura de calcinação se eleva, conforme demonstra os aumentos da intensidade dos picos nesta posição (Cordeiro, 2006).

Em análise aos difratogramas pode ser verificado que a cinza calcinada na temperatura de 600°C e 700°C apresentaram um halo no início dos seus difratogramas, indicando que as mesmas possuem estruturas mais amorfas do que nas cinzas de 500°C e 800°C , que apresentaram um difratograma mais paralelo ao eixo, representando uma estrutura mais cristalina. Os resultados dos difratogramas não geram uma similaridade com os dados obtidos na reatividade pozolânica, uma vez que as cinzas que obtiveram um maior halo amorfo, apresentaram índices de atividade não maiores.

4.1.4 Microscopia eletrônica de varredura

Através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível fazer a análise da morfologia dos resíduos da cana-de-açúcar calcinados em diferentes temperaturas. A Figura 19 apresenta as imagens de MEV em escala de $20\mu\text{m}$, sendo que as legendas significam a temperatura em que os resíduos foram calcinados (a= 500°C , b= 600°C , c= 700°C e d= 800°C).

Figura 19 – MEV das CBC em escala de 20µm

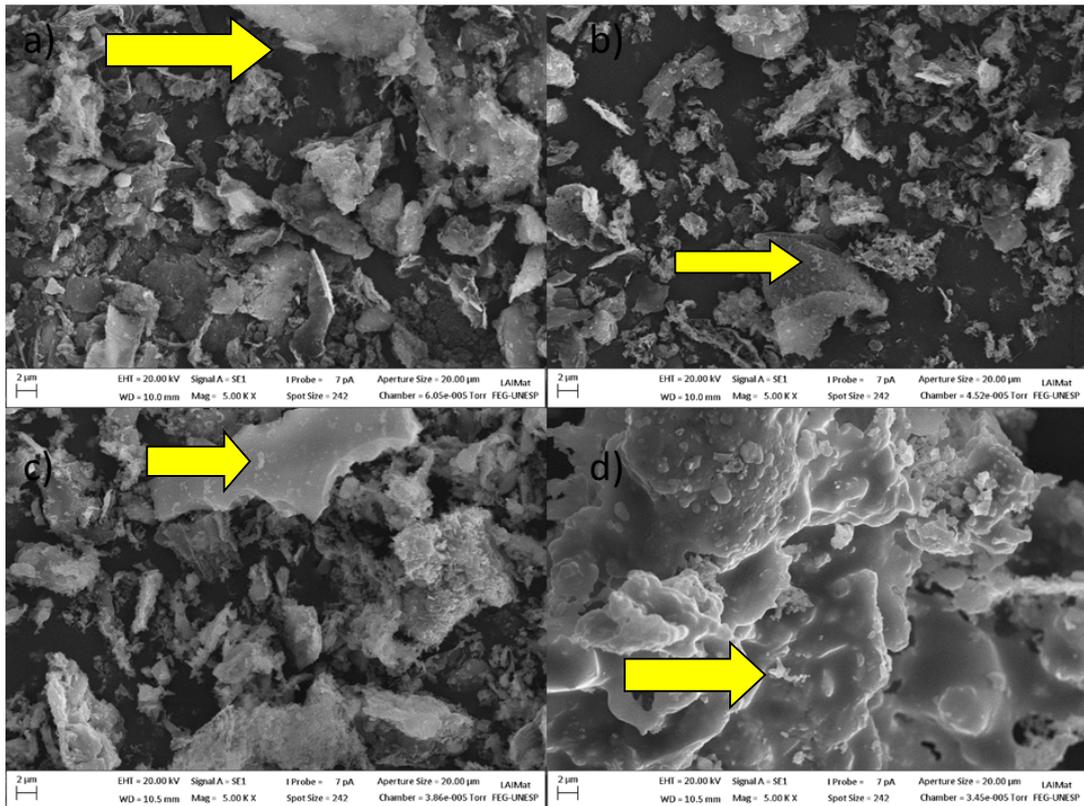


Fonte: Autor (2021).

Ao analisar a Figura 19 é possível constatar que as CBC's possuem uma superfície rugosa e de formato irregular, ainda é possível observar que as cinzas dos resíduos possuem uma superfície porosa, condizentes com os resultados obtidos por Apolônio (2017). Pode-se inferir que a maior presença de partículas alongadas na amostra de 500°C expressa que o processo de calcinação não foi suficiente para a queima completa do bagaço de cana-de-açúcar (Fernandes Filho, 2012).

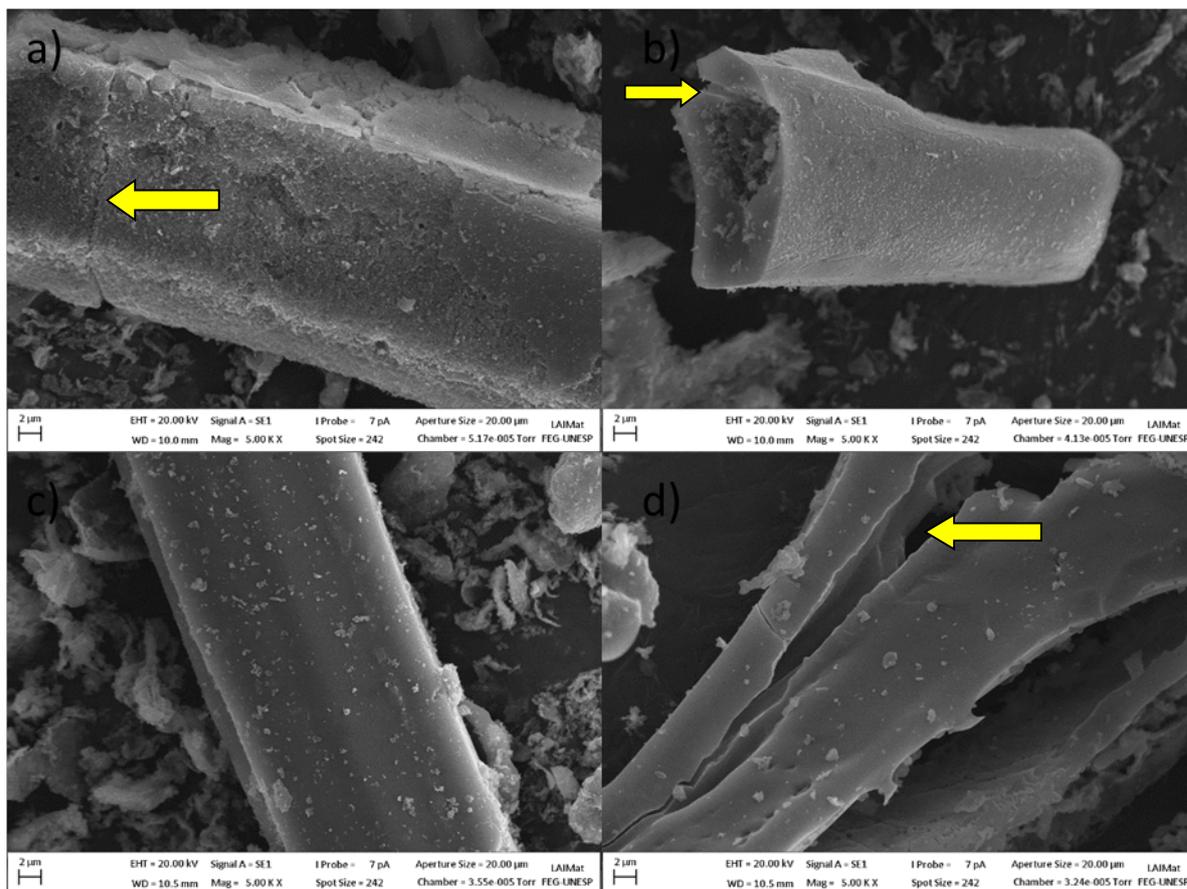
A Figura 20 apresenta os MEV's realizados nas CBC's em escala de 2µm. Nela é possível observar pequenas impurezas que estão indicados nas imagens. Constata-se ainda que as CBC possuem uma granulometria extremamente fina, ao ponto de em alguns pontos aglomerarem-se, este resultado condiz com os resultados observados por Fernandes Filho (2012).

