



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE
MESTRADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ESTABILIZAÇÃO DO CHUMBO POR SOLIDIFICAÇÃO EM
CINZAS DE BAGAÇO DE CANA INCORPORADA EM
CONCRETO

Autora: Paula Simoni Mancini

Toledo – Paraná – Brasil

2020



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - Unioeste
MESTRADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ESTABILIZAÇÃO DO CHUMBO POR SOLIDIFICAÇÃO EM CINZAS DE BAGAÇO DE CANA INCORPORADA EM CONCRETO

Autora: Paula Simoni Mancini

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste/*Câmpus* Toledo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Drº Douglas C. Dragunski

Coorientador: Drº Carlos E. Tino Balestra

Toledo – Paraná – Brasil

2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Mancini, Paula Simoni
ESTABILIZAÇÃO DO CHUMBO POR SOLIDIFICAÇÃO EM CINZAS DE
BAGAÇO DE CANA INCORPORADA EM CONCRETO / Paula Simoni
Mancini; orientador(a), Douglas Cardoso Dragunski;
coorientador(a), Carlos Eduardo Tino Balestra, 2020.
77 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste
do Paraná, Campus de Toledo, Centro de Engenharias e
Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais, 2020.

1. Adsorção . 2. Concreto. 3. Cinza do bagaço de cana de
açúcar. 4. chumbo. I. Dragunski, Douglas Cardoso. II.
Balestra, Carlos Eduardo Tino. III. Título.

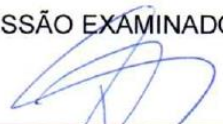
24 FOLHA DE APROVAÇÃO

Paula Simoni Mancini

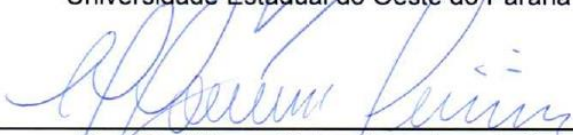
"Estabilização por solidificação de enzimas de bagaço de cana contendo chumbo adsorvido em concreto"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – Mestrado, do Centro de Engenharias e Ciências Exatas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, pela Comissão Examinadora composta pelos membros:

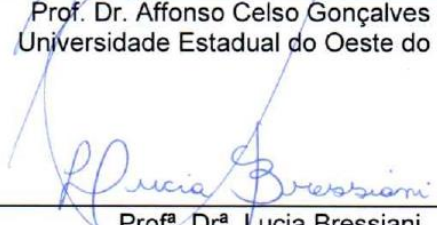
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Douglas Cardoso Dragunski (Presidente)
Universidade Estadual do Oeste do Paraná



Prof. Dr. Affonso Celso Gonçalves Junior
Universidade Estadual do Oeste do Paraná



Prof.ª Dr.ª Lucia Bressiani
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aprovada em: 13 de março de 2020.

Local de defesa: Auditório do Gerpel – Unioeste Toledo.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS.....	14
2.1.	OBJETIVO GERAL	14
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3.	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	15
3.1.	CHUMBO	15
3.2.	UTILIZAÇÃO DO CHUMBO	16
3.3.	ADSORÇÃO DE CHUMBO NA CINZA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR 17	
3.4.	A CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL	18
3.5.2.	Cinza do Bagaço de Cana de Açúcar (CBC).....	24
4.2.	CINZA POZOLÂNICA COMO ADIÇÃO MINERAL DO CONCRETO.....	31
4.2.1.	POZOLANAS	32
4.2.2.	REAÇÕES POZOLÂNICAS	33
4.3.	APLICAÇÃO DAS CINZAS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM ARGAMASSAS E CONCRETOS.....	34
5.	METODOLOGIA DE PESQUISA	39
5.1.	CIMENTO	39
5.2.	AGREGADO MIÚDO E AGREGADO GRAÚDO DO CONCRETO.....	40
5.3.	ADITIVO	42
5.4.	ÁGUA.....	42
5.5.	ADIÇÕES.....	42
5.5.1.	Cinza do Bagaço de Cana-De-Açúcar.....	42
5.6.	INCORPORAÇÃO DA CBC COM E SEM CHUMBO NO CONCRETO	44
5.8.	AnÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
6.	RESULTADOS.....	55
6.1.	CARACTERIZAÇÃO física e química do aglomerante e agrEgados	55
6.2.	CARACTERIZAÇÃO DA CBC.....	58
6.3.	ADSORÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR	60
6.4.	INCORPORAÇÃO DA CBC NO CONCRETO.....	62
6.4.1.	TRAÇO DE REFERÊNCIA.....	62

