

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**

**SUELEN MARQUES MALACARNE**

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DA  
QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA  
INCORPORAÇÃO EM COMPOSTOS CIMENTÍCIOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AMBIENTAL**

**DOURADOS/MS  
FEVEREIRO/2021**

**SUELEN MARQUES MALACARNE**

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DA  
QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA  
INCORPORAÇÃO EM COMPOSTOS CIMENTÍCIOS**

**ORIENTADOR: PROF. DR. WILLIAM RENZO CORTEZ VEGA**

**COORIENTADORA: PROF. DR. PATRÍCIA HATSUE SUEGAMA**

**Dissertação de mestrado submetida ao programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, como um dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental na área de concentração Tecnologia Ambiental.**

**DOURADOS/MS**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Malacarne, Suelen Marques

Processamento e caracterização do resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar para incorporação em compostos cimentícios. / Suelen Marques Malacarne; orientação de William Renzo Cortez Vega. – Dourados, 2021.

xxx p. : il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade Federal da Grande Dourados /Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, 2021.

1. Concreto. 2. Concreto ecológico. 3. Cinza. 4. Bagaço da Cana. 5. Cana-de-açúcar.

I. Malacarne. S. M.

II. Processamento e caracterização do resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar para incorporação em compostos cimentícios.

CDD ou CDU

## **Termo de Aprovação**

Após a apresentação, arguição e apreciação pela banca examinadora, foi emitido o parecer APROVADO, para a dissertação intitulada: PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA INCORPORAÇÃO EM COMPOSTOS CIMENTÍCIOS, de autoria de SUELEN MARQUES MALACARNE, apresentada ao Programa de Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Grande Dourados.

---

Prof. Dr. WILLIAM RENZO CORTEZ VEGA (Orientador-UFGD)  
Presidente da Banca Examinadora

---

Prof. Dr. HEBERTH JULIANO VIEIRA  
Membro Examinador (UFGD)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. BRUNO ARANTES MOREIRA  
Membro Examinador (UFGD)

Dourados/MS, fevereiro de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais por me darem as condições necessárias e o apoio para ingressar e continuar meus estudos. A todos que colaboraram e fizeram parte desta pós-graduação, em especial ao meu orientador William Renzo Cortez Vega e minha coorientadora Patrícia Hatsue Suegama pela paciência, correções e incentivo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Traço utilizado conforme teor de substituição da cinza pelo cimento. ....	47
Tabela 2 – Resultados obtidos no slump test conforme teor de cinza no concreto. ....	57
Tabela 3 – Fases cristalinas encontradas na amostra de Cinza do bagaço da cana por análise de difração de raios X. ....	65
Tabela 4 – Resultados obtidos no slump test conforme teor de cinza no concreto. ....	66

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição limite para cimentos Portland. ....	20
Quadro 2 – Classificação granulométrica dos agregados. ....	22
Quadro 3 – Resistência mecânica a compressão conforme teor de cinza para as idades de 7, 28 e 91 dias. ....	67
Quadro 4 – Resultados de absorção, índice de vazios e massa específica seca no concreto conforme teor de substituição do cimento pela cinza nos concretos. ....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Agitador de peneiras. ....	35
Figura 2 – Pátio de cinzas Usina localizada em Av. Hum, s/n - Distrito Industrial, Dourados – MS.....	36
Figura 3 - Funcionário da Usina Bunge ajudando na coleta da cinza em tambor plástico. ....	36
Figura 4 – Cinza bruta do bagaço da cana-de-açúcar. ....	37
Figura 5 – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar na estufa. ....	37
Figura 6 – Peneira com abertura de 2 mm. ....	38
Figura 7 – Moinho cerâmico de bolas utilizado na pesquisa. ....	39
Figura 8 – Cinza da cana-de-açúcar após secagem em estufa por 24 horas sob temperatura de 100 ± 5 °C. ....	39
Figura 9 – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar após processo de secagem e peneiramento em peneira com abertura 2 mm. ....	40
Figura 10 – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar após secagem, peneiramento e moagem em moinho de bolas cerâmicas por 60 minutos. ....	40
Figura 11 – Cinza do bagaço da cana de açúcar sendo ensaiada conforme NBR NM 46/2003. ....	41
Figura 12 – Cinza do bagaço da cana de açúcar sendo ensaiada conforme NBR NM 248/2003. ....	42
Figura 13 – Mufla utilizada no ensaio de 600 °C. ....	43
Figura 14 – Mufla utilizada no ensaio de 1000 °C. ....	43
Figura 15 – Amostras analisadas via MEV, EDS e DRX da cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. ....	44
Figura 16 – Microscopio eletrônico de varredura (MEV) sendo utilizado para análise das cinzas. ....	46
Figura 17 – Materiais separados para confecção do concreto. ....	47
Figura 18 – Materiais sendo misturados na betoneira. ....	48
Figura 19 – Equipamentos para realização do slum test e formas cilíndricas para moldagem dos corpos de prova. ....	48
Figura 20 – Corpos de prova após moldagem. ....	49
Figura 21 – Corpos de prova desenformados após 24 horas. ....	49
Figura 22 – Corpos de prova curando em solução saturada com cal. ....	50
Figura 23 – Ensaio de slum test sendo realizado. ....	51

Figura 24 – Corpo de prova sendo retificado. ....	52
Figura 25 – Corpo de prova sendo ensaiado a compressão em prensa hidráulica.....	52
Figura 26 – Corpo de prova imerso em água por 72 horas.....	53
Figura 27 – Corpo de prova em ensaio de fervura por 5 horas.....	54
Figura 28 – Gráfico da curva granulométrica da areia. ....	55
Figura 29 – Gráfico da curva granulométrica da brita.....	56
Figura 30 – Gráfico das curvas granulométricas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	57
Figura 31 – Gráfico da curva granulométrica da cinza do bagaço da cana e do cimento CPV-ARI. .....	58
Figura 32 – Cinza não moída zoom de 500X obtida no ensaio de MEV. ....	59
Figura 33 – Ensaio de EDS realizado no ponto 2 da figura 32.....	60
Figura 34 – Cinza moída 60min zoom 500X obtida no ensaio de MEV.....	60
Figura 35 – Ensaio de EDS realizado no ponto 3 da figura 34.....	61
Figura 36 – Cinza moída 60 min e requeimada a 600 °C zoom 500X obtida no ensaio de MEV. .....	61
Figura 37 – Ensaio de EDS realizado no ponto 2 da figura 36.....	62
Figura 38 – Cinza moída 60 min e requeimada a 1000 °C zoom 500X obtida no ensaio de MEV. .....	62
Figura 39 – Ensaio de EDS realizado no ponto 1 da figura 38.....	63
Figura 40 – Difratoograma de raios X da amostra de cinza não moída destacando a fase SiO <sub>2</sub> (85-796). ....	63
Figura 41 – Difratoograma de raios X da amostra de cinza moída 60 minutos destacando a fase SiO <sub>2</sub> (85-796). ....	64
Figura 42 – Difratoograma de raios X da amostra de cinza moída e requeimada a 600°C mostrando uma mistura de fases destacando SiO <sub>2</sub> (85-796), CaO (48-1467) e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (86-230). ....	64
Figura 43 – Difratoograma de raios X da amostra de cinza moída e requeimada a 1000°C mostrando uma mistura de fases destacando SiO <sub>2</sub> (85-796), CaO (48-1467) e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (86-230). ....	65
Figura 44 – Resistência a compressão aos 7 dias conforme teor de cinza.....	68
Figura 45 – Resistência a compressão aos 28 dias conforme teor de cinza.....	68
Figura 46 – Resistência a compressão aos 91 dias conforme teor de cinza.....	68
Figura 47 – Absorção conforme teor de cinza. ....	71
Figura 48 – Índice de vazios do concreto conforme teor de cinza. ....	71

Figura 49 – Massa específica seca do concreto conforme teor de cinza. .... 71

## RESUMO

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar é um subproduto gerado nas indústrias de álcool e açúcar quando o bagaço é incinerado para a produção de energia. Normalmente esse resíduo não é aproveitado, sendo descartado no ambiente. Entretanto essas cinzas possuem altos teores de Sílica em sua composição podendo reagir quimicamente com os produtos que se formam durante a hidratação do cimento, ou atuar como material de enchimento, incrementando o desempenho de materiais cimentícios. O cimento Portland é um dos materiais mais produzido no mundo, porém está intrínseco em seu processo produtivo a emissão de dióxido de carbono. O presente trabalho teve como objetivo a caracterização micro estrutural da cinza do bagaço da cana-de-açúcar gerada em uma Usina na região de Dourados - MS e sua avaliação em termos de resistência mecânica e durabilidade na produção de concretos com a substituição parcial do cimento Portland pela cinza. A cinza passou por três etapas de tratamento: secagem, peneiramento e moagem. Nela, foram avaliados o teor de umidade, perda ao fogo, composição granulométrica, massa específica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e difração de raio X (DRX). Foram moldados corpos de prova cilíndricos de concreto de 10x20 cm utilizando um traço de referência de 1:2,1:2,92 (cimento:areia:brita) com relação água/cimento igual a 0,6 sem uso de aditivo, e outros traços com a substituição parcial do cimento pela cinza nas porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20%, em peso. Executou-se ensaios de consistência, resistência mecânica a compressão e absorção de água. Os resultados mostraram que quanto maior o teor de cinza no concreto, menor sua consistência. Porém, concretos com até 10% de substituição parcial apresentaram maior resistência mecânica comparados ao concreto convencional e com substituições em até 15% houve a redução da taxa de absorção de água. Concluiu-se que os concretos com até 10% de substituição parcial apresentam melhor desempenho. Além disso, a criação de um cimento feito com o uso desse resíduo agrega valores de reciclagem e diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido, trazendo benefícios ambientais e econômicos.

*Palavra-Chave: Concreto. Concreto ecológico. Cinza. Bagaço da Cana. Cana-de-açúcar.*

## ABSTRACTS

Sugarcane bagasse ash is a by-product generated in the alcohol and sugar industries when the bagasse is incinerated for energy production. Normally this residue is not used and is discarded in the environment. However these ashes have high levels of silica in their composition and can react chemically with the products formed during cement hydration, or act as filler, increasing the performance of cementitious materials. Portland cement is one of the most produced materials in the world, but is intrinsic in its production process the emission of carbon dioxide. The present work had as objective the micro structural characterization of the sugar cane bagasse ash generated in a Plant in the region of Dourados - MS and its evaluation in terms of mechanical resistance and durability in the production of concretes with the partial replacement of the Portland cement by the ash. The ash went through three stages of treatment: drying, sieving and grinding. In it, the moisture content, loss on ignition, granulometric composition, specific mass, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) were evaluated. Cylindrical concrete specimens of 10x20 cm were molded using a reference mix of 1:2.1:2.92 (cement:sand:gravel) with water/cement ratio equal to 0.6 without the use of additives, and other mixes with the partial replacement of cement by ash in percentages of 5%, 10%, 15% and 20% by weight. Consistency, compressive strength and water absorption tests were performed. The results showed that the higher the ash content in the concrete, the lower its consistency. However, concretes with up to 10% of partial replacement presented higher mechanical resistance compared to conventional concrete and with replacements up to 15% there was a reduction in the rate of water absorption. It was concluded that the concretes with up to 10% of partial replacement present better performance. Moreover, the creation of a cement made with the use of this waste adds recycling values and decreases CO<sub>2</sub> emissions per ton of cement produced, bringing environmental and economic benefits.

*Keyword: Concrete. Ecological concrete. Grey. Sugarcane Bagasse. Sugar cane.*

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	15
2 - JUSTIFICATIVA .....	17
3 - OBJETIVOS.....	18
3.1 - Objetivo Geral.....	18
3.2 - Objetivo Específico.....	18
4 - REVISÃO DE LITERATURA .....	19
4.1 - Materiais constituintes do concreto .....	19
4.1.1 - Aglomerante .....	19
4.1.2 - Agregados .....	21
4.1.3 - Água .....	22
4.1.4 - Adições minerais.....	22
4.2 - Propriedades do concreto.....	24
4.3 - Indústria cimenteira e as emissões de CO <sub>2</sub> .....	26
4.4 - Produção agrícola e a geração de resíduos .....	28
4.5 - Concretos sustentáveis.....	30
5 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
5.1 - Cimento.....	34
5.2 - Areia.....	34
5.3 - Brita .....	35
5.4 - Água.....	35
5.5 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	35
5.6 - Produção dos concretos e moldagem dos corpos de prova.....	46
5.7 - Ensaio nos concretos .....	50
5.7.1 – Ensaio de consistência .....	50
5.7.2 – Ensaio de resistência a compressão .....	51
5.7.3 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	52
6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
6.1 - Materiais constituintes do concreto .....	55
6.1.1 - Areia .....	55
6.1.2 - Brita.....	55
6.1.3 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	56
6.2 - Concretos .....	65

6.2.1 – Consistência do concreto .....	65
6.2.2 - Resistência a compressão .....	66
6.2.3 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	69
7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	73
8 - BIBLIOGRAFIA .....	75

## 1 - INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais consumido do mundo, sendo precedido apenas pela água IBRACON (2009). Ele é um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários, que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (NBR 12655/2015). Quando recém misturado, deve apresentar propriedades de plasticidade tais que facilitem seu transporte, lançamento e adensamento e, quando endurecido, propriedades que atendam ao especificado em projeto quanto às resistências à compressão e à tração, módulo de deformação e outras (WALID, 2013).

Como insumo fundamental para o concreto, o cimento Portland, é o material mais produzido no mundo superando a produção de metais e de polímeros (ASHBY, 2015). De acordo com a Associação Europeia do Cimento (CEMBUREAU, 2017), em 2016, a produção mundial de cimento foi de aproximadamente 4,65 bilhões de toneladas. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019a) o consumo Brasileiro no ano de 2019 totalizou 54,5 milhões de toneladas vendidas, um aumento de 3,5% sobre o ano anterior.

Infelizmente, está intrínseco no processo produtivo do cimento a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), tanto na transformação química da matéria-prima em cimento, quanto na queima de combustíveis utilizados para possibilitar essa transformação, contribuindo assim de forma significativa para as mudanças climáticas. De acordo com o SNIC (2019b) a indústria cimenteira responde, globalmente, por cerca de 7% de todo o gás carbônico emitido pelo homem.

O alto consumo de concreto e as emissões de CO<sub>2</sub> geradas para produção do cimento, mostram a necessidade da busca de alternativas que visem a sustentabilidade nesse setor. Uma opção passa pela pesquisa constante de materiais alternativos, principalmente resíduos, capazes de substituir ao menos parcialmente o cimento Portland.

O setor agrícola é um dos que mais produz resíduos sólidos no Brasil. De acordo com o Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA, 2012), nas agroindústrias associadas as culturas mais cultivadas no país, a geração é estimada em torno de 291 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano. Somente as culturas associadas a cana-de-açúcar tem geração em torno de 200 milhões de toneladas que, apesar de possuírem

características relevantes como matéria-prima para diversos setores industriais, muitas vezes não são aproveitados, sendo descartados no meio ambiente.

A possibilidade de substituição parcial do cimento pelos resíduos agroindustriais acarretaria na redução do impacto ambiental da disposição desses materiais na natureza, além da diminuição do consumo de cimento por metro cúbico com consequente redução das emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento. As exigências atuais de alternativas sustentáveis em diversos setores da construção civil tornam ainda mais relevante essa problemática.

Assim, diversos pesquisadores têm estudado materiais capazes de substituir o cimento. As literaturas costumam avaliar a resistência e a durabilidade do concreto correlacionando-a com os aspectos sustentáveis, por exemplo, fazendo a substituição parcial do cimento pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar (BERENGUER et al., 2018); pelos resíduos da palha de soja (GALVÃO et al., 2018); pela cinza de caroço de açaí (CORDEIRO et al, 2019); pelo resíduo da cinza da madeira de eucalipto (BORTOLETTO et al., 2017), pela cinza da casca de arroz (HE et al, 2017) dentre outros.

O presente estudo caracterizou a microestrutura da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em diferentes formas de processamentos e apresenta os resultados obtidos através de ensaios que avaliaram em termos de resistência mecânica e durabilidade o concreto produzido com a substituição parcial do cimento Portland pela cinza, nas porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20%, comparando os resultados com um concreto de referência.

## 2 - JUSTIFICATIVA

O concreto é o segundo material mais consumido do mundo. Ele é utilizado como material estrutural em toda a construção civil, desde edificações, obras de saneamento, estações de tratamento de água, sistemas de esgotos, barragens, usinas hidrelétricas, pontes, viadutos, dentre outros. Assim, é de suma importância que haja o desenvolvimento e aperfeiçoamento contínuo do mesmo.

O Brasil, como país em desenvolvimento, tem um importante programa de infraestrutura a ser implementado, e o aumento da população, aliado aos seus crescentes padrões de urbanização, deverá impulsionar a demanda por cimento nas próximas décadas (SNIC, 2019b).

Infelizmente está intrínseco no processo produtivo do cimento a emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), de forma que as exigências atuais por aspectos sustentáveis nesse e em outros setores da construção civil tornam essa problemática relevante para o desenvolvimento da pesquisa científica.

A criação de um cimento feito com o uso de resíduos e que atenda às necessidades estruturais relativas à resistência e durabilidade, agrega valores de reciclagem e diminuição de emissão de  $\text{CO}_2$ . Logo, qualquer avanço de conhecimento técnico-científico nessa área poderá trazer benefícios não apenas ambientais, mas também econômicos.