Figura 20 – MEV das CBC em escala de 2µm



Fonte: Autor (2021).

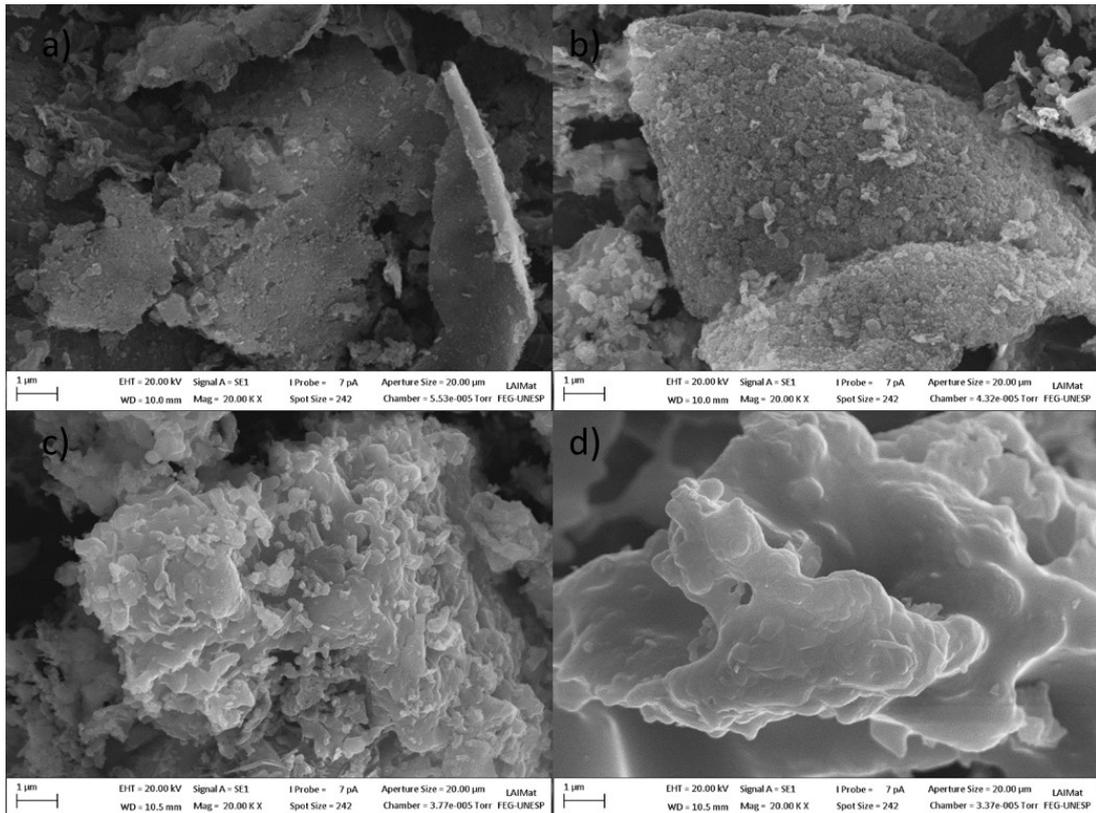
Na Figura 21, é possível observar que a calcinação dos resíduos de cana-de-açúcar ocasionou uma fratura nas fibrilas (parte da celulose) das CBC's, em alguns pontos conforme estão apontados, percebendo que quando maior a temperatura de calcinação maior será a fratura das fibrilas. Contudo ressalta-se que nem todas as fibrilas sofreram fraturas, pois o sistema da CBC é um sistema muito heterogêneo.

Figura 21 – MEV das CBC sob escala de 2 μ m

Fonte: Autor (2021).

Na Figura 22 é apresentado os MEV's sob escala de 1 μ m, neles é possível observar que com as fraturas das fibrilas os componentes não cristalinos começaram a sair da amostra, conforme o grau de fratura da fibrila (quanto maior a fratura, maior a saída de componentes não cristalino). Esses componentes não cristalinos que saíram das fibrilas ficaram depositados na superfície do material e devido a elevada temperatura de calcinação se aglomeraram com o restante do resíduo, provocando uma mudança significativa na superfície e morfologia das CBC's.

Figura 22 – MEV das CBC sob escala de 1µm



Fonte: Autor (2021).

4.1.5 Área superficial

Os valores da área superficial encontrada estão apresentados na Tabela 08. Neles é possível verificar que quanto maior a temperatura de calcinação, menor será as áreas superficiais. Ao comparar os dados da tabela 07, com os dados da reatividade pozolânica, percebe-se que ocorre a similaridade dos dados, sendo que quanto maior a área superficial do resíduo, maior será sua reatividade.

Tabela 08 – Área superficial da CBC's

Temperatura de calcinação das CBC	Área superficial (m ² /g)
500°C	26,87
600°C	26,24
700°C	23,75
800°C	21,85

Fonte: Autor (2021).

Os valores encontrados corroboram com as pesquisas de Nunes (2009) e Paula (2006). Em uma analogia é possível verificar que quanto maior a área superficial da cinza de cana-de-açúcar menor foi a atividade pozolânica da mesma (NUNES, 2009).

4.2 Método de calcinação e caracterização

4.2.1 Reatividade pozolânica

A reatividade pozolânica das CBC calcinadas em diferentes temperaturas foi definida pelo método de Chapelle, com a finalidade de determinar qual das CBC possui maior atividade pozolânica e conseqüente maior poder de reação pozolânica quando utilizado para a produção do geopolímero. A Tabela 09 apresenta os índices de atividade pozolânica das CBC obtidos de diferentes temperaturas pelo método de Chapelle modificado.

Tabela 09 – Índice de atividade pozolânica

Temperatura de calcinação das CBC	I Ca (OH) ₂ (mg/g)
500°C	385,96
600°C	357,13
700°C	346,64

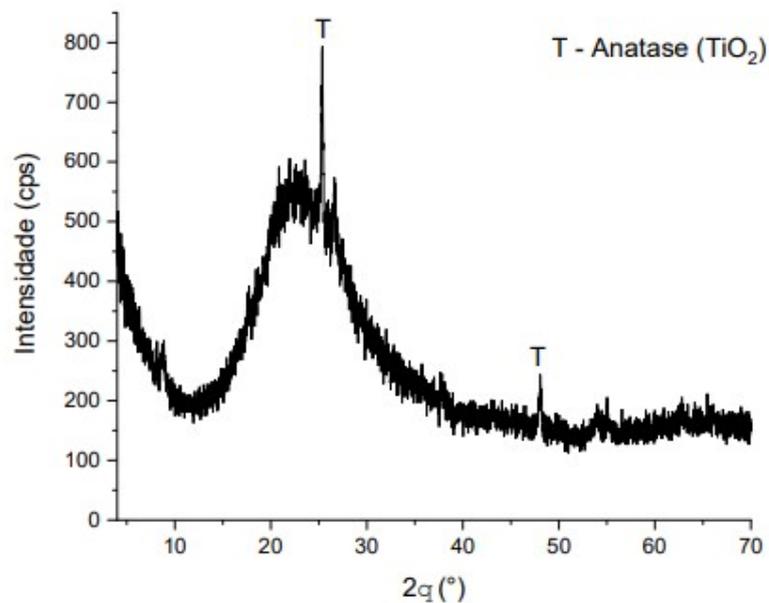
Fonte: Autor (2021).