6.4.2.	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	62
6.4.3.	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	64
6.5.	PERMEABILIDADE DO CHUMBO INCORPORADO NO CONCRETO.....	66
	REFERÊNCIAS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Minerais de obtenção do chumbo a) Galena; b) Cerusita e c) Anglesita. ..	15
Figura 2. Área de concentração de cana-de-açúcar no Brasil	22
Figura 3. Industrialização da cana de açúcar e resíduos gerados em cada etapa....	24
Figura 4. Ciclo da Cana de Açúcar.....	26
Figura 5: Clínquer para a fabricação de cimento.....	27
Figura 6: Agregado natural miúdo (areia).....	29
Figura 7: Pedra Brita.....	29
Figura 8: Frasco Volumétrico de Le Chatelier para o ensaio de massa específica...39	
Figura 9: Agitador mecânico do agregado miúdo.....	41
Figura 10: Agitador mecânico do agregado graúdo.....	41
Figura 11. Cinza <i>in natura</i> após secagem em estufa.....	43
Figura 12. Produção de concreto em betoneira.....	46
Figura 13. Equipamentos para a realização do Slump test.....	47
Figura 14. Corpo de prova cilíndrico.....	48
Figura 15. Formas para corpos de provas das placas de concreto.....	49
Figura 16: Concreto fresco nos moldes de placas para ensaio de Permeabilidade..	49
Figura 17: Placa de concreto desmoldada após 24 horas (vista lateral).....	49
Figura 18. Prensa hidráulica para obtenção da resistência a compressão.....	50
Figura 19: Ensaio de tração por compressão diametral.....	51
Figura 20: Ilustração da configuração dos materiais utilizados no ensaio de permeabilidade.....	52
Figura 21. Curva de Inchamento da areia.....	56
Figura 22: Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado.....	57
Figura 23: Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado.....	58
Figura 24. Difractogramas da CBC <i>in natura</i> (a); da CBC adsorvida com chumbo (n);	59
Figura 25: Resistência média de compressão do concreto com variação de adição de CBC com e sem Pb ²⁺ adsorvido.....	64
Figura 26: Resistência a tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias.....	66
Figura 26: Permeabilidade da água nas placas de concreto.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Nomenclatura dos corpos de prova estudados.....	45
Tabela 2. Composição dos traços em massa.....	45
Tabela 3: Avaliação do nível de qualidade do ensaio em função do coeficiente de variação	53
Tabela 4. Granulometria dos agregados miúdos.....	56
Tabela 5. Granulometria dos agregados graúdos	57
Tabela 6. Caracterização da pré-existência de Chumbo (Pb^{2+}) na CBC <i>in natura</i>	58
Tabela 7. Caracterização da adsorção da CBC para diferentes concentrações de Chumbo (Pb^{2+}).....	60
Tabela 8: Caracterização da adsorção da CBC para concentração de 200 mg.L^{-1} de Chumbo (Pb^{2+}).....	61
Tabela 9: Concentração de chumbo após abertura da cinza.....	61
Tabela 10 - Resistência a compressão do concreto produzido com adição de CBC com e sem chumbo adsorvido aos 28 dias.	63
Tabela 11: Resistência a tração por compressão diametral do concreto produzido com adição de CBC com e sem chumbo adsorvido aos 28 dias.....	65
Tabela 12: Análise de presença de Pb^{2+} existente na água permeada.....	67

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais,
“Você deixou seus sonhos para que eu sonhasse.
Derramou lágrimas para que eu fosse feliz.
Você perdeu noites de sono para que eu dormisse tranquila.
Acreditou em mim, apesar dos meus erros.
Jamais esqueça que eu levarei para sempre um pedaço seu
ser dentro do meu próprio ser.”
(Augusto Cury)

Sem vocês este trabalho não seria possível!

Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que permitiu que eu chegasse até aqui. Seu colo é o meu refúgio, é onde encontro forças e é onde encontro paz. A Ele seja toda honra e toda glória. Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas.

Agradeço a minha mãe, que sempre esteve ao meu lado, a cada dificuldade era quem me dava forças, acalmando meu coração mediante seus conselhos e de sua intercessão. Sem você nada disso estaria acontecendo. Também agradeço ao meu pai, que da mesma maneira, sempre esteve ao meu lado, sendo a base de todos os meus sonhos.

Agradeço ao meu noivo Thiago Pagliuso Sant'Ana pela força, ajuda e disposição, em me ajudar com os ensaios de laboratório, a ler e reler minha dissertação junto comigo e principalmente por não me deixar desistir por mais difícil que tudo parecia estar.

Agradeço a minha irmã Carla e ao meu cunhado Hedimar por sempre estarem comigo nos momentos que precisei, desde fazer moldes metálicos para as minhas placas de concreto até para os momentos de descontração. E agradeço também ao meu sobrinho Benjamin, que nem imaginava a força que me transmitia e em todos os momentos de dificuldade era do seu sorriso que eu tirava forças pra seguir em frente.

Agradeço ao meu orientador Douglas Cardoso Dragunski por ter me orientado com maestria durante esse processo, sempre com otimismo e bom humor, direcionando o caminho a seguir no projeto, com atenção e dedicação.

Agradeço ao meu coorientador Carlos Eduardo Tino Balestro, que me recebeu de braços abertos e aceitou o desafio em me auxiliar nesta pesquisa, também com muita dedicação, sempre com sugestões e contribuições grandiosas.

Agradeço aos meus colegas Jean, Fernando e Paola pelas risadas, pelos desabafos, pela ajuda no laboratório, sempre com bom humor e muito carinho.

Agradeço aos técnicos de laboratório da UTFPR câmpus Toledo Marcos e Wilson pelo auxílio nos ensaios e também aos professores Emerson e Affonso da UNIOESTE câmpus Marechal Cândido Rondon por me auxiliarem nos ensaios laboratoriais.

Agradeço também ao apoio financeiro recebido pela CAPES.

RESUMO

MANCINI, Paula S. Título: **Efeitos de Adições de Cinza de Bagaço De Cana de Açúcar com Chumbo no Concreto**. 77 Páginas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, junho de 2020.

O chumbo (Pb^{2+}) apesar de ser considerado um elemento tóxico e provocar sérios danos à saúde, tem um vasto uso industrial. O descarte dos efluentes industriais contaminados tem contribuído para um aumento significativo nas concentrações deste íon metálico em águas, representando uma grande fonte de contaminação dos corpos aquáticos. Para minimizar o efeito dessas substâncias, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas em busca de novas tecnologias para remover o chumbo dos efluentes industriais. Considerando o custo elevado da remoção de íons metálicos tóxicos presentes nos efluentes, surge a necessidade de desenvolver soluções consideradas eficazes e com maior viabilidade econômica como por exemplo por meio da adsorção de efluentes utilizando a cinza do bagaço da cana de açúcar (CBC) como biossorvente. Apesar dos resultados encontrados na bibliografia terem se mostrado satisfatórios até então, ainda não há um descarte correto para este biossorvente contaminado com o chumbo. Sabendo que a CBC possui propriedades pozolânicas semelhantes às do cimento (aglomerante utilizado na fabricação do concreto) e, baseando-se em estudos dispostos na bibliografia, pode-se substituir parte do cimento por CBC. Desta forma, surge o pressuposto de incorporar a cinza do bagaço da cana de açúcar utilizada como adsorvente de chumbo na fabricação de concreto. A porcentagem de CBC foi utilizada como adição mineral no concreto em porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20% em relação a massa de cimento de acordo com o traço utilizado. Foram realizados ensaios de adsorção da CBC para concentrações de 100 $mg.L^{-1}$, 200 $mg.L^{-1}$ e 500 $mg.L^{-1}$. Por meio das análises foi possível determinar a solução de 200 $mg.L^{-1}$ como a de maior eficiência adsortiva para a CBC. Portanto, foi realizado um processo de adsorção de chumbo em maior escala na CBC. Para garantir o processo adsortivo foram realizados ensaios de determinação dos teores de chumbo na cinza *in natura* e posteriormente na cinza adsorvida. Os resultados comprovaram que a cinza não continha chumbo preexistente em sua composição e que após o processo de adsorção a mesma foi capaz de adsorver 99,94% de chumbo. Após a caracterização dos materiais foi definido um traço de 1:1,49:4,00:0,42 (cimento, areia, brita e água) com adição de 0,3% em relação a massa do cimento de aditivo superplastificante. Antes de ser incorporada ao concreto a CBC foi seca em estufa posteriormente foram feitos corpos de provas cilíndricos para a realização de ensaios de massa específica, absorção de água, índice de vazios do concreto, de resistência mecânica a compressão e a tração por compressão diametral. Posteriormente foram produzidas placas de concreto para a permeabilidade de água destilada conforme a NBR 16416, a água permeada foi analisada para detectar a existência de chumbo sendo que nada foi detectado pelo aparelho com um limite de detecção de 0,01 $mg.L^{-1}$.