## **3 - OBJETIVOS**

### **3.1 - Objetivo Geral**

Com a crescente discussão dos impactos ambientais gerados pela indústria cimenteira pesquisas recentes buscam diferentes tipos de materiais capazes de substituir, mesmo que parcialmente, o cimento.

Tendo em vista a grande produção anual do resíduo do bagaço da cana-de-açúcar, que normalmente é apenas descartado no ambiente, este trabalho tem como objetivo geral caracterizar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e avaliar em termos de resistência mecânica e durabilidade o concreto confeccionado com a utilização da cinza como substituinte parcial do cimento Portland no concreto.

### **3.2 - Objetivo Específico**

- Coleta dos resíduos do bagaço da cana-de-açúcar gerados na usina;
- Tratamento dos resíduos a partir da secagem, peneiramento e moagem;
- Caracterização e análise física, química, mineralógica e morfológica da cinza;
- Caracterização dos demais materiais a serem empregados no concreto;
- Definição do traço de referência, moldagem e cura dos corpos de provas;
- Determinação da resistência mecânica a compressão para as idades de 7, 28 e 91 dias;
- Determinação aos 28 dias do teor de absorção de água, índice de vazios e massa específica seca dos corpos de prova de concreto.

## 4 - REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 - Materiais constituintes do concreto

#### 4.1.1 - Aglomerante

O cimento Portland é um pó fino acinzentado, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, com inúmeras propriedades e características, dentre as quais ser moldável quando misturado com água e ser capaz de desenvolver elevada resistência mecânica. A denominação se deve a sua semelhança com a pedra de Portland, um calcário extraído em Dorset, na Inglaterra (RIBEIRO, 2011).

O processo de produção do cimento se inicia na extração das matérias-primas de rochas calcárias e argila por meio de detonações. Elas são trituradas e transportadas para a indústria onde são armazenadas e homogeneizadas, produzindo um pó fino conhecido como cru (COSTA, 2012).

Quando o calcário presente no cru é submetido a altas temperaturas (acima de 800°C) se torna cal (CaO) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>). A cal reage (em ambiente de 1450°C) com o óxido de alumínio - alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), o óxido de ferro ou hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e dióxido de silício - sílica (SiO<sub>2</sub>), estes presentes na argila e em outras matérias primas, formando o clínquer, um material em forma de nódulos escurecidos. Após resfriado e moído, o clínquer recebe adição de sulfato de cálcio - gesso (CaSO<sub>4</sub>), para impedir que as reações de hidratação entre o cimento e a água se processem instantaneamente (RIBEIRO, 2011).

O gesso é adicionado (3 a 5%) ao clínquer para regular como o cimento endurecerá (tempo de pega) e então a mistura é novamente moída sendo adicionados outros materiais. Essas adições, usadas em variadas proporções, dão ao cimento propriedades específicas como redução de impermeabilidade, resistência a sulfatos e ambientes agressivos, melhor desempenho e acabamento (COSTA, 2012).

Cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e constituem, geralmente, 95% a 96% do total na análise de óxidos (BAUER, 2015).

De acordo com RIBEIRO (2011) podemos esquematizar a fabricação do cimento da seguinte maneira:

Calcário + Argila + Forno = Clínquer

Clínquer + Gesso + moagem = Cimento Comum

Em todas as etapas são consumidos energéticos líquidos, sólidos ou gasosos, além de eletricidade proveniente de centrais elétrica públicas e da autoprodução (COSTA, 2012).

Existem diversos tipos de cimento Portland, os quais se diferem em função de sua composição (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Os principais tipos comercializados e os limites de suas composições são apresentados no Quadro 1, adaptado da Tabela 2 da ABNT NBR 16697/2018.

Quadro 1 – Composição limite para cimentos Portland.

<b>Limites de Composição dos Cimentos Portland (% de massa)</b>						
<b>Designação</b>	<b>Sigla</b>	<b>Sufixo</b>	<b>Clínquer + Gesso</b>	<b>Escória</b>	<b>Material Pozolânico</b>	<b>Material Carbonático</b>
Cimento Portland Comum	CP I	RS ou BC	95 - 100	0 - 5		
Cimento Portland Comum com Adição	CP I – S		90 - 94	0	0	6 - 10
Cimento Portland Composto com Escória Granulada de Alto Forno	CP II – E		51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland Composto composto com Material Pozolânico	CP II – Z		71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Cimento Portland Composto com Material Carbonático	CP II – F		75 - 89	0	0	11 - 25
Cimento Portland de Alto Forno	CP III		25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Cimento Portland Pozolânico	CP IV		45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V-ARI*		90 - 100	0	0	0 - 10
Cimento Portland Branco Estrutural	CPB		75 - 100	-	-	0 - 25
* No caso de CPV-ARI RS, podem ser adicionadas escória ou material pozolânico						

O Cimento Portland, quando em contato com água, se dissolve liberando na água da mistura os seus componentes. Estes componentes se combinam com a água e se recombinam entre si formando os produtos de hidratação. Na medida que vão sendo

formados, a pasta de cimento passa a se apresentar em estado sólido e a adquirir, com o tempo, maior resistência mecânica e rigidez. Neste processo de hidratação da pasta de cimento, ela se adere às superfícies com as quais esteja em contato, permitindo a sua mistura com areia e agregados na formação dos concretos. Os principais produtos de hidratação do cimento são: silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). O silicato de cálcio hidratado determina a resistência mecânica e a durabilidade. Já o  $\text{Ca(OH)}_2$  é solúvel e tem contribuição desprezível para a resistência mecânica. Sua principal influência positiva é na ajuda para manter o elevado PH do ambiente dos concretos, impedindo a corrosão das armaduras (RODRIGUES et al., 2017).

#### 4.1.2 - Agregados

Agregados é a denominação genérica dada aos materiais que são acrescentados ao cimento e à água para se obterem as argamassas e os concretos. Eles se apresentam em forma de grãos, tais como areia e britas, e devem ser inertes e isentos de impurezas. Constituem aproximadamente 70% do volume total dos produtos em que são utilizados. Podem ser classificados quanto à dimensão de seus grãos, em miúdo e graúdo. (RIBEIRO, 2011).

Conforme NBR 7211/2009, os agregados miúdos são as areias de origem natural (encontrada na natureza sob a forma definitiva de utilização) ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm. Já os agregados graúdos são os pedregulhos ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou mistura de ambos, cujos grãos passam pela peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm.

Os agregados podem também, se classificar de acordo com a composição granulométrica, que é a expressão das proporções dos grãos de diferentes tamanhos. A composição granulométrica tem influência direta sobre a qualidade desses produtos, principalmente nos aspectos relativos à trabalhabilidade, compactidade e resistência aos esforços mecânicos (RIBEIRO, 2011).

Bauer (2015) traz a classificação granulométrica de cada agregado, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação granulométrica dos agregados.

<b>Agregado</b>	<b>Granulometria (mm)</b>
Areia fina	0,05 a 0,3
Areia média	0,3 a 1,20
Areia grossa	1,2 a 4,8
Pó de pedra	menor que 4,8
Brita 0 ou pedrisco	4,8 a 9,5
Brita 1	9,5 a 19
Brita 2	19 a 25
Brita 3	25 a 50
Brita 4	50 a 76

#### 4.1.3 - Água

A água é o ingrediente responsável pelas reações de hidratação do cimento, fazendo a união entre os demais componentes, fornecendo plasticidade para o concreto.

No amassamento do concreto a água a ser usada não deve conter impurezas que possam prejudicar as reações entre ela e os compostos do cimento (PETRUCCI, 1998). Além disso, impurezas em excesso podem afetar a resistência, o tempo de pega, a ocorrência de eflorescência e a corrosão da armadura (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O teor de água do concreto fresco é obtido através da relação em peso água-cimento (fator A/C). Dessa forma a quantidade de água é estabelecida conforme o traço elaborado através da dosagem e deve ser seguida, pois alterações dessa medida influenciarão diretamente na resistência do concreto (DURAN e FRACARO, 2011).

#### 4.1.4 - Adições minerais

As adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, com propriedades pozolânicas, cimentícias ou de preenchimento de poros que são utilizadas com o objetivo de somar ou mesmo substituir, parcialmente, o cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Estes materiais suplementares devem apresentar compatibilidade química e física com o cimento. A compatibilidade química se baseia na presença de teores altos de sílica e alumina (tipicamente superior a 75%) amorfas, que têm potencial para reagir com o hidróxido de cálcio, liberado durante a hidratação do cimento Portland, produzindo

silicato de cálcio hidratado. Por outro lado, os materiais para serem adequados não devem conter teores elevado de enxofre, cloretos, sódio e potássio.

Quanto à compatibilidade física, as partículas devem ser finas o suficiente para viabilizarem a dissolução da sílica e da alumina para se combinarem com o produto gerado na hidratação do cimento. A distribuição de partículas ainda tem influência no desempenho do concreto e outros materiais cimentícios com adições minerais, trata-se do efeito *filler*, em que as partículas das adições, mesmo sem reagirem quimicamente podem favorecer um maior adensamento das demais partículas do concreto (areia e brita), além de preencherem macroporos no material. Adições minerais que apresentem reatividade química e tenham distribuição de partículas adequadas promovem ganhos no desempenho dos concretos (RODRIGUES et al, 2017).

A NBR 1265/2014 traz os requisitos físicos e químicos para que o material possa ou não ser classificado como pozolana. Ela define materiais pozolânicos como sendo materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Ela também classifica os materiais pozolânicos em três classes, N, C e E. Na classe N estão as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Na classe C estão as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas e na classe E, as pozolanas cujos atributos diferem das classes anteriores.

Quando é empregada adição mineral com teores consideráveis de Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) em estado amorfo (estrutura não cristalina a qual a distribuição atômica se encontra desordenada ao longo de distâncias interatômicas relativamente grandes) e na forma de partículas finas, durante o processo de dissolução do cimento para a formação dos produtos de hidratação a adição mineral também se dissocia e se combina. Neste processo, o hidróxido de cálcio se combina com a sílica amorfa da pozolana formando novos componentes de silicato de cálcio hidratado favorecendo o desempenho dos concretos com adição. Esta reação é conhecida como reação pozolânica (RODRIGUES et al., 2017).

As adições minerais podem ser muito diferentes entre si. Desta forma, a maneira como interagem química e fisicamente com o cimento pode ser bastante diferente em

cada caso. Adições muito reativas podem se combinar com o cimento já durante a fase de hidratação da pasta. Por outro lado, adições menos reativas podem interagir com o  $\text{Ca(OH)}_2$  da pasta após ele já ter se estruturado como um material sólido. Assim, é importante verificar como os produtos que incorporam adições minerais se desenvolvem ao longo do tempo (RODRIGUES et al., 2017).

## 4.2 - Propriedades do concreto

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, sendo precedido apenas pela água IBRACON (2009). O concreto de cimento Portland é formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários, que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (NBR 12655/2015). Segundo Walid (2013), quando recém misturado, ele deve apresentar propriedades de plasticidade tais que facilitem seu transporte, lançamento e adensamento e, quando endurecido, propriedades que atendam ao especificado em projeto quanto às resistências à compressão e à tração, módulo de deformação e outras. Poderão ser empregados ainda no preparo do concreto, com o intuito de melhorar ou corrigir algumas de suas propriedades, os chamados aditivos. Esses materiais podem proporcionar ao concreto alterações de propriedades, tais como: plasticidade, permeabilidade, tempo de pega e resistência à compressão.

O concreto é um material que responde bem às tensões de compressão, mas em contrapartida responde mal às tensões de tração. Na resistência à compressão ele resiste aproximadamente dez vezes mais que na resistência à tração; na flexão, a resistência à tração (módulo de ruptura) é geralmente duas vezes maior que as resistências obtidas por tração simples. O concreto resiste mal ao cisalhamento, em função das tensões de distensão que então se verificam em planos inclinados. São vários os fatores que podem afetar a resistência mecânica do concreto, sendo o principal deles a relação água/cimento (PETRUCCI, 1987).

Antes da confecção do concreto é necessário que seja realizado um estudo de dosagem. A dosagem é a escolha certa dos componentes do concreto, determinando a quantidade de cada material visando manter a qualidade (consistência, resistência e durabilidade) e economia de materiais (NEVILLE, 1982).

A consistência do concreto é utilizada para relacionar suas características com a mobilidade da massa e a coesão dos insumos que o compõem. A NBR NM 67/1998 descreve os procedimentos para a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone também chamado slump test.

Para Araújo (2000), a resistência de um concreto depende fundamentalmente do fator água/cimento, isto é, quanto menor for este fator, maior será a resistência do concreto. Mas, evidentemente, deve-se ter um mínimo de água necessária para reagir com todo o cimento e dar consistência adequada ao concreto. Pode-se considerar a resistência do concreto como sendo função principalmente da resistência da pasta de cimento endurecida, do agregado e da ligação pasta/agregado.

Quem primeiro reconheceu essa relação de dependência foi Abrams, em trabalho publicado em 1919. Baseando-se em pesquisas de laboratório, ele demonstrou que a resistência do concreto dependia das propriedades da pasta endurecida, a qual, por sua vez, era função do fator água/cimento (ARAÚJO, 2000).

A relação água/cimento, de acordo com Neville (1997), estabelece ainda a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer estágio de hidratação. Desta forma, nota-se que a relação água/cimento influencia, juntamente com o grau de adensamento, o volume de vazios do concreto.

Uma estrutura de concreto armado é uma ligação solidária de concreto com uma estrutura resistente à tração, geralmente o aço. Nessa união, o concreto fica responsável por suportar as tensões de compressão e o aço de suportar os esforços de tração.

A NBR 5739/2018 descreve os procedimentos para a determinação da resistência a compressão axial do concreto através de ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos moldados e curados conforme NBR 5738/2015.

Para que a ligação solidária entre o concreto e o aço seja considerada durável ela deve possuir capacidade de resistir às influências ambientais previstas e definidas no início dos trabalhos de elaboração do projeto (NBR 6118:2014).

A durabilidade das estruturas depende das características de resistência a compressão do concreto, da espessura e da qualidade do cobrimento da armadura (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2007). A porosidade deste material é caracterizada por uma microestrutura de poros de várias dimensões, através dos quais podem penetrar as substâncias presentes no ambiente (BERTOLINI, 2010).

A durabilidade do concreto de cimento Portland pode ser definida como a capacidade de resistir à ação de intempéries, reação química com agentes agressivos, abrasão, ou qualquer outro tipo de deterioração, sem perder sua funcionalidade e formato originais. Sendo assim, considera-se o fim do tempo de vida útil de um determinado material quando sua utilização passa a ser insegura e antieconômica (ACI Committee 201, 2008).

Desse modo a durabilidade do concreto está diretamente relacionada com a vida útil da estrutura e com as suas condições ambientais de exposição. Estima-se que 40% do total de recursos da construção civil estão voltados para o reparo e sua manutenção estrutural. Além disso, há relação com a sustentabilidade, em função da conservação dos recursos naturais com o uso de materiais mais duradouros e devido aos altíssimos custos sociais e econômicos vinculados a falhas inesperadas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Ainda para Mehta e Monteiro (2008) a deterioração do concreto pode ocorrer através de reações físicas ou químicas. A deterioração das estruturas de concreto por efeitos físicos normalmente está atrelada ao desgaste superficial ou a perda de massa do material e a sua fissuração em condições extremas de temperatura, umidade e de salinidade. No caso da deterioração por reações químicas estas estão normalmente associadas às interações entre os agentes ambientais agressivos e os constituintes da pasta de cimento.

A durabilidade do concreto pode ser incrementada com a introdução em sua composição de adições minerais ativas, ou seja, com propriedades pozolânicas. (CORDEIRO et al., 2019).

Mehta e Monteiro (2008), afirmam que o emprego de adições ativas gera diminuição do volume de vazios do concreto, redução das fissurações térmicas devido ao baixo calor de hidratação, aumento da resistência final e redução da permeabilidade devido à baixa porosidade.

### **4.3 - Indústria cimenteira e as emissões de CO<sub>2</sub>**

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é o principal gás contribuinte para o aquecimento global pelo processo do efeito estufa (BERMANN, 2003; GOLDEMBERG e LUCON, 2011).

O relatório feito pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) fez previsões para o aquecimento global, indicando-o como o possível responsável pela elevação do nível do mar, causando enchentes, mudança do ciclo hidrológico e alteração da distribuição de temperatura no planeta; desertificação de áreas, afetando o equilíbrio dos ecossistemas e contribuindo para a destruição de habitats e extinção das espécies.

Do ponto de vista da saúde humana, o resultado das catástrofes poderá levar à destruição de cidades, e a distribuição diferenciada das temperaturas acarretará em drásticas mudanças climáticas, como aumento excessivo das temperaturas em algumas regiões e o inverso em outras (CALDAS, 2016).

Infelizmente, está intrínseco no processo produtivo do cimento a emissão de CO<sub>2</sub>, tanto na transformação química da matéria-prima em cimento, quanto na queima de combustíveis utilizados para possibilitar essa transformação.

Estimativas iniciais sugerem que 4,1 Gt de cimento foram produzidos globalmente em 2019. A produção atingiu uma alta de 4,2 Gt em 2014 e, desde então, permaneceu em torno de 4,1 Gt (IEA, 2020).

Em escala mundial, aproximadamente 90% das emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção de clínquer, seja na calcinação da matéria-prima, seja com a queima de combustíveis no interior do forno. A parcela restante resulta do transporte de matérias-primas e das emissões pelo consumo de energia elétrica na fábrica (MCTI, 2016).