Ao analisar a Tabela 07 é possível verificar novamente, que conforme a temperatura de calcinação das CBC's foi elevada, ocorreu uma similaridade no índice de atividade pozolânica, sendo verificado que novamente a cinza que resultou em uma maior atividade, foi a cinza calcinada na temperatura de 500°C. A CBC calcinada a temperatura de 700°C, foi a que obteve menor índice de atividade pozolânica, sendo ainda superior ao valor mínimo estabelecido por Raverdy *et al.* (1980), de 330 mg/g para um material pozolânico.

4.2.2 Difração de raio-x

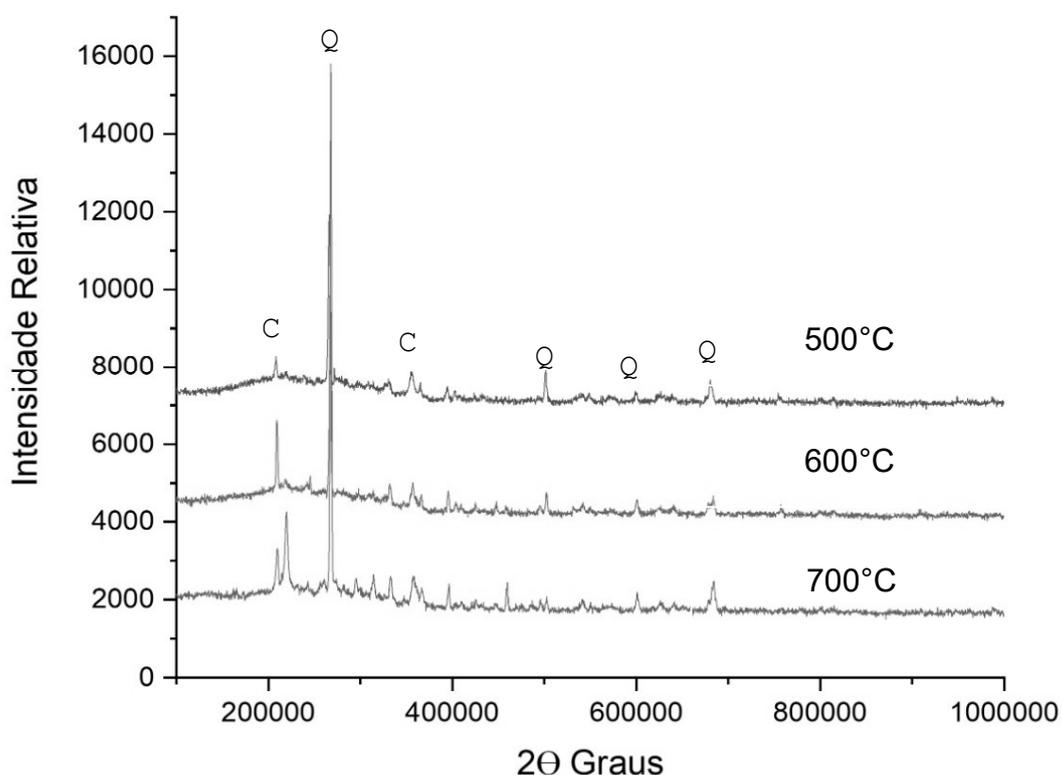
Através do ensaio de difração de raio-x, foi possível fazer a análise da mineralogia dos materiais, identificando as fases cristalinas e amorfas das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. A Figura 23 apresenta o difratograma realizado no precursor metacaulim, sendo que ao analisar percebe que ele é amorfo em virtude da presença bem definida do halo, ainda, o mesmo apresenta alguns picos situados no ângulo de $2\theta \sim 26^\circ$, no qual é Anatase (TiO_2). Na Figura 24 apresenta o difratograma realizado nos resíduos de cana-de-açúcar calcinados sob diferentes temperaturas.

Figura 23 – DRX realizado no metacaulim



Fonte: Autor (2021).

Figura 24 – Difratomogramas das cinzas de cana-de-açúcar



Fonte: Autor (2021).

Ao analisar os difratogramas da Figura 24 é possível verificar que ambas as cinzas apresentam picos elevados situados no ângulo de $2\theta \sim 26^\circ$, estes picos são característicos do mineral quartzo (sílica cristalina), presente na composição das CBC. Ainda a presença do quartzo na amostra pode ser explicada pela contaminação do material na hora da colheita, pelo solo de origem.

Ainda na posição de $2\theta \sim 21^\circ$ é possível observar a presença de cristobalita em todas as temperaturas de calcinação, sendo que mais uma vez, o grau de cristalinidade da cristobalita vai aumentando concomitantemente a medida em que a temperatura de calcinação se eleva, conforme demonstra os aumentos da intensidade dos picos nesta posição (Cordeiro, 2006).

4.2.3 Espectrômetro de fluorescência de raio-X (FRX)

Através do ensaio de espectrômetro de fluorescência de raio-x realizado nas amostras de cinzas calcinadas sob diferentes temperaturas, foi possível determinar os elementos presentes na amostra. Na tabela 10 é apresentado os resultados obtidos através do ensaio.

Tabela 10 – Composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Composição (% em massa)			
Composição de óxidos	500°C	600°C	700°C
SiO ₂	51,454	52,534	51,263
Fe ₂ O ₃	17,888	16,966	19,500
K ₂ O	8,543	8,381	7,068
Al ₂ O ₃	5,234	5,363	5,293
TiO ₂	4,349	4,012	3,906
P ₂ O ₅	3,451	3,898	3,280
CaO	3,271	3,417	5,906
SO ₃	2,671	2,868	1,392
MgO	1,448	1,380	1,337
MnO	0,697	0,636	0,623
Outros	0,994	0,545	0,432

Fonte: Autor (2021).

Para que o resíduo seja considerado um material pozolânico, o somatório dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e FeO₃ deve apresentar no mínimo 50% dos óxidos constituintes (ASTM C-618, 2012). Sendo assim, é possível observar que as cinzas de cana-de-açúcar analisadas, atendem as condições impostas pela norma supracitada, apresentando um somatório de óxidos de aproximadamente 73%. Desta forma, pode-se inferir que a CBC pode ser considerada uma fonte de silicato, podendo assim ser utilizada para obtenção de materiais álcali ativados.

Nota-se que os teores de dióxido de silício (SiO₂) são superiores a 50%, em massa, apesar de se perceber uma pequena variação dos valores de sílica nas amostras, constata-se que este elemento é o composto predominante em todas as cinzas analisadas.

Segundo Cordeiro (2006), a presença de sílica em grande porcentagem decorre pela adsorção do silício do solo pelas raízes da cana na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4). Após a evaporação da água da planta, a sílica se deposita nas paredes externas das células da epiderme. Segundo Sangster (2001), o silício é depositado em forma laminar nas paredes e apresenta-se na forma amorfa. Ainda, de acordo com Cordeiro (2006), outra fonte importante de sílica é a areia (quartzo), presente na amostra pelo processo de colheita.

A relação molar de SiO_2/Al_2O_3 das cinzas calcinadas a 500, 600 e 700°C ficaram em 5,79, 5,77 e 5,70 respectivamente. Estas relações molares estão de acordo com o observado em demais trabalhos acadêmicos na área (CORDEIRO, 2006; PAULA, 2006; NUNES, 2009).

Na tabela 11 é apresentado os dados do FRX realizado no metacaulim utilizado também como precursor do geopolímero. Conforme dados abaixo, a relação molar de SiO_2/Al_2O_3 do metacaulim foi de 0,77.

Tabela 11 – Composição química do metacaulim.

Composição de óxidos	Composição (% em massa)
SiO ₂	55,062
Al ₂ O ₃	41,959
TiO ₂	1,850
Fe ₂ O ₃	0,641
K ₂ O	0,205
Outros	0,283

Fonte: Autor (2021).

4.2.4 Área superficial

Os valores da área superficial encontrada estão apresentados na Tabela 12. Neles é possível verificar que quanto maior a temperatura de calcinação não ocorreu similaridade as áreas superficiais. Ao comparar os dados da Tabela 11 com os dados da Tabela 07, percebe-se que com o aumento do tempo de calcinação do método 2, obteve-se cinzas com área superficial maior.

Tabela 12 – Área superficial da CBC's

Temperatura de calcinação das CBC	Área superficial (m ² /g)
500°C	28,69
600°C	24,63
700°C	23,77

Fonte: Autor (2021).

Observa-se ainda que as áreas superficiais do segundo método de calcinação foram maiores que do primeiro método. Em uma análise similar observa-se também que a reatividade das cinzas do método 2 de calcinação foram maiores que do método 1. Estes resultados condizem com os dados de Nunes (2009), que afirma que quanto maior a área superficial da cinza de cana-de-açúcar maior será a atividade pozolânica da mesma (NUNES, 2009).

4.3 Ensaio de resistência a compressão simples

Os resultados de resistência à compressão das amostras ativadas com 20% de álcalis e substituição de 0%, 25% e 50% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, são fornecidos nas Tabelas 13 a seguir. Para melhor representar os dados de resistência a compressão foram moldados seis corpos de provas para cada idade de rompimento, bem como, para cada porcentagem de substituição. Os resultados do ensaio de resistência a compressão simples são demonstrados no Gráfico 03.

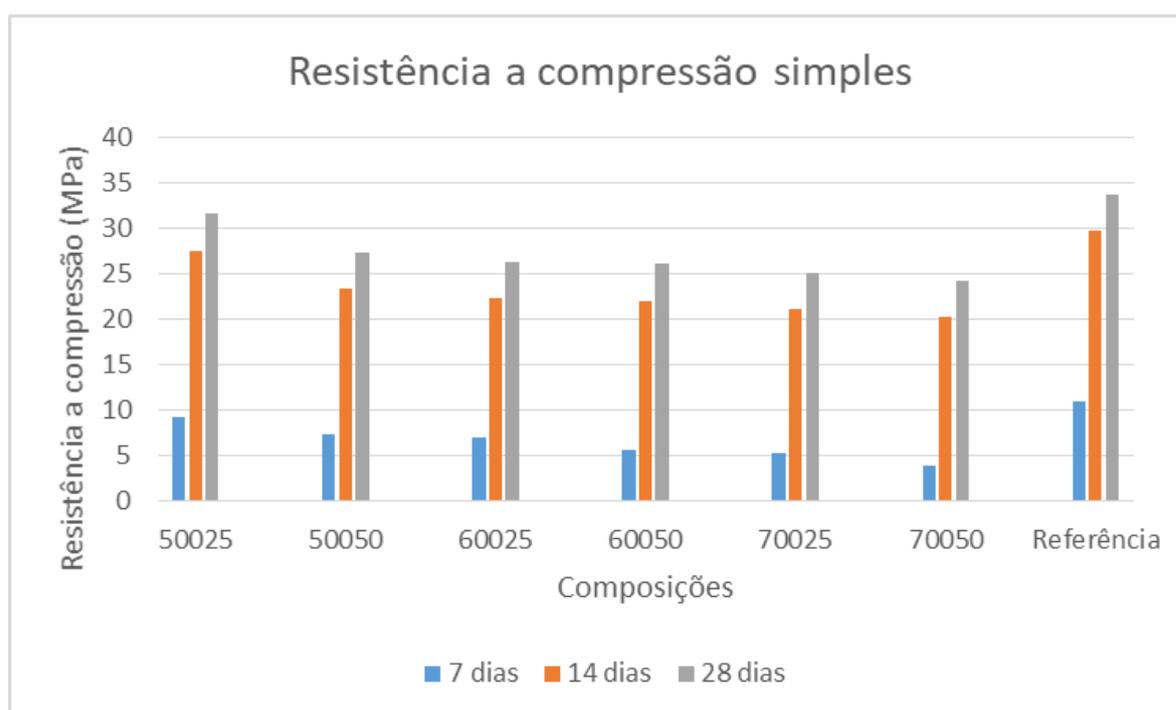
Tabela 13 – Resistência à compressão para a concentração de álcalis de 20% e módulo de sílica 1,0.

Idade de cura (dias)	Concentração (%)	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão
7	Referência	18,35	0,17
	50025	9,34	0,85
	50050	7,38	0,78
	60025	6,79	1,11
	60050	6,17	0,50
	70025	5,18	0,89
	70050	4,14	0,61
14	Referência	28,33	1,65
	50025	27,25	3,30

	50050	23,26	1,09
	60025	22,23	1,00
	60050	22,19	0,33
	70025	21,29	0,78
	70050	20,12	0,54
	Referência	33,26	0,67
28	50025	31,30	3,44
	50050	27,23	1,24
	60025	26,31	1,35
	60050	26,36	2,74
	70025	25,42	3,10
	70050	24,77	1,83

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 03 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial simples



Fonte: Autor (2021).

Analisando o gráfico 03, é possível constatar que aos 28 dias os corpos de prova, denominadas referências, cujo precursor foi somente o metacaulim, obtiveram resistência de 33,65 MPa, já os corpos de prova oriundos da mistura de 75% metacaulim e 25% de cinza calcinada a 500°C, obtiveram resistência de 31,60 MPa, uma queda de 6,09% da resistência a compressão simples. Já quando

aumentada a porcentagem de substituição do metacaulim por cinzas, na proporção de 50% a 50%, a queda no valor de resistência ficou em 18,99%.

Quando aumentada a temperatura de calcinação dos resíduos para 600°C, mantendo as porcentagens de substituição, os corpos de prova do experimento 60025 obtiveram uma queda no valor de resistência de 21,87%. Já para o experimento 60050, a queda do valor de resistência foi ainda mais acentuada, de 22,64%. Nos corpos de prova oriundos da mistura 70025, o valor de resistência a compressão teve uma redução na ordem de 25,79%, sendo que para a mistura 70050, a redução foi de 28,08%.

É possível observar que, na medida em que se aumenta a substituições de metacaulim por cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a resistência à compressão reduz. Esses resultados também são vistos na pesquisa realizada por Tippayasam *et al.* (2010), onde o autor relata a redução da resistência à compressão de pastas geopoliméricas aos 8 dias de cura, com substituições de 20%, 50% e 80% de metacaulim por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. De acordo com o autor, na medida em que se aumenta a concentração de cana na mistura, menor fica a resistência. Castaldelli (2013) também relata em sua pesquisa a queda da resistência à medida que acrescenta a cinza na composição da pasta.

Através do presente estudo foi possível constatar que quando maior a temperatura de calcinação das cinzas, bem como, quanto maior a porcentagem de substituição do metacaulim pelo resíduo, maior será a sua perda no valor de resistência a compressão simples final do produto.