A indústria cimenteira responde, globalmente, por cerca de 7% de todo o gás carbônico emitido pelo homem. No entanto, o Brasil é um dos países que emite menor quantidade de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzida, esta participação é praticamente um terço da média mundial (SNIC, 2019b).

Ainda conforme SNIC (2019b) A redução das emissões da indústria cimenteira brasileira se deve a três principais ações ocorridas no setor: O uso de adições ou substitutos do clínquer; o uso de combustíveis alternativos através do coprocessamento de resíduos e da biomassa e por último a melhoria da eficiência térmica e energética da própria indústria cimenteira. Dados de 1990 a 2014 mostram que houve redução da relação clínquer/cimento de 80% para 67%, além disso a indústria conseguiu aumentar a participação dos combustíveis alternativos em sua matriz energética de 9% para 15% e o setor conseguiu reduzir sua intensidade térmica em 17%.

Esta posição de destaque, ao mesmo tempo em que é um reconhecimento ao esforço do setor no combate às mudanças climáticas, representa um grande desafio que é produzir o cimento necessário ao desenvolvimento do país, buscando ao mesmo tempo soluções para reduzir ainda mais as emissões de CO<sub>2</sub> (SNIC, 2019b).

Visto isso, em 2019 houve o lançamento do Roadmap Tecnológico do Cimento, documento que traça as principais ambições e diretrizes para a redução de quase 35% das emissões de carbono da indústria cimenteira do Brasil até 2050. O documento propõe alternativas para reduzir, ainda mais, as emissões de CO<sub>2</sub> da atividade por meio de novas matérias primas e fontes alternativas de energia, como lixo doméstico, resíduos agrícolas e industriais, dentre outros (SNIC, 2019a).

Assim, pesquisadores buscam encontrar materiais alternativos capazes de substituir, ao menos parcialmente o cimento Portland e conseqüentemente a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pela indústria cimenteira.

A utilização de resíduos descartados capazes de substituir o cimento constitui transformação de fonte de despesa em obtenção de novos materiais, sendo uma alternativa para retirar do meio ambiente os rejeitos e resíduos que diariamente são produzidos como subprodutos pela indústria e não utilizados na sua totalidade (GALVÃO et al., 2018).

Nesse sentido, a criação de um cimento que atenda às necessidades estruturais relativas à resistência e durabilidade, feito com uso de resíduos, agrega valores de reciclagem e diminuição na emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido.

#### **4.4 - Produção agrícola e a geração de resíduos**

O Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas – IPEA (2012), expõe que as culturas mais cultivadas no Brasil (cana-de-açúcar, arroz, soja, milho, feijão, trigo, café, cacau, além de frutas como laranja, banana, coco-da-baía e uva) também são as que mais contribuem com impactos negativos ao meio ambiente, através da grande geração de resíduos sólidos. Ainda de acordo com o IPEA (2012), este setor tem uma geração estimada em torno de 291 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano nas agroindústrias associadas a essas culturas.

A ABNT NBR 10.004 define resíduos sólidos como Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Os resíduos podem ter propriedades físicas e químicas capazes de servir como matéria-prima em segmentos industriais, como por exemplo, na indústria da construção civil, pela substituição parcial do cimento.

De acordo com o IPEA (2012), somente nas agroindústrias associadas a cultura de cana-de-açúcar existe uma geração estimada em torno de 200 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano que, apesar de possuírem características relevantes como matéria-prima para diversos setores industriais, normalmente são apenas descartados no meio ambiente.

Com a possibilidade da substituição parcial do cimento pelos resíduos agroindustriais haveria redução do impacto ambiental da disposição desses resíduos na natureza além da diminuição do consumo de cimento por metro cúbico de concreto com consequente redução das emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de materiais de cimento. Além disso segundo Stein et al., (2015) já está sendo questionado a respeito da disponibilidade de cinzas volantes e de outros aditivos minerais comumente usados no concreto, visto que esta quantidade não está acompanhando a crescente demanda.

Nas termoelétricas das usinas de açúcar e álcool, durante a moagem da cana-de-açúcar para a extração do caldo, há geração de bagaço. Esse subproduto é normalmente queimado como combustível em caldeiras que geram o vapor d'água utilizado na produção de açúcar e álcool e em processos de cogeração de energia. A cinza do bagaço é gerada como subproduto (CORDEIRO et al., 2009). A queima do bagaço produz substancial liberação de CO<sub>2</sub>, porém, o balanço nas emissões de CO<sub>2</sub> é praticamente nulo, pois, através da fotossíntese, a biomassa queimada é repostada no ciclo seguinte da cultura da cana-de-açúcar (CORDEIRO, 2006).

Andreolli (2008) apresenta que a cada tonelada de cana é possível gerar aproximadamente 250 kg de bagaço úmido. Sales e Lima (2010) relatam que para cada tonelada de bagaço incinerado, são gerados por volta de 25 quilogramas de cinzas. De acordo com dados do CONAB (2019) a produção brasileira de cana-de-açúcar, estimada para a safra 2019/20, é de 615,98 milhões de toneladas. Assim o volume de cinza proveniente do bagaço de cana-de-açúcar poderia atingir quase 4 milhões de toneladas/ano. Uma quantidade significativa em termos de adição, considerando-se que as vendas de cimento no mercado interno, entre janeiro a dezembro de 2019, totalizaram 54,5 milhões de toneladas (SNIC, 2019a).

#### 4.5 - Concretos sustentáveis

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais, além de grande gerador de resíduos sólidos (CORDEIRO et al., 2019). O uso de materiais pozolânicos em substituição parcial de cimento na confecção de concretos e argamassas apresenta diversas vantagens sendo uma das mais importantes a redução de emissões de CO<sub>2</sub>, porque sua obtenção demanda menos energia que à produção dos produtos associados ao clínquer (BERENGUER et al., 2018).

Muitos pesquisadores estudam maneiras de incorporar materiais considerados resíduos no processo construtivo, reduzindo o consumo dos materiais naturais e ainda dando uso a resíduos que seriam descartados no ambiente.

Ao longo dos últimos anos foram estudados diversos materiais provenientes da agroindústria para aplicação em matrizes cimentícias, como exemplo têm-se os estudos de Cordeiro et al., (2009) que caracterizaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. A pesquisa mostrou que a temperatura de queima influencia no índice de atividade pozolânica da cinza, sendo a melhor temperatura à 600 °C, atingindo índice de atividade pozolânica igual a 77%, superando o valor mínimo de 75% estipulado pela NBR 12653/2014 para que o material possa ser classificado como pozolana.

Rezende, (2016) chegou à conclusão de que, além do fator sustentável, em estruturas com grandes volumes de concreto, a redução do consumo de cimento é extremamente vantajosa, pois reduz o aumento da temperatura minimizando a retração térmica; melhora a trabalhabilidade, reduzindo a demanda de água e possui menor absorção de água, devido a menor porosidade, dificultando a entrada de agentes agressivos ao concreto.

Berenguer et al., (2018) analisaram a influência das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento na resistência a compressão de argamassas. As cinzas apresentaram cerca de 60% de material amorfo em sua composição. Os resultados obtidos com a substituição em 15% proporcionaram incrementos na resistência a curto e longo prazo. Já Lopes et al., (2018) fizeram a substituição de 30% dos agregados miúdo e graúdo pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar e resíduos da construção civil respectivamente. Os resultados mostraram melhora, ainda que pequena, quanto ao desempenho mecânico em comparação ao concreto convencional.

Jagadesh et al., (2018) propuseram a substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar em até 30%. A substituição foi realizada de duas formas uma com a cinza em seu estado natural e outra após procedimento de moagem, sendo avaliadas as propriedades mecânicas do concreto. A resistência dos concretos utilizando a substituição parcial do cimento Portland pela cinza moída foram superiores a resistência dos concretos que utilizaram a cinza natural.

Zareei et al., (2018) investigaram a possibilidade do uso de cinza de bagaço da cana como substituição parcial do cimento em concretos comuns, leves e autoadensáveis, a cinza utilizada passou por processo de requeima a 700 °C durante uma hora. Foram realizados testes de resistência à compressão, tração e ao impacto, os resultados mostraram que a quantidade ótima de substituição de cimento pela cinza foi de 5%. Para esse teor de substituição, nos concretos leves e autoadensáveis, houve aumento da resistência ao impacto em 50%.

Rajasekar et al., (2018) fizeram um tratamento na cinza do bagaço da cana-de-açúcar, o material foi seco, queimado em temperatura controlada e moído. O cimento Portland comum foi então substituído por 5 a 20% em peso de cinza para confecção dos corpos de prova. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à penetração de cloretos e sortividade. A taxa de substituição ideal da cinza tratada foi de 15% resultando em melhor desempenho em todos os testes.

Galvão et al., (2018) analisaram a viabilidade em se adicionar resíduos da palha de soja, seus resultados demonstraram bom desempenho inicial, mas não acompanharam o ganho de resistência do concreto ao longo do tempo. O autor atenta que isso pode ser consequência de diversos fatores como por exemplo o tratamento na aquisição da palha de soja, a qual foi obtida de forma manual, através da queima do material já seco.

Cordeiro et al., (2019) fizeram a caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. O estudo mostrou que apesar da sílica ser o mineral predominante na composição química do resíduo ela apresenta estrutura cristalina e seus elementos reativos não atenderam aos requisitos químicos e físicos prescritos na NBR 12653/2014. Os concretos produzidos com o uso da cinza não conseguiram atingir a resistência à compressão axial do concreto de referência.

Vários autores também pesquisaram sobre o uso da cinza da casca do arroz em compostos cimentícios e encontraram um teor ótimo de substituição do cimento Portland pela cinza, tipicamente variando entre 7,5 a 20% (HARISH et al., 2010; ANTIOHOS et

al, 2014.; GASTALDINI et al, 2014.; BIE et al, 2015.; VENKATANARAYANAN e RANGARAJU, 2015; HE et al, 2017.; ZAREEI et al., 2017; BERENGUER et al, 2018; RAJASEKAR et al, 2018).

Vieira e Rodrigues (2018) fizeram a extração das fibras de milho e arroz e adicionaram-nas ao concreto. A adição das fibras nas matrizes cimentícias aumentou de forma relativamente significativa a durabilidade e a resistência do concreto.

O uso de resíduos florestais também tem sido estudado, dentre os diversos trabalhos destaca-se o de Resende (2013) que caracterizou a cinza de cavaco de eucalipto e avaliou sua utilização como material cimentício suplementar. As cinzas foram utilizadas em substituição parcial do cimento nos teores de 5, 10 e 15%. Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas foram próximos ao compósito sem substituição, mostrando ser uma alternativa viável no quesito eliminar um passivo ambiental das empresas geradoras deste tipo de resíduo.

Já Bortoletto et al., (2017) realizaram a avaliação do resíduo da cinza da madeira do eucalipto como substituição parcial da areia em argamassas. Os resultados indicaram ser ideal a substituição do agregado miúdo pela cinza em até 30%, sendo obtidos para esse teor os melhores resultados de resistência à compressão das argamassas, com trabalhabilidade aceitável e redução da absorção de água.

Um estudo sobre o processamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em compostos cimentícios, realizado por Rodrigues et al., (2019) criou uma metodologia de processamento simples da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para seu uso em compostos cimentícios. Os resultados referentes a resistência e durabilidade obtidos foram bons ao ponto de o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Cefet-MG) solicitar o pedido de patente (BR 102017020870-2 A2 Data da Publicação Nacional: 16/04/2019).

A mudança nas condições de cultivo de um lugar para outro, até mesmo a variação das espécies de cultivo, temperatura de combustão das caldeiras e o período de queima faz com que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresente características diferentes de pesquisa para pesquisa (YADAV, 2019). Porém podemos perceber que o fator sustentabilidade tem sido o grande impulsionador quando o assunto é novos materiais. Todavia, apesar de muitos estudos envolvendo resíduos no concreto terem conseguido obter bons resultados, ainda é necessário mais análises e pesquisas aprofundadas, a fim de melhor caracterizá-los e verificar o processamento e teor de adição/substituição ideal,

visando a economia na obtenção de concretos sustentáveis que possuam melhor ou igual resistência e durabilidade quando comparados com o concreto convencional.

## 5 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 - Cimento

O cimento utilizado na presente pesquisa foi o cimento Portland CPV ARI (Cimento de alta resistência inicial) produzido pela Cimento Nacional, de massa específica aparente  $1,2\text{g/cm}^3$  e densidade  $2,99\text{g/cm}^3$  de acordo com o fabricante.

O cimento Portland CPV ARI tem como características principais a cura rápida e a alta resistência inicial, normalmente é utilizado quando se necessita de rápida desforma. A escolha se deu devido à ausência em sua composição de escória e material pozolânico, a fim de não interferir nos resultados da pesquisa. De acordo com a NBR 16697/2018 a composição em massa desse cimento deve ficar entre teores de 90 a 100% de clínquer e sulfato de cálcio, com a adição de até 10% de material carbonático.

A nova norma de especificação de cimento ABNT NBR 16697/2018 unificou os requisitos de todos os tipos de cimento em um só documento e teve como principal mudança o aumento do teor de adição de fíller calcário. Essa modernização visa a um alinhamento com padrões normativos internacionais e atende aos direcionamentos da Agência Internacional de Energia (IEA) e da Iniciativa pela Sustentabilidade do Cimento (CSI), que incentivam a adoção de alternativas ou tecnologias mais avançadas para diminuir emissões específicas de  $\text{CO}_2$  por tonelada de cimento. Logo, é inquestionável a preocupação quanto as emissões de  $\text{CO}_2$  da indústria cimenteira e a constante necessidade de se procurar alternativas a fim de reduzi-las.

### 5.2 - Areia

Foi utilizado como agregado miúdo a areia quartzosa, nela foram realizados os ensaios de massa específica conforme NBR NM 52/2009 e de granulometria utilizando agitador de peneiras mecânico (Figura 1) seguindo as prescrições da NBR NM 248/2003, sendo desenvolvida a sua curva granulométrica e determinado o módulo de finura e o diâmetro máximo característico (DMC) do agregado.



Figura 1 - Agitador de peneiras.

### 5.3 - Brita

Como agregado graúdo utilizou-se brita basáltica, nela foram realizados os ensaios de massa específica conforme NBR NM 53/2009 e de granulometria utilizando agitador de peneiras mecânico seguindo as prescrições da NBR NM 248/2003, sendo desenvolvida sua curva granulométrica e determinado o diâmetro máximo característico (DMC) do agregado.

### 5.4 - Água

Foi empregada água potável, disponível pela Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul (SANESUL). De acordo com ABNT NBR 15900-1/2009, a água de abastecimento público é considerada adequada para uso em concreto e não necessita ser ensaiada.

### 5.5 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A cinza é obtida através do processo de geração de energia pela queima do bagaço de cana-de-açúcar. O bagaço possui potencial calorífico e quando queimado resulta na cinza bruta, que possui ainda teor elevado de umidade e matéria orgânica oriunda dos bagaços não incinerados totalmente durante o processo de geração de energia.

Os Resíduos da queima do bagaço da cana-de-açúcar analisados ficam depositados à céu aberto no pátio de cinzas da Usina Bunge situada na Av. Hum, s/n - Distrito Industrial, Dourados – MS (Figura 2). A cinza bruta foi coletada manualmente (Figura 3) e armazenada em tambores plásticos fechados e levada até o Laboratório de Engenharia de Produto e Processo (LEPP) da Universidade Federal da Grande Dourados.



Figura 2 – Pátio de cinzas Usina localizada em Av. Hum, s/n - Distrito Industrial, Dourados – MS.



Figura 3 - Funcionário da Usina Bunge ajudando na coleta da cinza em tambor plástico.



Figura 4 – Cinza bruta do bagaço da cana-de-açúcar.

No laboratório foi realizado o ensaio de umidade conforme prescrições da ABNT NBR NM 24/2002. A cinza bruta (Figura 4) contém bagaços que não foram totalmente queimados na caldeira e outros contaminantes como pedras e folhas, visto que o material fica armazenado a céu aberto. Assim, foi necessário realizar o tratamento da mesma, de modo a obter um material mais homogêneo e de granulometria mais próxima com o cimento. A cinza bruta foi então submetida aos tratamentos de secagem, peneiramento e moagem.

O resíduo foi seco em estufa durante 24 horas sob temperatura de  $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  a fim de adquirir constância em massa (Figura 5).



Figura 5 – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar na estufa.

Após a secagem foi realizado um peneiramento grosso na peneira ABNT malha #10 cuja abertura é de 2 mm (Figura 6). O peneiramento foi feito manualmente apenas para retirada de bagaços maiores não queimados, pedras e folhas.



Figura 6 – Peneira com abertura de 2 mm.

Em seguida foi realizada a moagem da cinza, em moinho de bolas composto por 62 esferas cerâmicas de aproximadamente 2,5 cm de diâmetro. Para isso padronizou-se a quantidade de material no moinho de bolas em 1300g e o tempo de moagem em 60 minutos.

Devido ao alto consumo energético envolvido na etapa de moagem, a pesquisa procurou limitar esse em no máximo 60 minutos. De forma que a cinza empregada na produção de todos os concretos foi a cinza moída por 60 minutos.

A moagem é empregada para obter produtos com tamanhos de partículas reduzidos. O processo consiste na combinação dos efeitos de compressão, impacto e abrasão realizados em moinhos compostos com corpos moedores (POGGIALI, 2010).