4.3.1 Análise de variância (ANOVA)

Afim de avaliar quais fatores analisados (temperatura de calcinação dos resíduos, porcentagem de substituição, tempo de cura) influenciam mais na resistência a compressão realizou-se uma análise estatística (ANOVA), ilustrada na Tabela 14.

Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão.

Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média quadrática	Valor - F	Valor - p
Concentração de CBC	72,10	1	72,10	32,89	0,000000
Temperatura de calcinação	326,50	2	163,20	74,47	0,000000
Tempo de cura	8387,10	2	4193,50	1912,90	0,065371
Erro	223,60	102	40,31		

Fonte: Autor (2021).

Através da Tabela 14, é possível afirmar com 95% de confiabilidade que todos os fatores analisados têm influência significativa na resistência à compressão das amostras. Por meio do valor de F é possível observar que o tempo de cura na mistura é o fator que mais influencia na resistência à compressão, seguido pela temperatura de calcinação do resíduo e porcentagem de substituição, sendo necessário estudos mais aprofundados para verificação da influência do tempo de cura sob a resistência à compressão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, sob os ensaios escolhidos, bem como, sob as condições adotadas para avaliar a resistência à compressão de geopolímeros produzidos utilizando como precursor o metacaulim e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes temperaturas de calcinação, foi possível concluir que:

- A temperatura de calcinação dos resíduos de cana-de-açúcar que obteve maior reatividade pozolânica das cinzas foi a temperatura de 500°C.
- O processo de “pré-calcinação” dos resíduos sob temperatura de 400°C durante o período de 1 hora, resultou em cinzas mais reativas e com maior área superficial.
- A reatividade pozolânica das cinzas de cana-de-açúcar foram correlatas a maior área superficial. Bem como quanto maior a temperatura de calcinação dos resíduos, menor foi sua reatividade pozolânica e área superficial.
- Os resíduos de cana-de-açúcar quando calcinados em todas as condições apresentaram estrutura cristalina, com presença de picos de quartzo, sendo este referente a contaminação das amostras pelo solo.
- A temperatura de calcinação influencia a morfologia das cinzas, sendo que quanto maior a temperatura de calcinação, maior é o grau de fratura das fibrilas dos resíduos.
- Através da análise de FRX do resíduo é possível inferir que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresenta concentrações satisfatórias dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e FeO_3 , elementos estes essenciais para o processo de geopolimerização.
- A quantidade de cinza do bagaço de cana-de-açúcar influencia diretamente na resistência à compressão dos geopolímeros, bem como a temperatura de calcinação dos mesmos. No entanto, apesar dessa redução de resistência, o material calcinado na temperatura de 500°C, apresentou-se solúvel em condições alcalinas, o que pode ser considerado como um material interessante para a produção de geopolímeros.

- As idades de cura apresentaram influencias significativas para a condição de cura utilizada nesta pesquisa, sendo necessários estudos mais aprofundados neste aspecto.

- A combinação de precursores (metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar) se mostrou uma combinação promissora para a utilização em pastas geopoliméricas. No entanto, quanto maior a porcentagem de substituição e maior a temperatura de calcinação dos resíduos, menor será sua resistência a compressão simples.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Ao finalizar esta pesquisa verificou-se a necessidade de estudos que possam contribuir ainda mais com este trabalho e elucidar alguns questionamento que se fizeram presente e que vão além do que está pesquisa propôs. Sendo assim, podem ser definidas as seguintes sugestões de pesquisas futuras:

- Avaliação do tempo de pega da pasta nas diferentes composições;
- Análise de FTIR dos geopolímeros produzidos;
- Análise da influencia da cana-de-açúcar em geopolimeros ao ataque de ácidos e ao fogo;
- Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras para verificar a interação e composição química dos precursores.

REFERÊNCIAS

ARIF, Elisabeth; CLARK, Malcolm W.; LAKE, Neal. Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 151, p. 692-703, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.136>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004. Resíduos sólidos – Classificação**. Segunda edição. 31.05.2004. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215. Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5752. Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15895. Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado pelo método de chapelle modificado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653. Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ALBUQUERQUE, T.L.; SANTANA, C. G. Desperdício de material no canteiro de obras de médio porte em São Luís - MA na atualidade. **Revista do CEDS**, n. 9, 2018

ÁLVAREZ-AYUSO, E. *et al.* Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 154, n. 1-3, p.175-183, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.008>.

AMU, O. O., OGUNNIYI, S. A., OLADEJI, O. O. Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with sugarcane straw ash. **American journal of scientific and industrial research**, v.5, n.1, 2011.

Anuall Review of Environment and Resources. **Construction Materials And The Environment**. Califónia, 28 jun. 2004. p. 181-204. Disponível em: <<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.energy.29.062403.102215>>. Acesso em: 22 jun. 2019.

APOLONIO, P. H. **Produção de geopolímeros usando cinza de casca de arroz como fonte complementar de sílica**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

BATISTA, J. P. B. **Estudo da cinza de folha de cana-de-açúcar em aglomerantes ativados alcalinamente baseado no resíduo de cerâmica vermelha**. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2018.

BIGNO, I. C. Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais. **Instituto Militar de Engenharia**, Rio de Janeiro, 2008.

BISPO, M. D. et al. Pyrolysis of agroindustrial residues of coffee, sugarcane straw and coconut-fibers in a semi-pilot plant for production of bio-oils: gas chromatographic characterization. **Journal of earth science and engineering**, v.6, p 235-244, 2016.

BLANCO, J. G., MUNÓZ, E., RÍOZ, L. H. Effects of a vinasse-microorganism blend application on a Vertisol with sugarcane. **Agronomia colombiana**, v.30, n.1, p.60-68, 2012.

BRASIL. GOVERNO FEDERAL. (Org.). **Sobre a Rio+20**. Disponível em: <http://www.rio20.gov.br/sobre_a_rio_mais_20.html>. Acesso em: 18 jun. 2019.

BRASIL, GOVERNO FEDERAL. (Org.). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Versão preliminar para consulta. Brasília, 2011. 102 p.

BRASIL. SENADO FEDERAL. **Conferência Rio-92 sobre o meio ambiente do planeta: desenvolvimento sustentável dos países**. Disponível em: <<https://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/rio20/a-rio20/conferencia-rio-92-sobre-o-meio-ambiente-do-planeta-desenvolvimento-sustentavel-dos-paises.aspx>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

CASTALDELLI, V. N. **Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar**. 2013. 89f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/111146>>. Acesso em: 28 jun. 2019.

CHENG, T. W.; CHIU, J.P. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 16, n. 3, p.205-210, mar. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0892-6875\(03\)00008-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0892-6875(03)00008-6).

CIOFFI, R.; MAFFUCCI, L.; SANTORO, L. Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 40, n. 1, p.27-38, dez. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0921-3449\(03\)00023-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0921-3449(03)00023-5).

CORDEIRO, G.; KURTIS, E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 97, n. 1, p.41-49, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto**. 2006. 485 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais

cimentícios. **Química Nova**, [s.l.], v. 32, n. 1, p.82-86, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422009000100016>.

COOK, David J.; PAMA, Ricardo P.; PAUL, Bishwendu K. Rice husk ash-lime-cement mixes for use in masonry units. **Building And Environment**, [s.l.], v. 12, n. 4, p.281-288, jan. 1977. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(77\)90031-2](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(77)90031-2).

DAVIDOVITS, J. Geopolymer: ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites. In: **INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION**, 36th, 1991, [S. l.]. Proceedings... [S. l.: s. n.], 1991.

DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. **Proceedings Of The First International Conference Alkaline Cements And Concretes**, Ucrânia, v. 1, n. 1, p.131-149, jun. 1994.

DUXSON, P. *et al.* Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 42, n. 9, p.2917-2933, 19 dez. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.

DUXSON, P. *et al.* The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 37, n. 12, p.1590-1597, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>.

ECYCLE (Brasil). **Impactos ambientais**. 2016. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/35/1569-processo-de-producao-do-cimento-gera-emissoes-e-pode-diminuir-biodiversidade.html>>. Acesso em: 22 jun. 2019.

ELIMBI, A.; TCHAKOUTE, H. K.; NJOPWOUO, D. Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 6, p.2805-2812, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.055>.

FAO - Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação. **Statistics**. Disponível em: <http://www.fao.org/statistics/en/>. Acesso em: 14 maio de 2019.

FARIA, K. C. P., GURGEL R. F., HOLANDA, J. N. F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of environmental management**, v.101, n.30, p.7-12, 2012.

FENILI, B. M. Análise da inserção de engenheiros civis recém-formados no mercado de trabalho. 2019.

FERNANDES-FILHO, P. **Utilização da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar na produção de materiais cimentícios alcalinamente ativados**. 2012. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13980>>. Acesso em: 28 jun. 2019.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana; PALOMO, Ángel. Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. **Revista Ingeniería de Construcción**, Madrid, v. 24, n. 3, p. 213-232, dez. 2009. SciELO Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID). <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-50732009000300001>.

FIGUEIREDO, E. B., SCALA JUNIOR, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.141, n.1/2, p.77-85, 2011.

FRÍAS, Moisés; VILLAR, Ernesto; SAVASTANO, Holmer. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 33, n. 4, p.490-496, abr. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>.

GEOPOLYMER INSTITUTE (França). **Geopolymer cement and Geopolymer Concrete**. 2014. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/applications/geopolymer-cement/>. Acesso em: 25 jun. 2019.

GLOBAL CHANGE INSTITUTE (Austrália). **FuturArc**. 2014. Disponível em: <http://blightanner.com.au/credit/global-change-institute-futurarc/>. Acesso em: 27 jun. 2019.

GORGES, G. C; WEDEKID, J. P; SOUSA, T.B. Substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço de cana-de-açúcar em argamassa. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**. Palmas, Tocantis. 2019.

GUEDES, C. L. B., ADÃO, D. C., QUESSADA, T. P., BORSATO, D., GALÃO, O. F. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. **Química Nova**, v.33, n.4, p.781-786, 2010.

HE, J. *et al.* Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 37, p.108-118, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.010>.

HILARES, R. T., RESÉNDIZ, A. L., MARTÍNEZ, R. T. Successive pretreatment and enzymatic saccharification of sugarcane bagasse in a packed bed flowthrough column reactor aiming to support biorefineries. **Bioresource technology**, v.203, p.42-49, 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. A geografia da cana-de-açúcar. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-doterritorio/analises-do-territorio/18939-a-geografia-dacananadeacucar.html?=&t=oque-e>. Acesso em: 13 de maio de 2019.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 42, n. 3, p.729-746, fev. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>.

KRIVENKO, P. Y. Development of alkaline cements supported by theory and practice. In: **INTERNATIONAL WORKSHOP ON GEOPOLYMER CEMENTS AND CONCRETES**, 2005, Perth. Proceedings... [S. l.: s. n.], 2005.

KUPAEI, R. H. *et al.* Mix design for fly ash based oil palm shell geopolymer lightweight concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 43, p.490-496, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.071>.

KAZE, C. R. *et al.* Effect of silicate modulus on the setting, mechanical strength and microstructure of iron-rich aluminosilicate (laterite) based-geopolymer cured at room temperature. **Ceramics International**, [s. l.], v. 44, n. 17, p. 21442–21450, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884218322776>.

LIVI, C. Desenvolvimento de pasta de geopolímericas a base de cinza volante e hidróxido de sódio. Dissertação (mestrado) – **Universidade Federal de Santa Catarina**. Florianópolis, 2013.

LIVI, C. N.; REPETTE, W. L. Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 7–18, 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212015000300007&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 06 fev. 2020.

LAMAS, Wendell de Queiroz; PALAU, Jose Carlos Fortes; CAMARGO, Jose Rubens de. Waste materials co-processing in cement industry: ecological efficiency of waste reuse. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 19, p. 200-207, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.015>.

LIEW, Y. *et al.* Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. **Progress In Materials Science**, [s.l.], v. 83, p.595-629, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>.

LONGHI, Márlon Augusto. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

LONGHI, Márlon Augusto. **Eflorescência em geopolímeros à base de metacaulim : formação, efeitos e mitigação**. 2019. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

LUZ, S. M., PIRES, A. C., FERRÃO, P. M. C. Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive componentes. **Resource, conservation and recycling**, v.54, n.12, p 1135-1144, 2010.

MADLOOL, N.A.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M.s.; RAHIM, N.A. A critical review on energy use and savings in the cement industries. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 2042-2060, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. 2007. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MEYER, K., SINANI, E. Quando e onde o investimento estrangeiro direto gera repercussões positivas? Uma meta-análise. **J Int Bus Stud** 40, 1075–1094 (2009). <https://doi.org/10.1057/jibs.2008.111>

MO, B. *et al.* Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 99, p.144-148, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.024>.

NOBRE, T.R.S. Estudo do efeito de altos teores de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) em pastas cimentícias: análise por DRX. **VIII Encontro científico de Física Aplicada**, 2017.

NOVAIS, R. M.; ASCENSÃO, G.; BURUBERRI, L. H.; SENFF, L.; LABRINCHA, J. A. Influence of blowing agent on the fresh- and hardened-state properties of lightweight geopolymers. **Materials & Design**, Surrey, v. 108, p. 551-559, out. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.039>>. Acesso em: 08 abr. 2019.

NUNES, I. H. S.; VANDERLEI, R.D; SECCHI, M.; & ABE, M.A.P. Estudo das características físicas e químicas da cinza de bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. **Revista Tecnológica**. V.17, n.1, p.39-48, 2010.

OLIVEIRA J., VALDEMIR R., Utilização de materiais reciclados em estruturas de concreto executadas com painéis autoportantes. São Luís - **Editora Pascal**, 2020.

OLIVEIRA, R.L. Gerenciamento dos resíduos da construção civil – soluções inteligentes. Mestrado em engenharia civil. Universidade Federal de Santa Maria – RS, 2018.

PEREIRA, Adriana Maria. Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes. 2014. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, **Universidade Estadual Paulista**, Ilha Solteira, 2014.

PRAKASH, G., VARMA, A. J., PRABHUNE, A. Microbial production of xylitol from d-xylose and sugarcane bagasse hemicellulose using newly isolated thermotolerant yeast *Debaryomyces hansenii*. **Bioresource Technology**, v.102, n.3, p 3304-3308, 2011.

PROVIS, John L.; BERNAL, Susan A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. **Annual Review Of Materials Research**, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 299-327, jul. 2014. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>.

PROVIS, J. L.; YONG, S.; DUXSON, P. Nanostructure/microstructure of metakaolin geopolymers. In: Provis, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Eds.). **Geopolymers:**

Structure, processing, properties and industrial applications. Oxford – Cambridge – New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2009. P. 72-88.

PUNGA, A. P., ABREU, C. A. Cadmium, lead, and zinc mobility and plant uptake in a mine soil amended with sugarcane straw biochar. **Environmental Science and pollution research**, v.22, n.22, p 27606-17614, 2015.

RAVERDY, M. et al. Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components. **Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components.** França.1980.

RIFAAI, Y. et al. Rheology of fly ash-based geopolymer: Effect of NaOH concentration. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 223, p. 583–594, 2019.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. Construção Civil e a Degradação Ambiental. **Desenvolvimento em Questão**, Ijuí, v. 7, n. 13, p.111-128, jun. 2009. Disponível em: <<http://www.spell.org.br/documentos/ver/2880/construcao-civil-e-a-degradacao-ambiental>>. Acesso em: 22 jun. 2019.

SANTOS, G. Z. B.; MELO FILHO, J. A.; MANZATO, L. Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado. **Cerâmica**, [s.l.], v. 64, n. 370, p.276-283, jun. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643702353>.

SATHIYA, K. Experimental study on bagasse ash in concrete. **International jornal for servisse learning in engineering**, v.5, n.2, 2010.

SANGSTER, A. G. et al., 2001. Silicion deposition in higher plants. In: **Silicon in agriculture**, Amsterdam.

SCHNEIDER, C. F.; SCHULZ, D. G; LIMA, P. R.; GONÇALVES JÚNIOR, A. C. Formas de gestão e aplicação de resíduos da cana-de-açúcar visando redução de impactos ambientais. **Revista Eletrônica Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.7, n.5, p.08-17. Edição especial, Mossoró – RN,2012.

SILVA, F. B. F. **Estudo da influência dos métodos de composição na preparação de nanopartículas de óxidos magnéticos de ferro por rota solvotérmica.** 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

SILVA, M. B; MORAIS, A. S. AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO BAGAÇO DE CANA EM DIFERENTES NÍVEIS DE UMIDADE E GRAUS DE COMPACTAÇÃO. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2008, Rio de Janeiro. **Anais.** Rio de Janeiro: Enegep, 2008. p. 1 - 9.

SILVEIRA, Daniel Antônio. **Influência da substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual no concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia – Goiás. 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO – SNIC (Brasil). **Produção nacional de cimento por regiões e estado**. 2021. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1537281236.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2021.

SOARES, Ana Brígida et al. Estudo da oxidação total do etanol usando óxidos tipo perovskita LaBO₃ (B= Mn, Ni, Fe). **Química Nova**, [s.l.], v. 30, n. 5, p.1061-1066, out. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422007000500002>.

SOUZA, A. E., TEIXEIRA S. R., SANTOS, G. T. A., COSTA, F. B., LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of environmental management**, v.92, n.10, p.2774-2780, 2011.

SUN, Z. *et al.* Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 49, p.281-287, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.063>.

TORGAL-PACHECO, F. 15, 2010, Guimarães. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. Guimarães: Tecminho, 2010. 8 p.

TCHADJIÉ, L. N. *et al.* Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. **Ceramics International**, [s.l.], v. 42, n. 2, p.3046-3055, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.091>.

TEMUJIN, J.; VAN RIESSEN, A. Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 164, n. 2-3, p.634-639, 30 maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.065>.

TEODORO, P. E., FERREIRA, M. H. Q., CHARBEL, D. D. S., NEIVOCK, M. P., & FORMAGINI, S. (2013). Comportamento físico-mecânico do concreto com substituição de cimento portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. **REEC - Revista Eletrônica De Engenharia Civil**. <https://doi.org/10.5216/reec.v6i2.22022>

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 90, p.397-408, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.074>.

VAF AEI, M.; ALLAHVERDI, A. Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 114, p.290-296, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.204>.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P. Technical and comercial progress in the adoption of geopolymer cement. **Minerals Engineering**, v. 29, p. 89-104. 2012

WAN, Q. *et al.* Geopolymerization reaction, microstructure and simulation of metakaolin-based geopolymers at extended Si/Al ratios. **Cement And Concrete**

Composites, [s.l.], v. 79, p.45-52, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.014>.

WANG, M. R. *et al.* Influence of calcination temperature of kaolin on the structure and properties of final geopolymer. **Materials Letters**, [s.l.], v. 64, n. 22, p.2551-2554, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2010.08.007>.

ZARDO, A. M. Utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. **I ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONSTRUÇÃO SISTENTÁVEL**. Anais. São Paulo, 2004.

ZODINIO. L. M. Analysis of the Mechanical Behavior of Concretes Made by Combining ASH of the Bagasse of the Sugar-Cane of Varieties SP911049, RB92579 AND SP816949. 2013. 150 f. Dissertação (Mestrado em MECÂNICA DAS ESTRUTURAS, ESTRUTURAS DE CONCRETO E ALVENARIA E MATERIAIS E PROCESSOS CONSTRUTIVOS) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO PARA O 62º IBRACON



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



© 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Análise da viabilidade do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na adição ao cimento Portland

Feasibility analysis of the use of sugarcane bagasse ash in addition to Portland cement

Mateus Arlindo da Cruz (1), Rafaela Casanova (1), Daiane Boscardin (1), William Piva de Almeida (2), Aline Zanchet (3)

(1) *Mestrando em Engenharia Civil, Instituto Meridional de Educação – IMED, Passo Fundo - RS*

(2) *Graduando em Engenharia Civil, Instituto Meridional de Educação – IMED, Passo Fundo - RS*

(3) *Professora Doutora do Instituto Meridional de Educação – IMED, Passo Fundo - RS*

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade do uso de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), na adição ao cimento Portland. O bagaço da cana-de-açúcar utilizado na presente pesquisa foi oriundo da empresa Coopercana, localizada na cidade de Porto Xavier – RS. O processo metodológico da pesquisa se dividiu em duas fases, sendo a primeira responsável pela calcinação do bagaço da cana-de-açúcar, sob uma temperatura de 500°C, por um período de 1 hora e após este período, as CBC's foram resfriadas sob taxa de 10°C/min. Na segunda etapa da pesquisa foi realizada a caracterização das CBC's por meio da Fluorescência de Raio-X (FRX), Análise Termogravimétrica (TGA), reatividade pozolânica pelo método de chapelle modificado, massa específica e área superficial por meio da isoterma de Freundrich. Através da segunda etapa da pesquisa, constatou-se que as CBC's calcinadas a uma temperatura de 500°C, apresentam uma baixa porcentagem de matéria orgânica (inferior à 3% da massa), conforme resultados do TGA, ainda os dados obtidos por meio do FRX demonstram que as CBC possuem uma alta quantidade de sílica, ferro e alumina (superior à 78%). A reatividade pozolânica apresentou o valor de 321,86 mg/g, sendo este considerado um valor ligeiramente baixo, já o valor da massa específica foi de 2,61 g/cm³ e a área superficial foi de 18,31m²/g demonstrando uma alta porosidade e rugosidade da superfície das CBC's. Por fim, conclui-se que através dos ensaios realizados as CBC's calcinadas sob a temperatura de 500°C tem grande potencial para incorporação ao cimento Portland.

Palavra-Chave: Cinzas, Cana-de-açúcar, Adição.