Figura 7 – Moinho cerâmico de bolas utilizado na pesquisa.

As Figuras 8, 9 e 10 mostram a cinza resultante após realizada cada etapa de tratamento. O material final é visivelmente mais fino e homogêneo.



Figura 8 – Cinza da cana-de-açúcar após secagem em estufa por 24 horas sob temperatura de  $100 \pm 5$  °C.



Figura 9 – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar após processo de secagem e peneiramento em peneira com abertura 2 mm.



Figura 10 – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar após secagem, peneiramento e moagem em moinho de bolas cerâmicas por 60 minutos.

Durante o tratamento da cinza, alguns ensaios foram sendo realizados. Após a etapa de peneiramento foi determinada a massa específica da cinza conforme ABNT NBR 16605/2017.

Na etapa de moagem, primeiramente foi realizado um estudo a fim de verificar a granulometria da cinza conforme tempos de moagem de 0, 30 e 60 minutos. Seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 46/2003 e ABNT NBR NM 248/2003 foram desenvolvidas as curvas granulométricas, determinados os módulos de finura e a porcentagem de material fino passante na peneira ABNT de malha #200 de 75  $\mu\text{m}$  por lavagem.

O módulo de finura é definido como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras série normal, dividida por 100 (NBR NM 248/2001). Quanto maior o módulo de finura, mais grosso será o solo.

A cominuição de aditivos minerais e materiais cimentícios é imprescindível para ativar as reações químicas, cujas taxas são diretamente proporcionais à superfície específica do material que, por sua vez, é inversamente proporcional ao tamanho das partículas (CORDEIRO, 2006). O aumento da superfície específica está diretamente relacionado à cinética das reações pozolânicas (CORDEIRO et al, 2008). De acordo com Poggiali (2010) a redução das partículas também pode proporcionar maior compacidade à mistura.

Assim a moagem é importante tanto para uniformizar as partículas da cinza, quanto para proporcionar maior reatividade com o mesmo, devido ao aumento da superfície específica.

A Figura 11 mostra uma etapa do ensaio de granulometria fina feita por lavagem, e a Figura 12 mostra o ensaio de granulometria grossa utilizando agitador mecânico de peneiras contendo o material seco retido na peneira malha #200 de 75  $\mu\text{m}$ .



Figura 11 – Cinza do bagaço da cana de açúcar sendo ensaiada conforme NBR NM 46/2003.



Figura 12 – Cinza do bagaço da cana de açúcar sendo ensaiada conforme NBR NM 248/2003.

Já com o resíduo tratado, foi realizado o ensaio de perda ao fogo conforme NBR NM 18/2012. O ensaio de perda ao fogo consiste na determinação da porcentagem de massa da amostra que é perdida ou decomposta quando a mesma é submetida a aquecimento pré-determinado. Esta perda de massa está relacionada com a água estrutural existente na amostra e com matéria orgânica que pode ser um contaminante da amostra. Nesse ensaio foi utilizado forno mufla sob temperatura de  $1000 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 1 hora (Figura 14).

Foi caracterizada em termos químicos e de morfologia da superfície a cinza não moída, a cinza moída por 60 minutos e amostras dessa cinza moída após a mesma ser submetida a queima controlada em mufla sob temperaturas de  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  durante uma hora. A Figura 13 mostra a mufla utilizada para queima em temperatura de  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  e a Figura 14 mostra a mufla onde foi realizado a queima à  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Figura 13 – Mufla utilizada no ensaio de 600 °C.



Figura 14 – Mufla utilizada no ensaio de 1000 °C.

As altas temperaturas das caldeiras, a combustão incompleta do bagaço, a presença de substâncias cristalinas e impurezas, como o carbono, influenciam negativamente na reatividade da cinza (MARTINERA HERNÁNDEZ et al, 2000).

Conforme Cordeiro et al., (2009) a queima do material em mufla com temperatura controlada de 600 °C é a melhor temperatura para obtenção de maior índice de atividade pozolânica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. No entanto a requeima da cinza bruta apenas se tornaria energeticamente viável se ela estivesse integrada no processo de produção do cimento, na produção do clínquer por exemplo, isso também é válido para o processo de moagem. Outra possibilidade seria se nas usinas ocorresse a queima do bagaço da cana sob temperatura controlada e que o resíduo fosse armazenado adequadamente para depois ser encaminhado para indústria cimenteira.

Nesse estudo foram caracterizadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e difração de Raio (DRX), quatro tipos de amostras da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (Figura 15), sendo elas:

- Cinza não moída;
- Cinza moída por 60 minutos;
- Cinza moída por 60 minutos e requeimada a 600 °C;
- Cinza moída por 60 minutos e requeimada a 1000 °C.



Figura 15 – Amostras analisadas via MEV, EDS e DRX da cinzas do bagaço da cana-de-açúcar.

A análise microestrutural é usada para explicar as principais propriedades dos materiais polifásicos, a partir de sua estrutura. Possíveis descontinuidades, tais como poros ou fissuras, interferem no comportamento mecânico e na durabilidade do material (SAVASTANO JR,1992, citado por PIMENTEL, 2004).

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um aparelho que permite a observação e a análise da superfície de amostras espessas através de imagens tridimensionais. Nele, basicamente, a imagem é formada pela captação dos sinais emitidos pela interação de um feixe de elétrons, gerado pelo equipamento, com a amostra analisada (DEDAVID, 2007).

A Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) é uma técnica analítica usada para a análise elementar ou caracterização química de uma amostra. Com a interação entre o feixe de elétrons e a amostra, são emitidos sinais os quais são detectados de forma a ser possível identificar o elemento constituinte, isso porque cada elemento tem sua estrutura atômica única, de modo que os raios X emitidos são característicos de cada estrutura (CHINAGLIA; CORREA, 1997).

A Difração de Raio (DRX) é usada para determinações da estrutura cristalina e do espaçamento interplanar. Um feixe de raios X direcionado sobre um material cristalino pode sofrer difração (interferência construtiva) como resultado da sua interação com uma série de planos atômicos paralelos. A lei de Bragg especifica a condição para a difração dos raios X, relacionando o comprimento de onda dos raios X e o espaçamento interatômico ao ângulo do feixe difratado. (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

O resultado é apresentado em um gráfico conhecido por difratograma, tendo como variáveis o ângulo e a intensidade dos picos difratados. Os picos de alta intensidade ocorrem quando a condição de difração de Bragg é satisfeita por algum conjunto de planos cristalográficos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Cada estrutura cristalina possui um padrão característico de difração. A interpretação do difratograma se faz com base em um banco de dados no qual é realizada comparações com os padrões produzidos por estruturas cristalinas já conhecidas e previamente analisadas.

Segundo Callister e Rethwisch (2012) os sólidos cristalinos estão posicionados segundo padrões ordenados e repetidos, que contrastam com a distribuição atômica e desordenada encontrada nos materiais não cristalinos ou amorfos, os quais carecem de um arranjo sistemático e regular dos átomos ou íons ao longo de distâncias interatômicas relativamente grandes.

O dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) pode existir tanto no estado amorfo quanto no estado cristalino. O fato de o sólido que se forma ser cristalino ou amorfo depende da facilidade pela qual uma estrutura atômica aleatória no estado líquido pode se transformar em um estado ordenado durante a solidificação. Portanto, os materiais amorfos são caracterizados por estruturas atômicas ou moleculares relativamente complexas e se tornam ordenados somente com alguma dificuldade (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

A Figura 16 mostra o equipamento de MEV/EDS sendo utilizado para análise das cinzas.

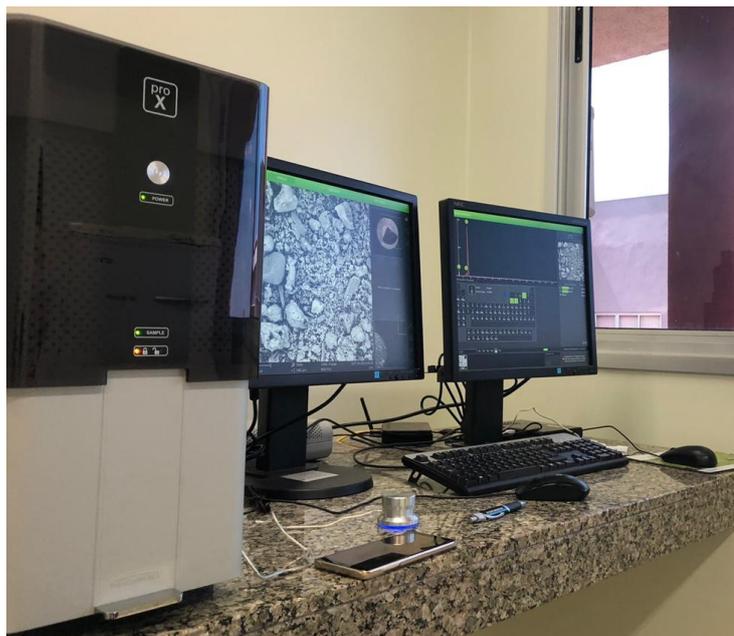


Figura 16 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) sendo utilizado para análise das cinzas.

### 5.6 - Produção dos concretos e moldagem dos corpos de prova

Pesquisadores já mostraram a relação direta entre cominuição, reatividade da cinza e melhores propriedades mecânicas (CORDEIRO, 2006; JAGADESH ET AL, 2018), nas pesquisas os teores de adição ou de substituição parcial do cimento por cinzas residuais se limitam geralmente a 30%, mas os melhores resultados são vistos em teores entre 7,5 a 20% (HARISH et al., 2010; ANTIOHOS et al, 2014.; GASTALDINI et al, 2014.; BIE et al, 2015.; VENKATANARAYANAN e RANGARAJU, 2015; HE et al, 2017.; ZAREEI et al., 2017; BERENQUER et al, 2018; RAJASEKAR et al, 2018).

Dessa forma, o presente estudo confeccionou corpos e prova com apenas a substituição do cimento Portland CP V-ARI pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar moída por 60 minutos nos teores de 5, 10, 15, 20% além de uma amostra para controle (sem cinza).

Os corpos de prova foram preparados no Laboratório de Engenharia de Produto e Processo (LEPP) com concreto convencional de traço de referência 1:2,1:2,92 (cimento:areia:brita) com relação água/cimento igual a 0,6 sem uso de aditivo. A substituição parcial do cimento pela cinza se deu em peso.

O traço de referência utilizado foi adaptado utilizando como base o Manual de traços de concreto do Engenheiro Gildásio Rodrigues da Silva, considerado referência na

área de dosagem de concretos. A Tabela 1 mostra as quantidades de cada material conforme o teor de substituição do cimento pela cinza.

Tabela 1 – Traço utilizado conforme teor de substituição da cinza pelo cimento.

<b>Cinza (kg)</b>	<b>Cimento (kg)</b>	<b>Areia (kg)</b>	<b>Brita 1 (kg)</b>	<b>Água (L)</b>
0	1	2,1	2,92	0,6
0,05	0,95	2,1	2,92	0,6
0,10	0,90	2,1	2,92	0,6
0,15	0,85	2,1	2,92	0,6
0,20	0,80	2,1	2,92	0,6

Na produção dos concretos, os materiais foram colocados na betoneira na seguinte ordem: metade da água, todo agregado graúdo, todo agregado miúdo, o cimento e a cinza moída por 60 minutos e por último o restante da água. Após todos os materiais adicionados, a betoneira permaneceu funcionando durante 4 minutos, até que o concreto estivesse totalmente homogeneizado.



Figura 17 – Materiais separados para confecção do concreto.



Figura 18 – Materiais sendo misturados na betoneira.

Após o preparo do concreto, realizou-se a moldagem dos corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm conforme ABNT NBR NM 5738/2015. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e permaneceram curando em solução saturada com cal até o momento de sua ruptura em prensa hidráulica.



Figura 19 – Equipamentos para realização do slum test e formas cilíndricas para moldagem dos corpos de prova.



Figura 20 – Corpos de prova após moldagem.



Figura 21 – Corpos de prova desenformados após 24 horas.



Figura 22 – Corpos de prova curando em solução saturada com cal.

## **5.7 - Ensaio nos concretos**

### **5.7.1 – Ensaio de consistência**

Após o preparo do concreto, realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test) conforme ABNT NBR NM 67/1998. Esse ensaio analisa a consistência, também chamada trabalhabilidade, do concreto, ou seja, se é um concreto mais seco ou mais fluido.

A trabalhabilidade é uma noção subjetiva, aproximadamente definida como o estado que oferece maior ou menor facilidade nas operações de manuseio com a argamassa e o concreto fresco (WALID, 2013).



Figura 23 – Ensaio de slump test sendo realizado.

#### 5.7.2 – Ensaio de resistência a compressão

O ensaio padrão de resistência a compressão ocorreu de acordo com as prescrições da ABNT NBR 5739/2018, para as idades recomendadas de 7, 28 e 91 dias. Para cada traço e idade, foram ensaiados 3 corpos de prova.

Após ser retirado da solução saturada com a cal, os corpos de prova foram levados para uma retífica (Figura 24) e posteriormente obtido, com uso de paquímetro, as suas dimensões. Em seguida o rompimento foi realizado em prensa hidráulica (Figura 25). Com esses dados foi possível determinar a resistência mecânica a compressão para os diferentes teores de substituição, obtendo-se também a média dos resultados, o desvio padrão e feita a avaliação do coeficiente de variação dos ensaios seguindo as recomendações da NBR 5739/2018 em seu anexo B.



Figura 24 – Preparo do corpo de prova para ensaio de compressão.



Figura 25 – Ensaio a compressão do corpo de prova na prensa hidráulica.

### 5.7.3 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Conforme ABNT NBR 9778/2005 a absorção de água por imersão é o processo no qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Também é definida como o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco.

O índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, e a massa específica seca é a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis (ABNT NBR 9778/2005).

Seguindo as prescrições da NBR 9778/2005 para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, foram moldados 3 corpos de prova (10x20cm) para cada teor de substituição. O processo de cura dos corpos de prova consistiu em 24h ao ar livre e 27 dias de cura imersos em água saturada com cal.

Após a cura os corpos de prova foram levados para estufa durante 72 horas à uma temperatura de  $100 \pm 5$  °C para a secagem e posterior determinação da massa da amostra seca. Depois os corpos de prova foram imersos em água por 72 horas e ao final fervidos durante 5 horas para posterior determinação, utilizando balança hidrostática, da massa saturada imersa. Por último foi retirado o excesso de água do corpo de prova e pesado novamente para determinação do valor da massa saturada. Com esses dados foi possível determinar a taxa de absorção, o índice de vazios e massa específica para os diferentes teores de substituição. Também foi calculado a média e o desvio padrão dos ensaios.



Figura 26 – Corpo de prova imerso em água por 72 horas.



Figura 27 – Corpo de prova em ensaio de fervura por 5 horas.

## 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 - Materiais constituintes do concreto

#### 6.1.1 - Areia

Os ensaios realizados na areia, mostraram que a mesma apresenta massa específica de  $2,63 \text{ g/cm}^3$ , com diâmetro máximo característico 2,4 mm e módulo de finura de 2,28. A Figura 28 apresenta sua curva granulométrica, ilustrando também os limites que devem ser atendidos das zonas granulométricas estabelecidos pela NBR 7211/2009.

Verificou-se que com a redução da abertura das peneiras ocorre o aumento acentuado da porcentagem de material retido. A curva granulométrica varia entre as zonas ótimas e utilizáveis, indicando que a areia é adequada para ser empregada na fabricação de concretos. A dimensão dos grãos compreende principalmente entre 0,3 a 1,2 mm, de forma que podemos classificar o agregado como uma areia média.

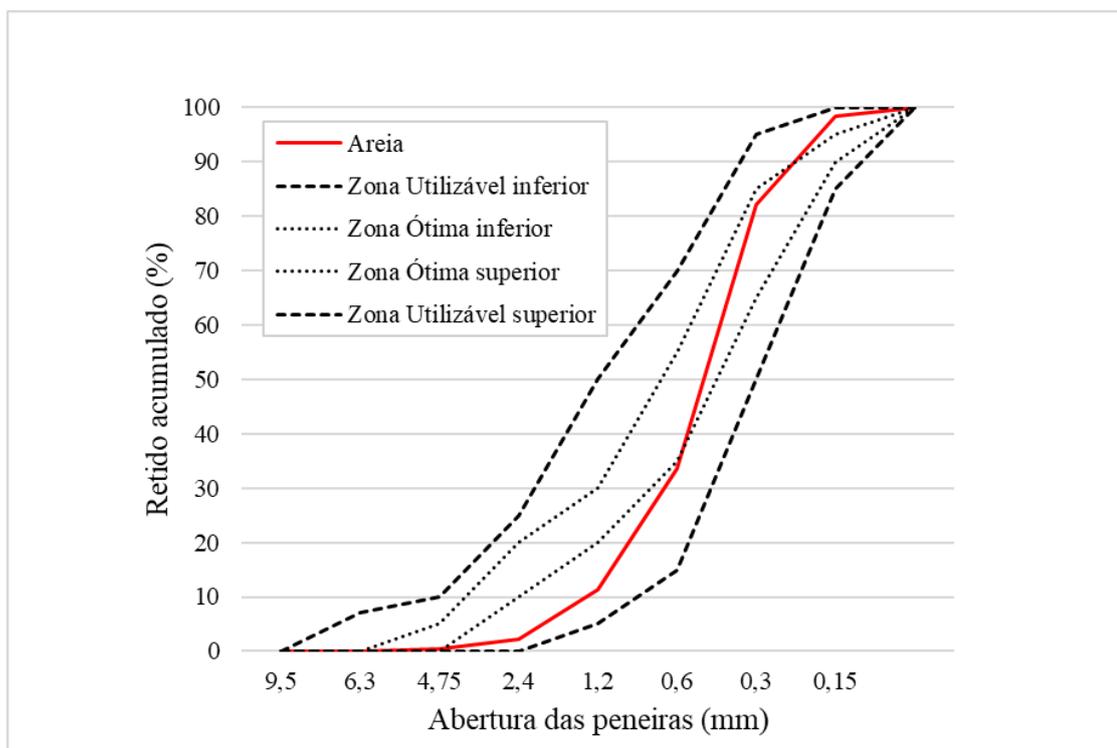


Figura 28 – Gráfico da curva granulométrica da areia.

#### 6.1.2 - Brita

Os ensaios realizados na brita, resultaram em valores de massa específica 2,88 g/cm<sup>3</sup> e diâmetro máximo característico 19 mm. A Figura 29 apresenta a curva granulométrica da brita ilustrando também os limites estabelecidos pela NBR 7211/2009 para zona granulométrica 9,5/25 a qual se mostrou ser a mais próxima do agregado utilizado, de forma a ser considerado adequado sua utilização para produção dos concretos. Como a dimensão dos grãos varia principalmente entre 9,5 mm a 19 mm, podemos classificar o agregado como brita 1.

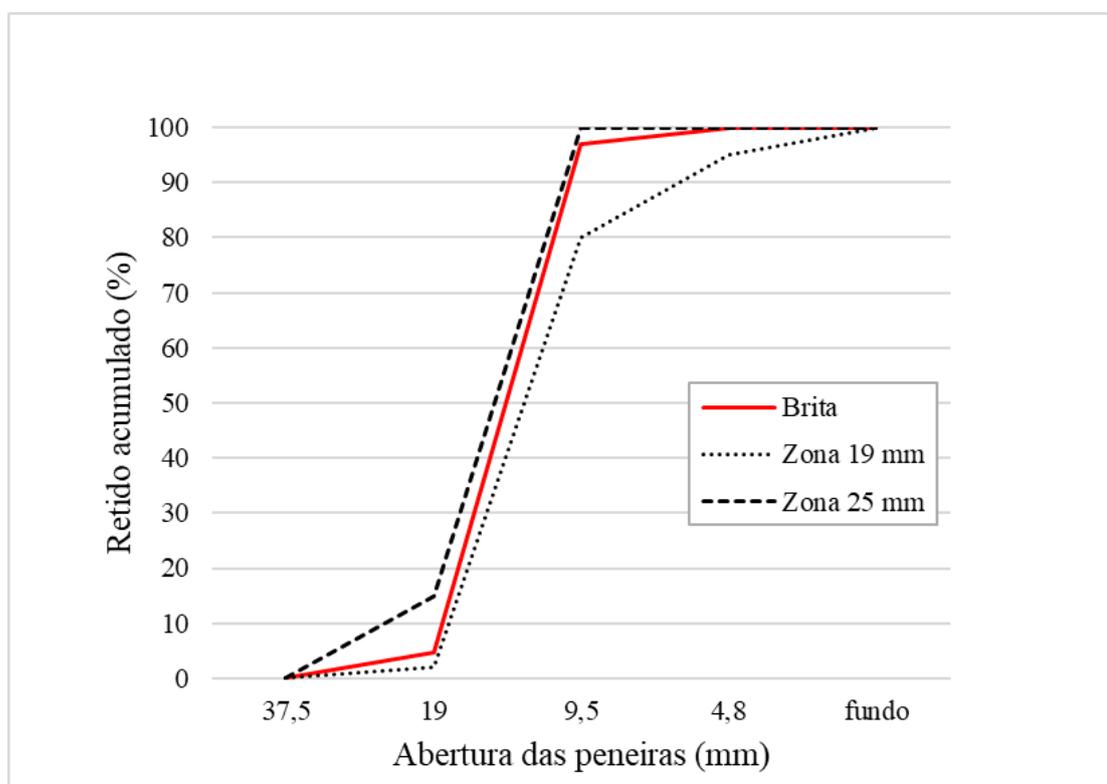


Figura 29 – Gráfico da curva granulométrica da brita.

### 6.1.3 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Conforme ensaios, a cinza bruta (como coletada nos arredores da Usina Bunge em Dourados – MS) apresenta alto teor de umidade, 53,99% com desvio padrão 1,05 e após tratamento de secagem e peneiramento, ela apresenta massa específica de 1,89 g/cm<sup>3</sup>.

Conforme os tempos de moagem de 0, 30 e 60 minutos a Tabela 2 mostra os resultados dos módulos de finura e as porcentagens de material fino que passa na peneira #200 (75 µm) por lavagem e a Figura 30 exhibe as curvas granulométricas das cinzas.

Tabela 2 – Resultados obtidos no estudo de moagem na cinza.

Tempo de moagem (min.)	Módulo de finura	Material mais fino que 75 $\mu\text{m}$ (#200)
0	0,28	54,71%
30	0,60	61,90%
60	0,78	76,81%

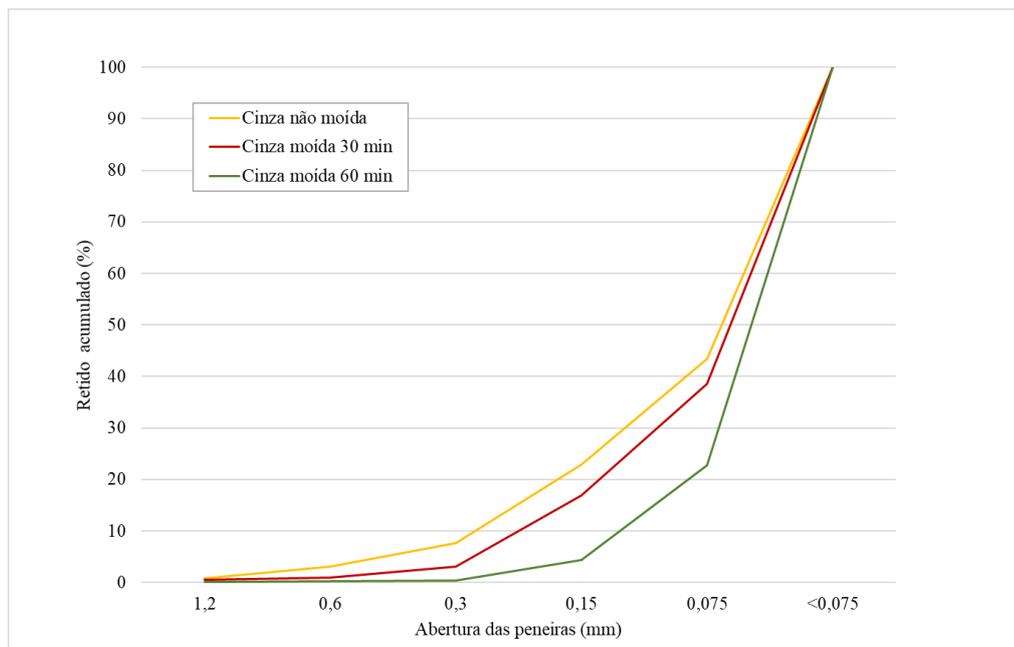


Figura 30 – Gráfico das curvas granulométricas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

A partir da Tabela 2 e do gráfico da Figura 30 foi possível perceber que com o aumento do tempo de moagem ocorre a redução mais acentuada de material retido nas peneiras de aberturas de 0,15mm e 0,075mm.

A Figura 31 apresenta o gráfico da curva granulométrica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar moída por 60 minutos e a curva de distribuição granulométrica do cimento Portland CPV-ARI, obtida através de ensaio de granulometria a laser no estudo de Hoppe Filho (2017). Podemos perceber que mesmo depois de realizada a moagem por 60 minutos, a cinza não conseguiu atingir a mesma ordem de granulometria que o cimento.

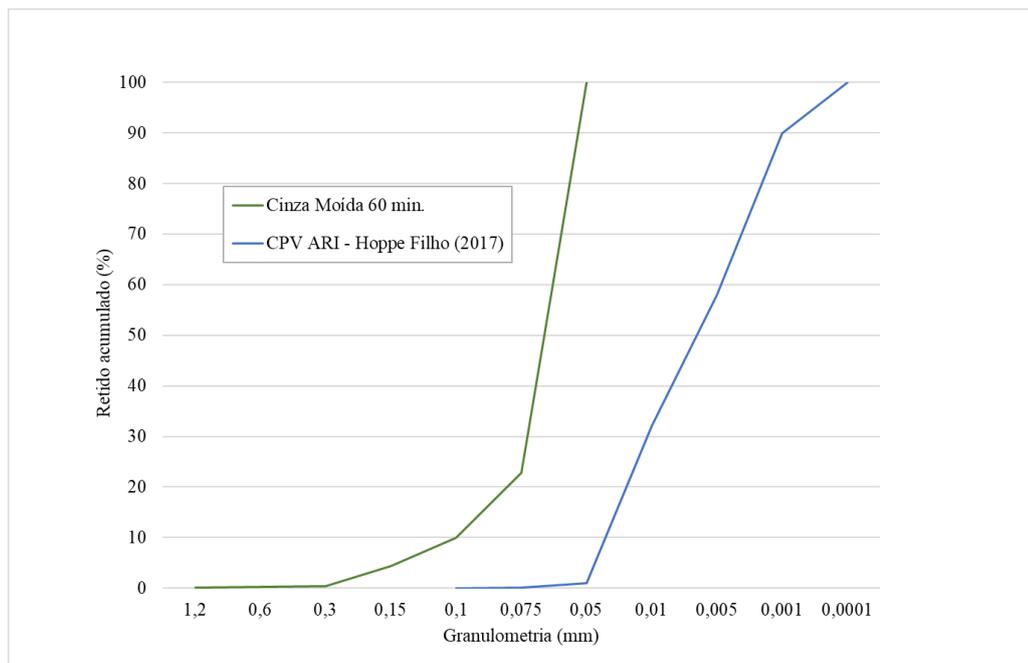


Figura 31 – Gráfico da curva granulométrica da cinza do bagaço da cana e do cimento CPV-ARI.

A atividade pozolânica da cinza do bagaço da cana é muito influenciada pelo tamanho da partícula, quanto menor o tamanho da partícula, maior será a área de superfície e maior será a reatividade da cinza com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento (YADAV, 2019).

A NBR 12653/2014 a qual trata dos requisitos químicos e físicos para classificação de um material como pozolana traz como um dos requisitos físicos, que o material apresente menos de 20% de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$ , visando uma maior reatividade do material. No entanto, estudos anteriores (Chusilp et al., (2009); Pereira et al., (2015); Bahurudeen et al., (2005); Cordeiro et al., (2016); Rajasekar et al., (2018)) mostraram que concretos com teores em até 20% de cinza resultam em materiais com propriedades mecânicas semelhantes ao concreto convencional mesmo a cinza estando fora desse limite granulométrico para ser classificada como pozolana.

A cinza moída durante 60 minutos apresentou perda ao fogo de 12,48% superando o limite de 6% estabelecido pela NBR 12653/2014. No entanto, vale ressaltar que a pesquisa não busca classificar a cinza como pozolana, mas sim, caracterizar a mesma e avaliar seu emprego como substituinte parcial do cimento Portland em compostos cimentícios mesmo que ela não possa, por norma, ser classificada como pozolana e utilizada durante a fabricação de cimentos com adição de material pozolânico.

A partir dos ensaios de MEV foram obtidas as imagens apresentadas nas Figuras 32, 34, 36 e 38. Com relação à sua micromorfologia, nota-se que a cinza, sem moer e moída por 60 minutos, apresenta partículas com formas e tamanhos bastante variados, com algumas estruturas de arestas bem definidas e a superfície apresenta certa rugosidade. Além disso, é possível perceber redução na granulometria da cinza, resultado do processo de moagem por 60 minutos. Quando é requeimada a 600°C e a 1000 °C ocorre perda de matéria orgânica e a cinza começa a apresentar aumento de elementos pontiagudos indicando possível cristalinidade.

Durante o ensaio de MEV foi realizado em alguns pontos o ensaio de EDS, sendo identificados diversos elementos químicos presentes nas amostras de cinza, como a própria sílica e alumina, óxidos de cálcio, assim como a presença de elementos minoritários como óxidos de ferro, magnésio, titânio, fósforo, enxofre e a presença de carbono. As Figuras 33, 35, 37 e 39 apresentam os difratogramas obtidos com relação ao ponto analisado da amostra.

A amostra moída e a não moída apresentam a mesma composição, porém, quando a cinza passa por processo de requeima, tanto em 600 °C quanto em 1000 °C, não foi mais detectado pelo aparelho a presença de carbono.

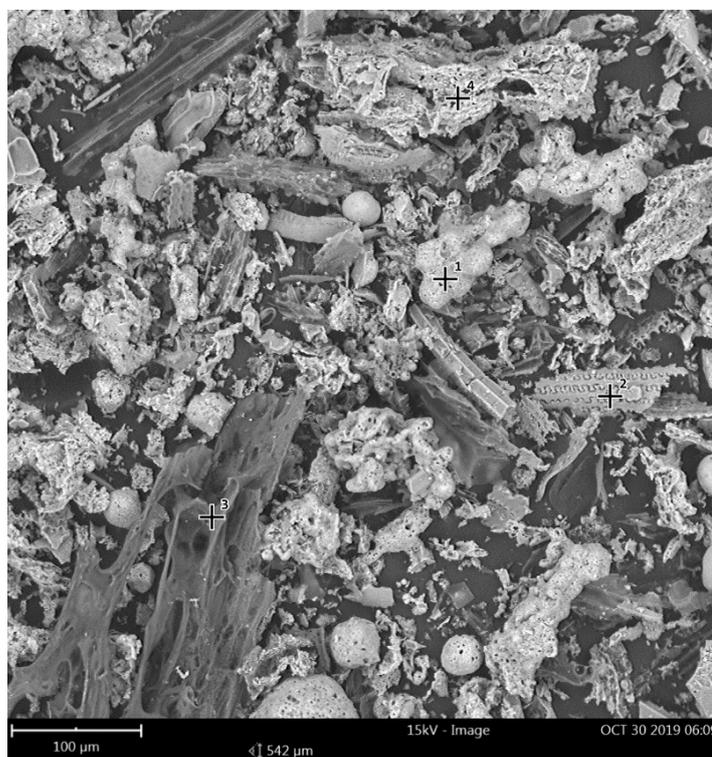


Figura 32 – Cinza não moída zoom de 500X obtida no ensaio de MEV.

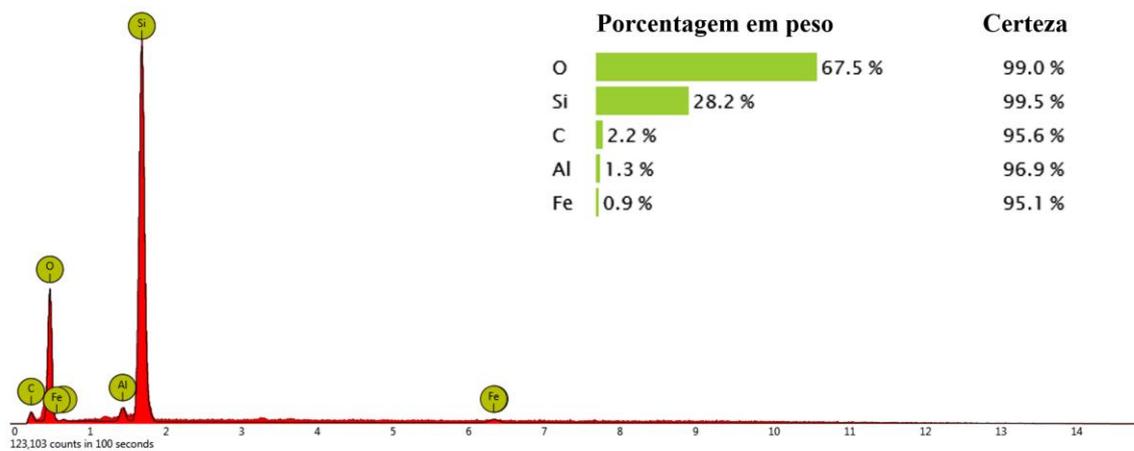


Figura 33 – Ensaio de EDS realizado no ponto 2 da figura 32.

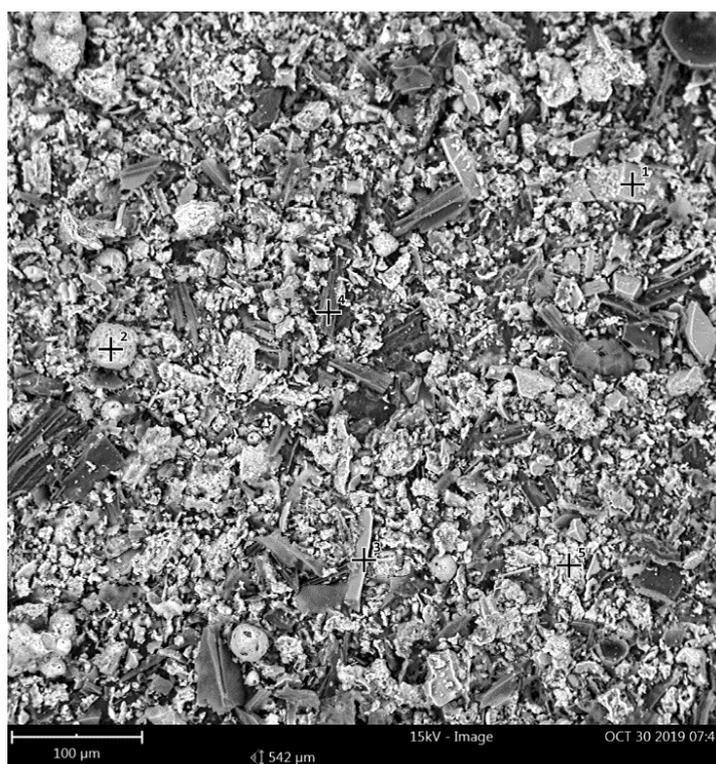


Figura 34 – Cinza moída 60min zoom 500X obtida no ensaio de MEV.