Abstract

The present work aims to evaluate the viability of using sugarcane bagasse ash (CBC), in addition to Portland cement. The sugarcane bagasse used in this study came from the company Coopercana, located in the city of Porto Xavier - RS. The methodological process of the research was divided into two phases, the first being responsible for the calcination of the sugarcane bagasse, under the temperature of 500 ° C for a period of 1 hour and after that period, the BCCs were cooled under rate of 10 ° C per minute. In the second stage of the research, the verification and characterization of the BCCs was made by means of X-Ray Fluorescence (FRX), Thermogravimetric Analysis (TGA), pozzolanic reactivity by the modified chapelle method, specific mass and surface area using the Freundrich isotherm . Through the second stage of the research, it was found that the BCC's calcined at a temperature of 500 ° C, present a low percentage of organic matter (below 3% of the mass), according to TGA results, even the data obtained through the FRX demonstrate that BCCs have a high amount of silica, iron and alumina (over 78%). The pozzolanic reactivity showed a value of 321.86 mg / g, which is considered a slightly low value, since the specific mass value was 2.61 g / cm³ and the surface area was 18.31m² / g demonstrating a high porosity and roughness of the CBC's surface. Finally, it is concluded that through the tests carried out, the CBC's calcined under the temperature of 500 ° C have great potential for incorporation into Portland cement.

Keywords: Ash, Sugarcane, Addition.

APÊNDICE B – ARTIGO ACEITO PARA A REVISTA MÁTERIA

Análise da viabilidade do uso de resíduos de cana-de-açúcar para produção de aglomerantes sustentáveis

Analysis of the influence of calcination temperature of sugarcane residues for the production of binders

Mateus Arlindo da Cruz ¹, Rafaela Fontana Casanova ², Daiane Boscardin³,
Aline Zanchet⁴

¹Engenheiro civil, Mestrando no curso de engenharia civil pela Faculdade Meridional – IMED, Passo Fundo (RS), Brasil.

²Engenheira civil, Mestranda no curso de engenharia civil pela Faculdade Meridional – IMED, Passo Fundo (RS), Brasil.

³Engenheira civil Mestranda no curso de engenharia civil pela Faculdade – IMED, R. Gen. Prestes Guimarães, 304 - Vila Rodrigues, Passo Fundo - RS, 99070-220

⁴Dra em Nanociências e materiais avançados, Professora da escola politécnica de Engenharia civil – IMED, R. Gen. Prestes Guimarães, 304 - Vila Rodrigues, Passo Fundo - RS, 99070-220

e-mail: mateusArlindo@hotmail.com; rafaelafcasanova@hotmail.com; daiane_boscardin@outlook.com; aline.zanchet@gmail.com

RESUMO

A cinza de bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto oriundo do processo de cogeração de energia elétrica. Este resíduo é composto principalmente por sílica, desta forma, podendo ser reutilizado como agregado e/ou como aglomerante em matrizes cimentícias. O presente trabalho tem como objetivo principal analisar as propriedades físico-químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, quando calcinada em diferentes temperaturas, visando a sua aplicação como aglomerante em uma matriz sustentável. O resíduo (bagaço de cana-de-açúcar) utilizado na presente pesquisa, foi coletado no município de Porto Xavier, localizado no estado do Rio Grande do Sul. Para a análise, o resíduo foi separado em quatro amostras e então calcinado em uma mufla com temperatura controlada, sendo respectivamente: 500°C, 600°C, 700°C e 800°C, por um período de uma hora. O processo de calcinação do resíduo tem como finalidade a remoção da matéria orgânica presente. Para a análise das propriedades físico-químicas das amostras, utilizou-se as técnicas de Difração de Raio-X (DRX), Análise Termogravimétrica (TGA), reatividade pozolânica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados indicam um maior grau de amorfismo na amostra calcinada a 500 °C e maior grau de cristalinidade em 800°C. Se mostrando um material com ótimas características para o uso na produção de aglomerantes sustentáveis.

Palavras-chave: Bagaço da cana-de-açúcar; Temperatura de calcinação; Reatividade Pozolânica; Estrutura físico-química.

ABSTRACT

Sugarcane bagasse ash is a by-product from the electricity cogeneration process. This residue is mainly composed of silica, so it can be reused as an aggregate and / or as a binder in cementitious matrices. The present work has as main objective to analyze the physicochemical properties of the sugarcane bagasse ash, when calcined at different temperatures, aiming at its application as a binder in a sustainable matrix. The residue (sugarcane bagasse) used in the present study was collected in the municipality of Porto Xavier, located in the state of Rio Grande do Sul. For the analysis, the residue was separated into four samples and then calcined in a muffle with controlled temperature, respectively: 500°C, 600°C, 700°C and 800°C, for a period of one hour. The residue calcination process aims to remove the organic matter present. For the analysis of the physical-chemical properties of the samples, the techniques of X-Ray Diffraction (XRD), Thermogravimetric Analysis (TGA), pozzolanic reactivity and Scanning Electron Microscopy (SEM) were used. The results indicate a higher degree of amorphism in the sample calcined at 500°C and a greater degree of crystallinity at 800°C. Showing a material with great characteristics for use in the production of sustainable binders.

Keywords: Sugarcane bagasse; Calcination temperature; Pozzolanic Reactivity; Physicochemical structure.

APÊNDICE C – ARTIGO PUBLICADO NO CINPAR 2021



XVII Congresso Internacional sobre Patologia e
Reabilitação das Construções

XVII Congreso Internacional sobre Patología y
Rehabilitación de las Construcciones

XVII International Conference on Pathology and
Constructions Rehabilitation

FORTALEZA (Brasil), 3 a 5 de junho de 2021

Análise da incorporação de resíduos de cana-de-açúcar em matrizes cimentícias por espectrometria de fluorescência de raios-X e difração de raios-X: uma breve revisão

Analysis of the incorporation of sugarcane residues in cementitious matrices by X-ray fluorescence and X-ray diffraction spectrometry: a brief review

Rafaela Fontana CASANOVA¹, Mateus Arlindo da CRUZ², Aline ZANCHET³

¹ Escola Politécnica de Engenharia Civil, IMED, Passo Fundo, RS, Brasil, rafaelafcasanova@hotmail.com ²Escola Politécnica de Engenharia Civil, IMED, Passo Fundo, RS, Brasil, mateusArlindo@hotmail.com ³Escola Politécnica de Engenharia Civil, IMED, Passo Fundo, RS, Brasil, aline.zanchet@gmail.com

Resumo: Devido a demanda excessiva dos materiais de construção serem cada vez maior em função do crescimento populacional constante e das questões relacionadas as técnicas construtivas, os produtos e até mesmo as matéria-prima visando a sustentabilidade estão cada vez mais presentes no nosso cotidiano. A busca por tecnologias ambientalmente adequadas, utilizando matéria-prima de fonte renovável e muitas vezes local, veem se difundindo com o passar do tempo. Uma das matérias-primas que vem sendo estudada pelos pesquisadores para o emprego em produtos utilizados na construção civil, é a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC). A CBC é um subproduto oriundo do processo de cogeração de energia elétrica. Este resíduo é composto principalmente por sílica, desta forma, podendo ser reutilizado como agregado e/ou aglomerante em matrizes cimentícias. A presente pesquisa teve como objetivo, verificar por meio da análise bibliográfica, o potencial de aplicação dos resíduos agrícolas (cinza do bagaço de cana-de-açúcar) como matéria prima alternativa de substituição ao aglomerante (cimento Portland), tendo em vista a sua caracterização química. Por meio dos trabalhos analisados foi possível verificar que a utilização do resíduo como matéria prima alternativa em substituição ao cimento se faz uma escolha viável. No entanto observou-se que em todos os trabalhos analisados, quando substituído o cimento por uma parcela superior a 20% de CBC no concreto, a resistência da mesma era inferior a encontrada no corpo de prova referência. Pode se inferir que essa queda na resistência do concreto seja devido ao consumo de Portlandita pela fase amorfa da CBC no concreto.

Palavras-chave: Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Cimento Portland. Concreto.