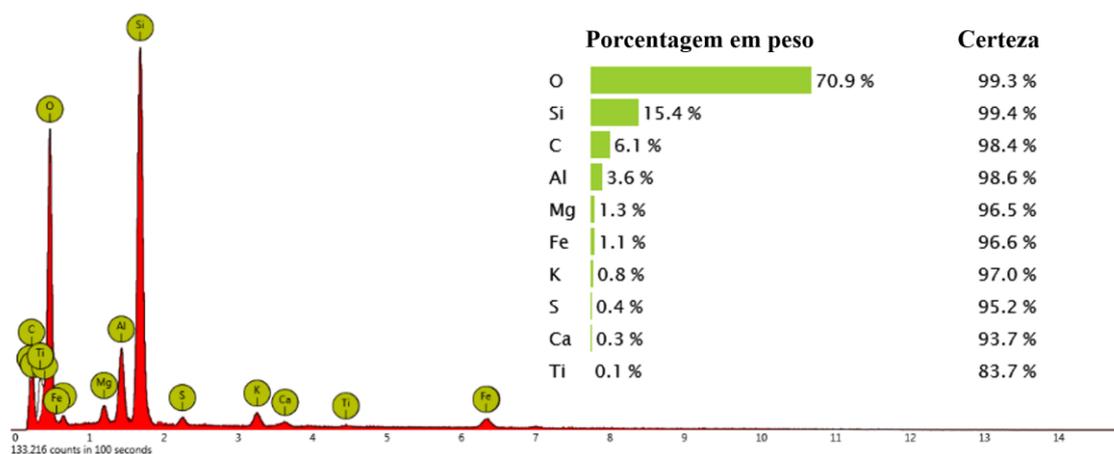


Figura 35 – Ensaio de EDS realizado no ponto 3 da figura 34.

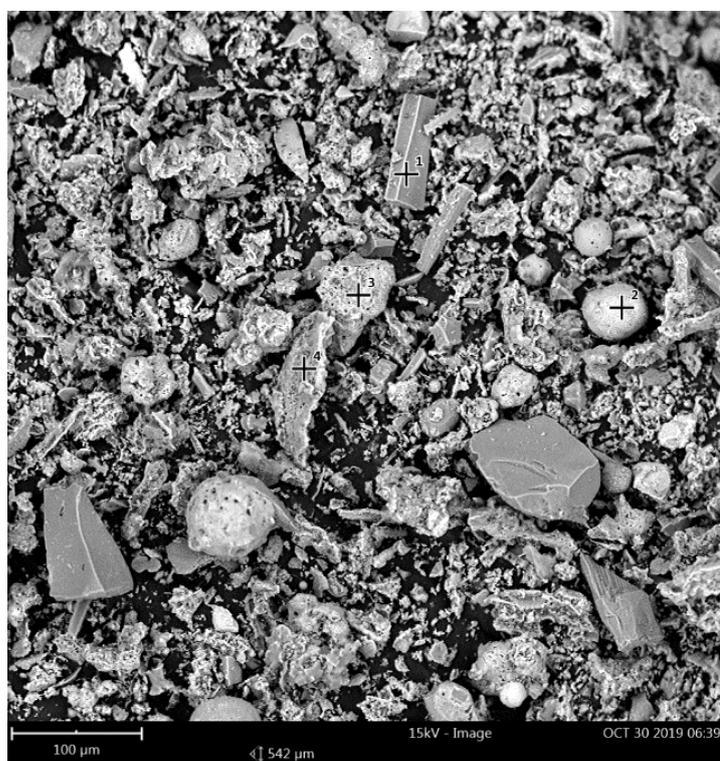


Figura 36 – Cinza moída 60 min e requeimada a 600 °C zoom 500X obtida no ensaio de MEV.

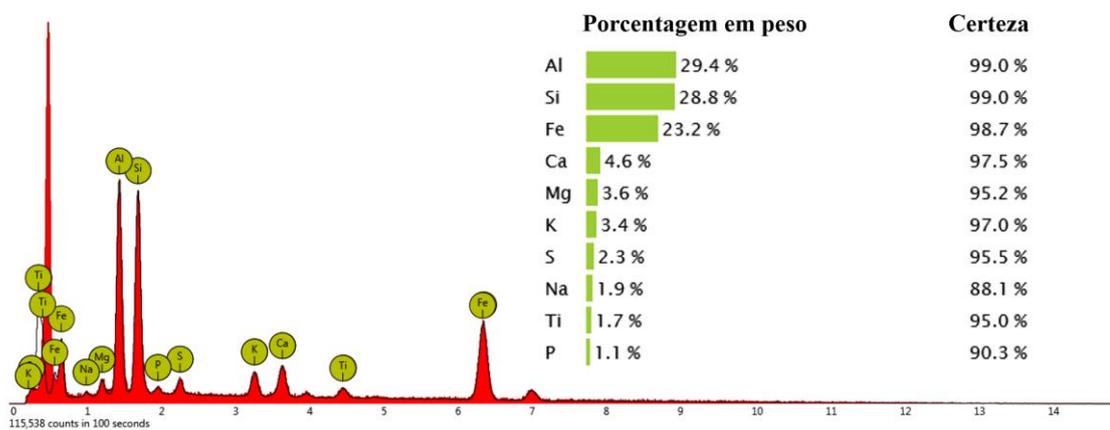


Figura 37 – Ensaio de EDS realizado no ponto 2 da figura 36.

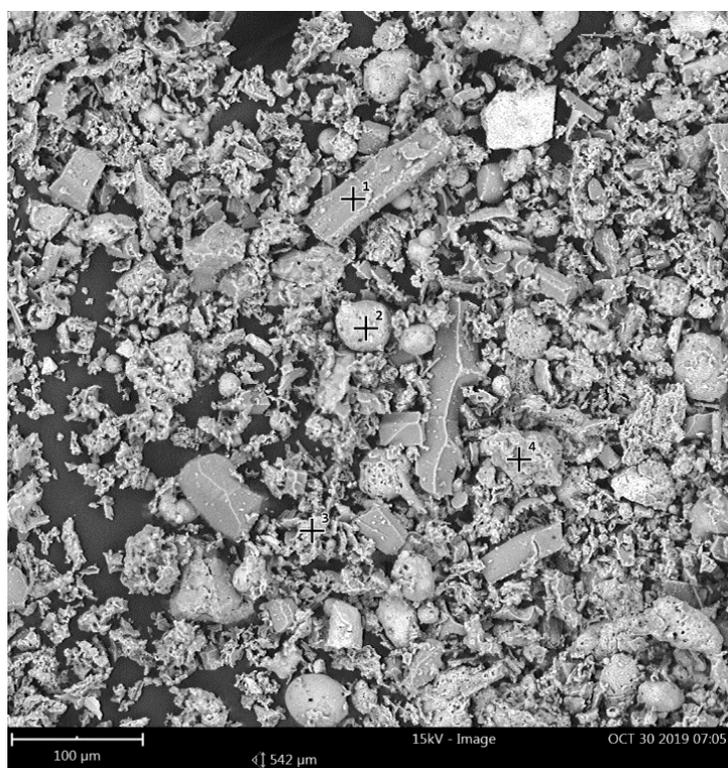


Figura 38 – Cinza moída 60 min e requemada a 1000 °C zoom 500X obtida no ensaio de MEV.

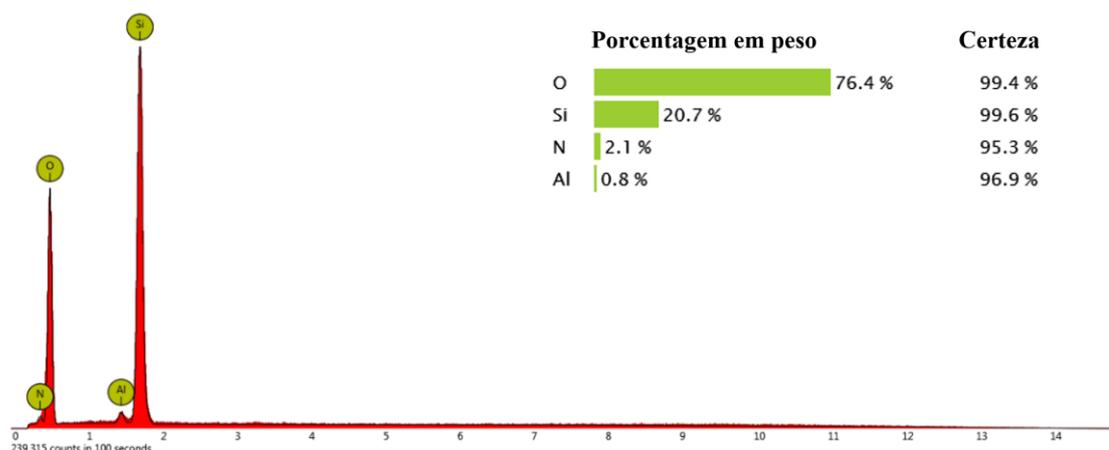


Figura 39 – Ensaio de EDS realizado no ponto 1 da figura 38.

Os resultados obtidos no ensaio de DRX são apresentados nos difratogramas das Figuras 40, 41, 42 e 43. Percebe-se que a cinza que não passa pela requeima possui composição praticamente amorfa enquanto que quando é realizada requeima à 600 °C a mesma começa a apresentar alguns picos, indicando que a cinza começa seu processo de cristalização e aos 1000 °C ela já apresenta picos mais bem definidos confirmando a cristalinidade da amostra.

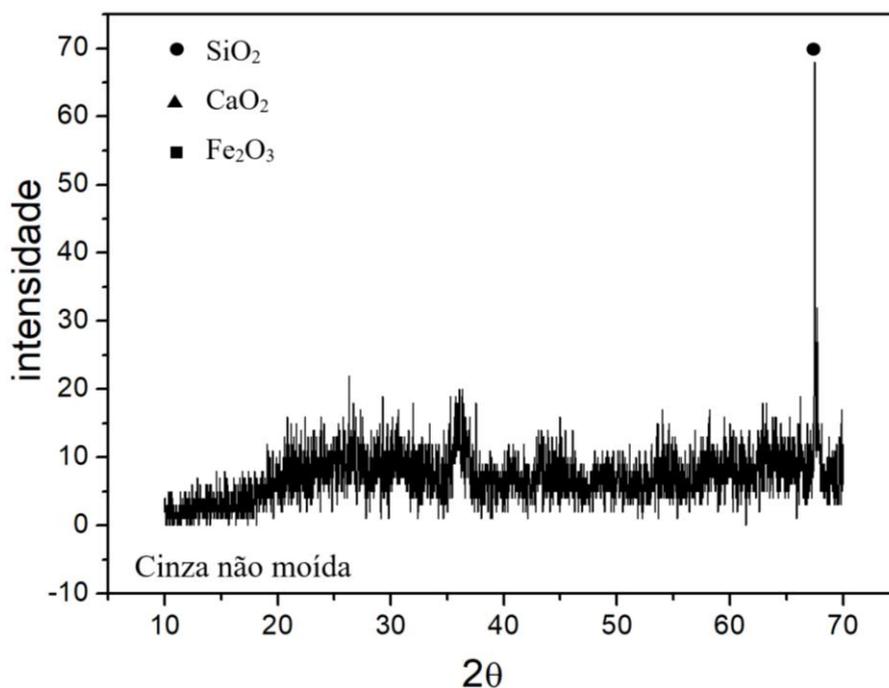


Figura 40 – Difratograma de raios X da amostra de cinza não moída destacando a fase  $\text{SiO}_2$  (85-796).

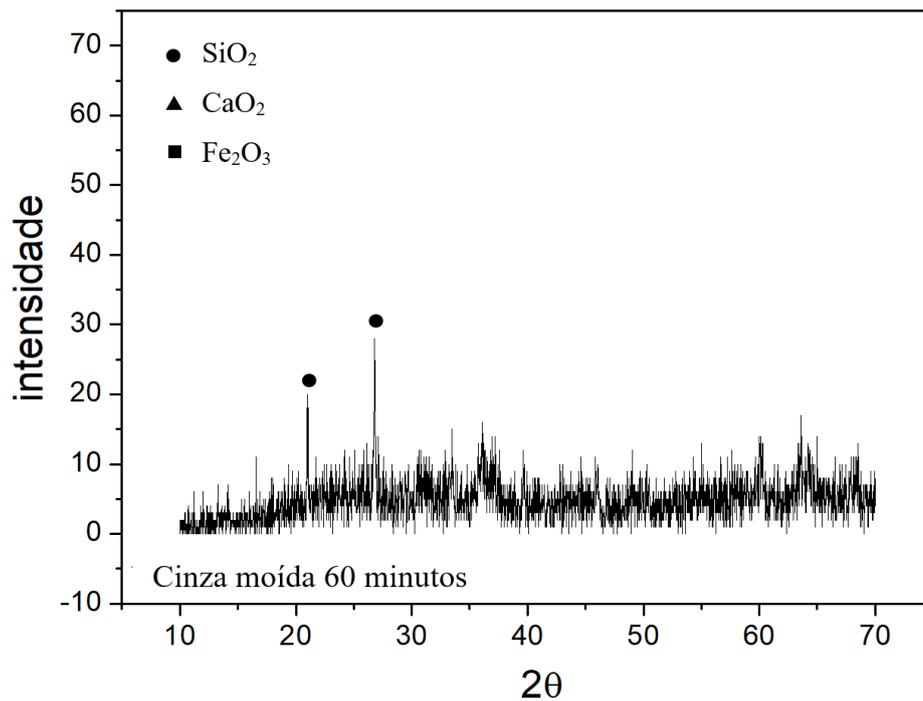


Figura 41 – Difratoograma de raios X da amostra de cinza moída 60 minutos destacando a fase  $\text{SiO}_2$  (85-796).

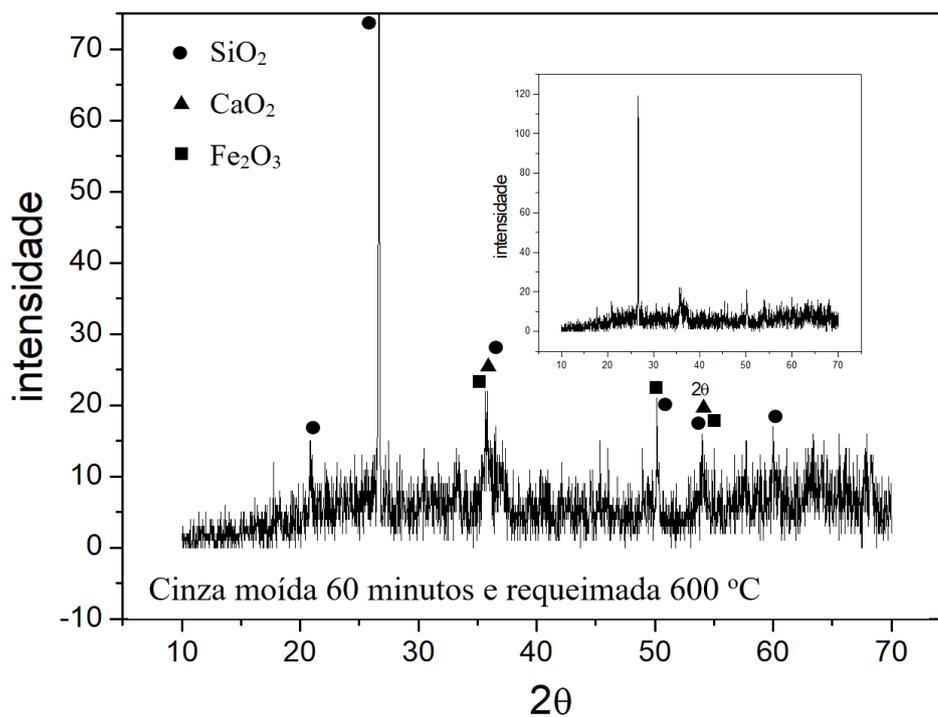


Figura 42 – Difratoograma de raios X da amostra de cinza moída e requeimada a  $600^\circ\text{C}$  mostrando uma mistura de fases destacando  $\text{SiO}_2$  (85-796),  $\text{CaO}$  (48-1467) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (86-230).

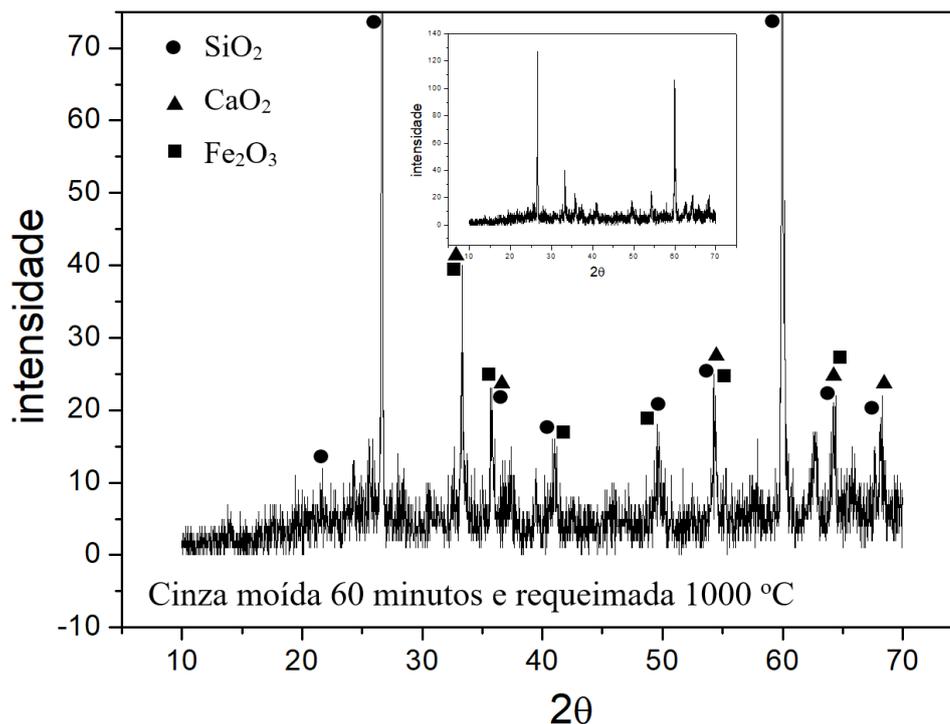


Figura 43 – Difratoograma de raios X da amostra de cinza moída e requeimada a 1000°C mostrando uma mistura de fases destacando SiO<sub>2</sub> (85-796), CaO (48-1467) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (86-230).

Na Tabela 3 são apresentadas as fases cristalinas encontradas nas amostras da cinza do bagaço da cana-de-açúcar por meio da difração de raios X sendo possível verificar a presença de quartzo, cal, hematita, e outros compostos como alumina, magnésia e caulim.

Tabela 3 – Fases cristalinas encontradas na amostra de Cinza do bagaço da cana por análise de difração de raios X.

<b>Código de Referência</b>	<b>Mineral</b>	<b>Nome do Composto</b>	<b>Fórmula Química</b>
85-796	Quartzo	Óxido de Silício	SiO <sub>2</sub>
48-1467	Cal	Óxido de Cálcio	CaO
86-230	Hematita	Óxido de Ferro II	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
23-10009	Alumina	Óxido de Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
76-1363	Magnésia	Óxido de Magnésio	MgO <sub>2</sub>
15-890	Caulim	Hidróxido de Potássio	KOH

## 6.2 - Concretos

### 6.2.1 – Consistência do concreto

Os valores dos abatimentos são apresentados na Tabela 4. Conforme o aumento no teor de adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar há redução no slump do concreto, ou seja, na sua consistência, de forma que para manter um mesmo slump seriam necessárias alterações na relação água/cimento ou o uso de aditivo plastificante.

Entretanto, todos os concretos ficaram dentro da classe de consistência S100, com abatimento maior ou igual a 100 mm e menor que 160 mm cujas aplicações típicas são para elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto conforme ABNT NBR 8953/2015.

Tabela 4 – Resultados obtidos no slump test conforme teor de cinza no concreto.

<b>Teor de cinza (%)</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
0	155
5	135
10	120
15	110
20	100

Conforme a pesquisa de revisão de Yadav et al (2019) foi verificado que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar requer 17 a 24% de água a mais do que o cimento. Assim como, estudos envolvendo a cinza da casca de arroz também concluíram que ocorre um aumento na demanda de água quando a cinza é utilizada no concreto. Estes estudos atribuem essa característica a vários fatores, como por exemplo a estrutura celular da cinza (Zain et al., 2011), sua elevada área superficial e a natureza hidrofílica da mesma. (Antiohos et al., 2014).

#### 6.2.2 - Resistência a compressão

No Quadro 3 são apresentadas, conforme o teor de substituição do cimento Portland pela cinza do bagaço da cana, a resistência mecânica a compressão de cada corpo de prova, a resistência média para cada traço, desvio padrão, coeficiente de variação do ensaio e sua avaliação.

Quadro 3 – Resistência mecânica a compressão conforme teor de cinza para as idades de 7, 28 e 91 dias.

Resistência a compressão (MPa)				
Traço do concreto		Idade de rompimento		
		7 dias	28 dias	91 dias
Referência	CP1	27,98	34,65	36,35
	CP2	27,46	32,80	37,77
	CP3	27,39	32,30	36,91
	<b>Resistência média</b>	<b>27,61</b>	<b>33,25</b>	<b>37,01</b>
	<b>Desvio padrão</b>	0,32	1,24	0,72
	<b>Coef. de variação (CV)</b>	1,17	3,72	1,93
	<b>Avaliação do CV</b>	Excelente	Muito bom	Excelente
5%	CP1	31,25	34,81	38,40
	CP2	29,64	34,43	37,03
	CP3	30,49	32,25	36,53
	<b>Resistência média</b>	<b>30,46</b>	<b>33,83</b>	<b>37,32</b>
	<b>Desvio padrão</b>	0,81	1,38	0,97
	<b>Coef. de variação (CV)</b>	2,64	4,08	2,59
	<b>Avaliação do CV</b>	Excelente	Bom	Excelente
10%	CP1	30,24	33,69	40,03
	CP2	28,19	35,56	37,44
	CP3	27,97	33,05	37,91
	<b>Resistência média</b>	<b>28,80</b>	<b>34,10</b>	<b>38,46</b>
	<b>Desvio padrão</b>	1,25	1,30	1,38
	<b>Coef. de variação (CV)</b>	4,35	3,82	3,59
	<b>Avaliação do CV</b>	Bom	Muito bom	Muito bom
15%	CP1	24,82	33,26	33,30
	CP2	26,12	32,47	35,27
	CP3	27,00	32,55	34,75
	<b>Resistência média</b>	<b>25,98</b>	<b>32,76</b>	<b>34,44</b>
	<b>Desvio padrão</b>	1,10	0,43	1,02
	<b>Coef. de variação (CV)</b>	4,22	1,33	2,96
	<b>Avaliação do CV</b>	Bom	Excelente	Excelente
20%	CP1	23,88	28,79	33,11
	CP2	26,24	30,42	31,70
	CP3	24,79	28,69	33,17
	<b>Resistência média</b>	<b>24,97</b>	<b>29,30</b>	<b>32,66</b>
	<b>Desvio padrão</b>	1,19	0,97	0,83
	<b>Coef. de variação (CV)</b>	4,77	3,31	2,55
	<b>Avaliação do CV</b>	Bom	Muito bom	Excelente

A partir do Quadro 3 foram produzidos os gráficos apresentados nas Figuras 44, 45 e 46 conforme teor de cinza e idade do concreto.

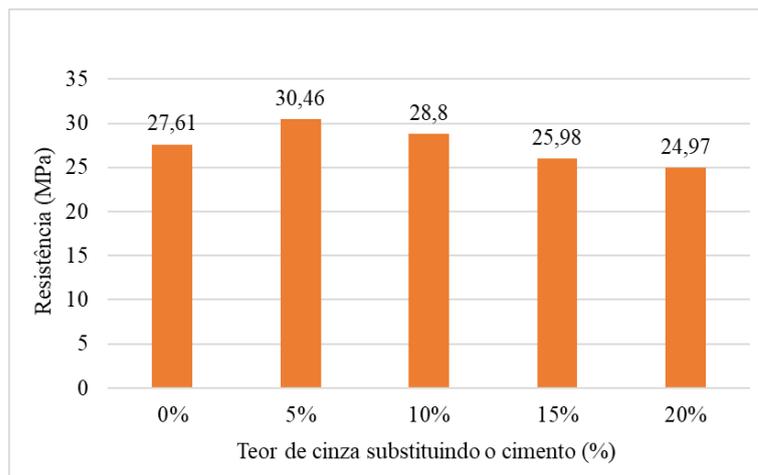


Figura 44 – Resistência a compressão aos 7 dias conforme teor de cinza.

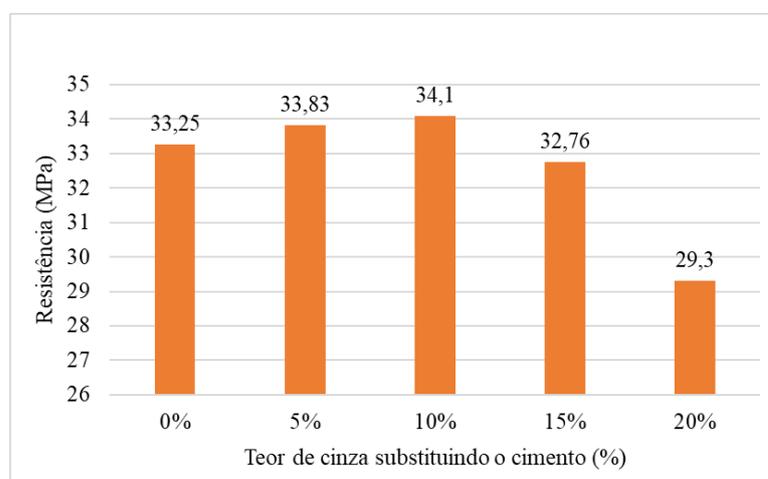


Figura 45 – Resistência a compressão aos 28 dias conforme teor de cinza.

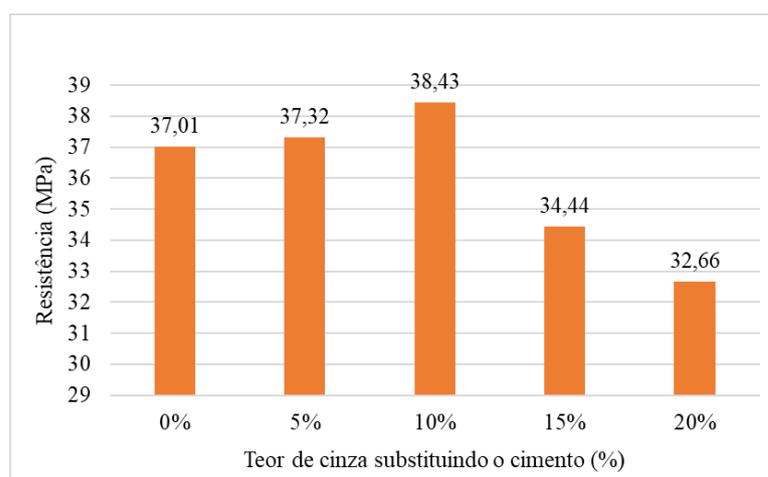


Figura 46 – Resistência a compressão aos 91 dias conforme teor de cinza.

Aos 7 dias, a substituição em até 10% de cimento pela cinza no concreto apresenta resistência superior ao concreto de referência. Esse ganho foi de aproximadamente 10,3%

para o traço com 5% de substituição e de 4,3% para o traço com 10%. Já para os teores de adição maiores que 10% houve redução na resistência a compressão, essa diminuição foi de 6% para o traço com 15% de substituição e de 9,6% para o traço com 20%.

Aos 28 dias essa diferença no ganho da resistência a compressão dos concretos com teores de substituição de 5% e 10% diminuiu, caindo para aproximadamente 1,7% para o traço de 5% e 2,6% para o traço com 10%. Para os teores de substituição de 15% a redução na resistência a compressão foi de 1,5% e para o traço com 20% a redução foi igual a 11,9%.

Quando atinge os 91 dias a resistência dos concretos com substituição em até 10% do cimento pela cinza continua apresentando melhores resultados que o concreto de referência. O concreto com 5% de substituição teve resistência praticamente equivalente com o traço de referência, tendo um aumento de apenas 0,83%, enquanto isso o concreto com 10% de substituição teve um aumento de 3,83%. Já os traços com teores de substituição de 15% e 20% tiveram uma queda na resistência de 6,94% e 11,75% respectivamente.

Estudos anteriores sobre incorporação da cinza do bagaço da cana no concreto também constataram que as propriedades mecânicas dos corpos de prova foram melhoradas até um determinado nível de substituição (GANESAN et al., 2007).

### 6.2.3 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica

De acordo com Rezende (2016), a redução do consumo de cimento com o uso de adições minerais, em estruturas com grandes volumes de concreto, é extremamente vantajosa, pois reduz o aumento da temperatura minimizando a retração térmica; melhora a trabalhabilidade, reduzindo a demanda de água e possui menor absorção de água, devido a menor porosidade, dificultando a entrada de agentes agressivos ao concreto.

No Quadro 4 são apresentados os resultados da taxa de absorção de água, índice de vazios, massa específica da amostra seca, o valor da média para cada traço e o desvio padrão do ensaio.

Quadro 4 – Resultados de absorção, índice de vazios e massa específica seca no concreto conforme teor de substituição do cimento pela cinza nos concretos.

Traço do concreto		Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica da amostra seca (g/cm <sup>3</sup> )
Referência	CP1	6,26	12,50	2,00
	CP2	5,97	12,79	2,07
	CP3	6,07	11,55	1,96
	<b>Média</b>	<b>6,10</b>	<b>12,28</b>	<b>2,01</b>
	<b>Desvio padrão</b>	0,15	0,65	0,06
5%	CP1	5,17	10,27	1,95
	CP2	4,98	11,7	2
	CP3	5,46	12,9	1,96
	<b>Média</b>	<b>5,20</b>	<b>12,00</b>	<b>1,97</b>
	<b>Desvio padrão</b>	0,24	1,40	0,03
10%	CP1	6,01	11,44	1,91
	CP2	6,27	12,06	1,90
	CP3	5,12	11,93	1,90
	<b>Média</b>	<b>5,80</b>	<b>11,81</b>	<b>1,90</b>
	<b>Desvio padrão</b>	0,60	0,33	0,01
15%	CP1	5,96	11,52	1,84
	CP2	5,72	10,90	1,90
	CP3	6,41	11,99	1,87
	<b>Média</b>	<b>6,03</b>	<b>11,47</b>	<b>1,87</b>
	<b>Desvio padrão</b>	0,35	0,55	0,03
20%	CP1	6,26	11,77	1,89
	CP2	5,98	10,88	1,82
	CP3	6,27	11,31	1,87
	<b>Média</b>	<b>6,17</b>	<b>11,32</b>	<b>1,86</b>
	<b>Desvio padrão</b>	0,16	0,45	0,04

A partir da Quadro 4 foram produzidos os gráficos das Figuras 47, 48 e 49.

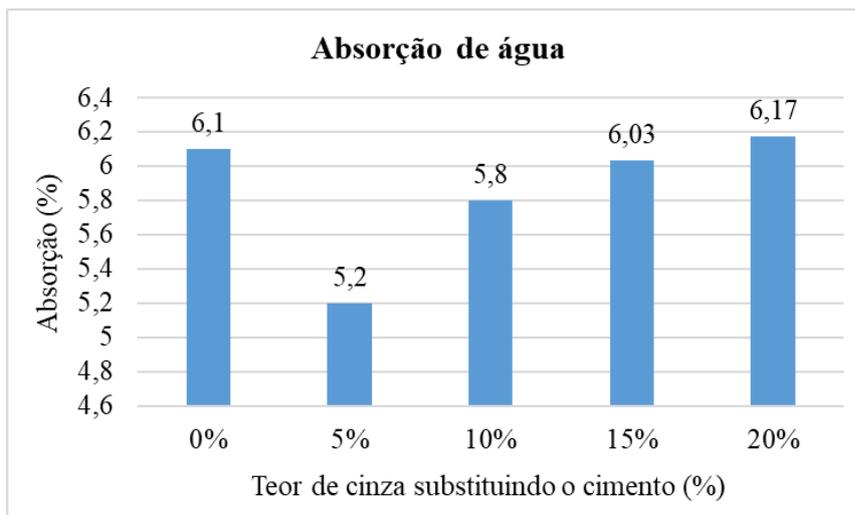


Figura 47 – Absorção conforme teor de cinza.

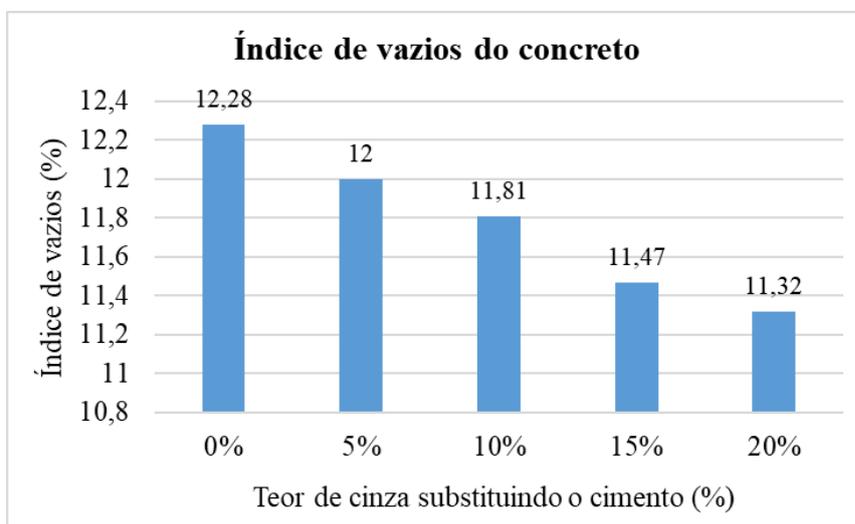


Figura 48 – Índice de vazios do concreto conforme teor de cinza.

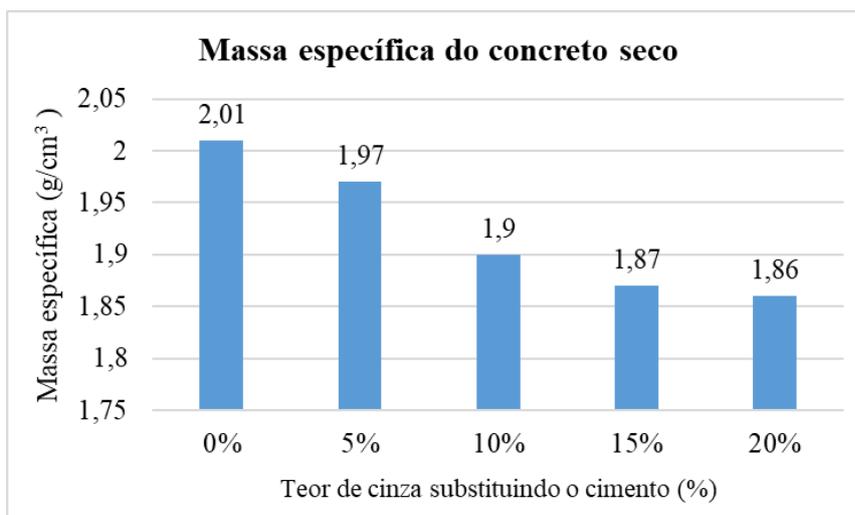


Figura 49 – Massa específica seca do concreto conforme teor de cinza.

Os resultados referentes as taxas de absorção, revelaram que, teores até 15% de cinza faz com que o concreto apresente menor absorção quando comparado com a amostra de referência. Com a substituição de 5% do cimento pela cinza o concreto produzido reduziu sua taxa de absorção em 14,8%, o traço de 10% apresentou redução de 4,9% na absorção e o traço com 15% uma pequena redução de 1,2%. Já para o traço com 20%, ocorreu pequeno aumento na taxa de absorção do concreto em 1,2%.

Diante dos dados apresentados quanto ao índice de vazios, fica evidente que há uma relação entre a quantidade de material substituído e a porosidade da amostra. Nota-se que quanto maior o teor de cinza do bagaço da cana-de-açúcar no concreto, menor o índice de vazios. Isso mostra, portanto, a boa capacidade de preenchimento de poros que a cinza proporciona, conferindo ao material maior durabilidade frente a agentes agressivos capazes de penetrar nos poros do concreto. Joshaghani et al., (2016) e Lima et al., (2011) também puderam comprovar melhora na durabilidade do concreto com o uso da cinza do bagaço da cana.

Ao analisar os resultados da massa específica seca, é possível perceber que quanto maior o teor de cinza, mais leve fica o concreto. Propriedade essa muito relevante, visto que no concreto armado, a maior parte da armadura tem por função apenas sustentar o peso próprio da estrutura. Logo um concreto mais leve pode gerar economia de custos com aço no concreto armado.

## 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a crescente discussão dos impactos ambientais gerados pela indústria e a grande produção anual do resíduo do bagaço da cana-de-açúcar, que normalmente é simplesmente descartado no ambiente, esse trabalho fez a caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar gerada em uma Usina em Dourados – MS. Avaliou a resistência mecânica a compressão e a durabilidade do concreto confeccionado com a substituição parcial do cimento Portland pela cinza em teores variando até 20%.

A cinza analisada possui grande potencial para o uso em compostos cimentícios, foi verificado que apesar da mesma estar armazenada a céu aberto, com a realização de tratamentos simples de secagem e moagem é possível transformar o resíduo da queima do bagaço da cana-de-açúcar em um material apropriado para o uso em compostos cimentícios, funcionando como um substituto parcial do cimento Portland.

Observou-se através dos ensaios de EDS e DRX (na cinza em estudo) a presença de sílica em estado amorfo o que a torna capaz de reagir com os produtos resultantes do processo de hidratação do cimento, além de funcionar também como um agente de enchimento no concreto (efeito *filler*), fortalecendo o empacotamento entre os constituintes do concreto e contribuindo para a durabilidade, tendo em vista que um material menos poroso dificulta a penetração de agentes agressivos.

Percebeu-se que o concreto produzido com a cinza necessita de um maior teor de água ou uso de aditivo plastificante para manter a mesma consistência que o concreto sem a cinza. Porém ainda assim todos os concretos analisados ficaram dentro da classe de consistência cujas aplicações típicas são para elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto.

Com relação as propriedades relativas à resistência e durabilidade, os corpos de prova com até 10% de substituição parcial do cimento pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresentaram os melhores resultados. Nesses teores, nas primeiras idades, aos 28 e aos 91 dias o uso da cinza proporcionou um material com maior resistência mecânica aos esforços de compressão, menor taxa de absorção de água, menor porosidade e também mais leve comparado com o concreto de referência.

Assim, a utilização das cinzas geradas nas indústrias de álcool e açúcar, pode agregar valores de reciclagem, pela reutilização desse resíduo que é até então descartado no ambiente e contribuir para a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> pela indústria cimenteira,

trazendo benefícios ambientais e econômicos. Para isso, no entanto, é necessário que haja investimento de capital em instalações para que seja realizado o tratamento das cinzas ou que haja uma parceria entre usina e indústria cimenteira, a fim de viabilizar o uso desse resíduo na fabricação do cimento Portland.

## 8 - BIBLIOGRAFIA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 201 Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201**. ACI Materials Journal. 2008.

ANDREOLLI, C. **Convergência de Agricultura e Energia: I. Produção de Biomassa Celulósica para Biocombustíveis e Eletricidade**. Economia & Energia. Ano XI – N° 66, 2008.

ANTIOHOS, S. K.; PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S. **Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness**. Cem. Concr. Res. 61–62, 20–27. 2014.

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

ASHBY, M. F. **Materials and Sustainable Development**. Ed. Elsevier, 312p. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 18/2012: Cimento Portland – Análise química - Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 24/2002: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46/2003: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52/2009: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53/2009: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **12655/2015: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 5738/2015 versão corrigida:2016: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 5739/2018: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211/2009: Agregado para concreto.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953/2015: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.

40 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778/2005 versão corrigida 2:2009: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004/2004: Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653/2014 versão corrigida: 2015: Materiais pozzolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15900-1/2009: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16605/2017: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697/2018: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

BAHURUDEEN, A., VAISAKH, K.S., SANTHANAM, M. **Availability of sugarcane bagasse ash and potential for use as a supplementary cementitious material in concrete.** 2015. Indian Concr. J. 89.

BAUER, L. A. F. **Materiais da construção.** 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

BERENQUER R. A.; SILVA F. A. N.; TORRES S. M.; MONTEIRO E. C. B.; MELO NETO P. H. A. A **influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como**

**substituição parcial do cimento na resistência à compressão de argamassa.** 2018. Revista ALCONPAT, 8 (1), pp. 30 – 37, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.187>

BERMANN, C. **Energia no Brasil: para quê e para quem? Crise e Alternativas para um país sustentável.** 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção.** 1<sup>a</sup> ed., São Paulo: Oficina de Textos, 414 p., 2010.

BIE, R. S.; SONG, X. F.; LIU, Q. Q.; JI, X. Y.; CHEN, P. **Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement.** Cem. Concr. Compos. 55, 162–168. 2015.

BORTOLETTO, M.; GUIMARÃES, P. V.C.; SILVA, R. G.; AKASAKI, J. L. **Avaliação do resíduo Cinza da Madeira de Eucalipto como substituição parcial da areia em argamassas de cimento.** 2017. Revista Científica ANAP Brasil, v. 10, n, 18, DOI: <http://dx.doi.org/10.17271/19843240101820171644>

CALDAS, L. R. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO<sub>2</sub> de uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing.** 2016. 174p. (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil) Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Distrito Federal.

CALLISTER, W. D. JR; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 1940. tradução Sergio Murilo Stamile Soares; revisão técnica José Roberto Moraes d'Almeida. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Tradução de: Materials Science and engineering: na introduction, 8th ed.

CARVALHO, R.C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado.** 3 ed. São Carlos: EDUFSCar, 367p. 2007.

CEMBUREAU - The European Cement Association. **Activity Report.** 2017. Disponível em: <https://cembureau.eu/news-views/publications/>. Acesso em 24/04/2019.

CHINAGLIA, C. R.; CORREA, C. A. Análise de falhas em materiais através de técnicas avançadas de microscopia. **Universidade Federal de São Carlos. São Carlos SP, Polímeros vol.7 no.3, jul./set. 1997.** <https://doi.org/10.1590/S0104-14281997000300005>

CHUSILP, N., JATURAPITAKKUL, C., KIATTIKOMOL, K. **Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete.** 2009. Constr. Build. Mater. 23, 3352–3358.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar.** V.6 – SAFRA 2019/20 N.1 - Primeiro levantamento - maio 2019. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em 10/06/19.

CORDEIRO, L. de N. P. C.; PAES, I. de N. L.; SOUZA, P. S. L.; AZEVEDO, C. M. **Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 45-55, jan./mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000100292>

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** 2006. 445 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G.C., TAVARES, L.M., TOLEDO FILHO, R.D. **Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification.** 2016. Cem. Concr. Res. 89, 269–275.

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

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Characterization of sugar cane bagasse ash for use as pozzolan in cementitious materials.** 2009. Química Nova; 32(1), 82-86, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422009000100016>

COSTA, B. L. de C. da. **Quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na construção civil.** 2012. Rio de Janeiro, 190 p. (Dissertação de Mestrado apresentado ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia- UFRJ, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil).

DEDAVID, B. A. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 6 p. 2007.

DURAN A. P.; FRACARO. D. **Verificação das propriedades básicas do concreto industrializado fornecido em embalagens de 30kg.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Concreto do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Concreto. Curitiba, 2011.

GALVÃO, J. K. L.; CARVALHO, M. C. F. de; SOUZA, J. A. M. de; FEITOSA, C. S.; BUDELLON, A. S.; SANTOS, F. V.S dos.; SILVA, R. da; PARENTE, A. A. R.; FERREIRA C. L.; TREVISAN, D. **Materiais alternativos para adição ao Cimento Portland dosagem utilizando resíduos da palha da soja.** 2018. 23° CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, novembro de 2018, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

HARISH, K.; RANGARAJU, P.; VEMPATI, R. **Fundamental investigations into performance of carbon-neutral rice husk ash as supplementary cementitious material.** Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board 2164, 26–35. 2010.

HE, Z. H.; LI, L. Y.; DU, S. G. **Creep analysis of concrete containing rice husk ash.** Cem. Concr. Compos. 80, 190–199. 2017.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; TANAKA, R. S.; MEDEIROS, M. H.F. **Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG).** 2017. Revista Matéria, v.22, n.3, 2017. ISSN 1517-7076.

GANESAN, K., RAJAGOPAL, K., THANGAVEL, K. **Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material.** 2007. Cem. Concr. Compos. 29, 515–524.

GASTALDINI, A. L. G.; SILVA, M. P. da.; ZAMBERLAN, F. B.; MOSTARDEIRO NETO, C. Z. **Total shrinkage, chloride penetration, and compressive strength of concretes that contain clear-colored rice husk ash.** Constr. Build. Mater. 54, 369–377. 2014.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento.** 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

INTERNAIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Cement.** Paris. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>. Acessado em: 30/07/2020

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). **Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo.** 2009. Ano XXXVII | Nº 53 Jan. • Fev. • Mar. | 2009 ISSN 1809-7197.

INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS APLICADAS (IPEA). **Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindústrias associadas.** 2012. Disponível em:

[http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=15493](http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=15493)

•  
Acesso em 24/04/2019.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (INPI). República Federativa do Brasil. **BR 102017020870-2 A2.** Data do Depósito: 28/09/2017. Data da Publicação Nacional: 16/04/2019. **Título: Cinza proveniente da queima do bagaço de**

**cana-de-açúcar processada para ser incorporada na fabricação de cimentos Portland ou para substituir parcelas de cimento Portland e/ou areia na preparação da mistura de traços de concretos e argamassas da construção civil.** Int. Cl.: C04B 18/06; C04B 28/04; C04B 7/28. CPC: C04B 18/06; C04B 28/04; C04B 7/28. Depositante(es): Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Inventor(es): Conrado de Souza Rodrigues; Clebio Antônio Batista Filho; Danilo Benício Andrade.

JAGADESH, P.; RAMACHANDRAMURTHY, A.; MURUGESAN, R. **Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete.** 2018. Construction and Building Materials, 176, 608-617, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.037>

JOSHAGHANI, A., MOEINI, M.A. **Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar.** 2017. Constr. Build. Mater. 152, 818–831.

LIMA, S.A., SALES, A., ALMEIDA, F. do C.R., MORETTI, J.P., PORTELLA, K.F. **Concretes made with sugarcane bagasse ash: evaluation of the durability for carbonation and abrasion tests.** 2011. Built Environment. 11 (2), 201–212.

LOPES, J.; RUDNICK, T.; MARTINS, C. **Utilização de resíduos industriais para produção de concreto sustentável.** 2018. [Use of industrial waste for the production of sustainable concrete]. REEC - Revista Eletrônica De Engenharia Civil, 14(2). <https://doi.org/10.5216/reec.v14i2.49261>

MARTINERA HERNÁNDEZ, J. F.; BETANCOURT RODRÍGUEZ, S.; MIDDENDORF, B.; RUBIO, A.; MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, L.; MACHADO LÓPEZ, I.; GONZÁLEZ LÓPEZ, R. **Propiedades puzolánicas de desechos de La industria azucarera (primeira parte).** In: Materiales de Construcción, v.50, n.260, p. 71-78, 2000.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume III/ Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.** Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. 336 p.: il. ISBN: 978-85-88063-19-8.

MEHTA, P. K. MONTEIRO J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** 2 ed. São Paulo. PINI, 1997.

PEDROSO, F. L. **Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo:** Revista Ibracon, São Paulo, n. 53, jan./fev./mar. 2009.

PEREIRA, A., AKASAKI, J.L., MELGES, J.L.P., TASHIMA, M.M., SORIANO, L., BORRACHERO, M. V., MONZÓ, J., PAYÁ, J. **Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag.** 2015. *Ceram. Int.* 41, 13012–13024.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland.** 11. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.

POGGIALI, F. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar.** (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) 2010.

RAJASEKAR, A., ARUNACHALAM, K., KOTTAISAMY, M., & SARASWATHY, V. **Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash.** 2018. *Construction and Building Materials*, 171, 350-356, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.140>

REIS, M. C. **Incorporação de resíduos de carvão vegetal em argamassas cimentícias.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2019.

RESENDE, D. S. de. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar.** 2013. 166f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

REZENDE, M. F. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland como mecanismo de desenvolvimento limpo.** 2016. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.  
<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6981>

RIBEIRO, C. C; PINTO, J. D.S; STARLING, T. **Materiais de construção civil.** 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

RODRIGUES, C. S.; BATISTA FILHO, C. A.; ANDRADE, D. B. **Cinza proveniente da queima do bagaço de cana-de-açúcar processada para ser incorporada na fabricação de cimentos Portland ou para substituir parcelas de cimento Portland e/ou areia na preparação da mistura de traços de concretos e argamassas da construção civil.** Depositante: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. BR n. 102017020870-2 A2. Depósito: 28 set. 2017.

SALES, A.; LIMA, S. A. **Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement.** Department of Civil Engineering, UFSCar, São Carlos, SP, Brasil. 2010.

SILVA, G.R da. **Manual de traços de concreto.** Rio de Janeiro. Nobel, 1974.

a SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC): **Resultados Preliminares 2019.** Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=44>. Acesso em 30/07/2020.

b SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC): **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050 / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio.** Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p.

STEIN, B., RYAN, R., VITKUS, L., HALVERSON, J. **Beneficial use of fly ash for concrete construction in California.** In: World of Coal Ash (WOCA) Conference. Nashville, TN. 2015

VENKATANARAYANAN, H. K.; RANGARAJU, P. R. **Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete.** Cem. Concr. Compos. 55, 348–363. 2015.

VIEIRA, J. P. S. B.; RODRIGUES F. A. **Reciclagem de cascas de arroz e milho: utilização para extração de sílica e fibras e produção de cimento.** 2018. Revista Científica UMC Edição Especial PIBIC, outubro 2018. ISSN 2525-5250

WALID, Y. **A Técnica de Edificar.** 13. ed. São Paulo: Pini: Sinduscon, 2013.

YADAV, L. A.; SAIRAM, V.; MURUGANANDAM, L.; SRINIVASAN, K. **An Overview of the influences of mechanical and chemical processing on Sugarcane bagasse ash characterisation as a Supplementary Cementitious Material.** Journal of Cleaner Production. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118854>

ZAREEI, S. A., AMERI, F., & BAHRAMI, N. **Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash.** Construction and Building Materials. 2018. Construction and Building Materials. 184, 258–268, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153>

ZAREEI, S.A., AMERI, F., DOROSTKAR, F., AHMADI, M. **Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: evaluating durability and mechanical properties.** Case Stud. Constr. Mater. 7, 73–81. 2017.

ZAIN, M.F.M., ISLAM, M.N., MAHMUD, F., JAMIL, M. **Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material.** Constr. Build. Mater. 25 (2), 798–805. 2011.