PALAVRAS-CHAVE: cinza; cana de açúcar; concreto; chumbo; adsorção.

ABSTRACT

MANCINI, Paula S. Title: **The Effects of Adding Cane Bagasse Ashes With Lead in Concrete**. Pages. Dissertation (Masters) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, 2019.

The lead (Pb^{2+}), despite being considered a toxic element causing health impairment, has a vast industrial usage. The disposal of industrially contaminated effluents has been contributing to a significant raise in the concentration of these metal ions in water, thus being a great source of waterbody contamination. In order to minimize the effects of these substances, a number of researches have been elaborated with the aim of developing new technologies to remove lead from industrial effluents. Considering the high cost when removing toxic metal ions from effluents, there is a current need of developing effective solutions with better economic viability, as an example, the adsorption of effluents using sugar cane bagasse ashes (CBA) as a biosorbent. While the results found in literature are considered satisfactory, a way to correctly dispose the lead contaminated biosorbent is yet to be found. Knowing that the CBA has pozzolanic properties, similar to the cement (binder portion of concrete) and, based on studies shown in the bibliography, it is possible to replace part of the cement for CBA. Thus, the assumption of incorporating the CBA, used as lead adsorbent, in the confection of concrete has been made. The CBA was used as a mineral addition to the concrete in percentages of 5%, 10%, 15% and 20% in relation to the cement mass according to the mix used. CBA adsorption tests were performed at concentrations of 100 mg.L^{-1} , 200 mg.L^{-1} and 500 mg.L^{-1} . Through thorough analysis, it was possible to place the 200 mg.L^{-1} solution as the solution with better adsorption efficiency for the CBA. Therefore, a lead adsorption process performed on a larger scale was carried out using CBA. To ensure the adsorption process, tests to detect the presence of lead in in natura ashes and in adsorbed ashes were performed. The results prove that the in natura ashes did not contain any amount of pré-existing lead in their compositions and after the adsorption process, the ashes were able to adsorb 99.94% of the lead. After the characterization of the materials, a mix proportion of 1:1.49:4.00:0.42 (cement:sand:coarse gravel:water) was defined, adding superplasticizer at a 0.3% ratio, compared to the cement mass. Before being incorporated into the concrete, the CBA was kiln dried. Later, cylindrical specimens were made to perform density, water absorption, voids content, compressive and tensile strength tests. After, concrete plates were produced to test the permeability of distilled water following the procedures of the NBR 16416, the permeated water was analyzed to detect the existence of lead in it, as a result, no amount of lead was detected by the device with a detection limit of 0.01 mg.L^{-1} .

KEYWORDS: ash; sugar cane; concrete; lead; adsorption.

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores consumidores de recursos naturais é a indústria da construção civil e conseqüentemente a maior geradora de resíduos, devido a utilização de tecnologias construtivas que favorecem o desperdício conforme afirma Mariano (2008). Assim, pode ser considerada uma das principais vilãs. Suas atividades provocam grandes impactos no meio ambiente devido ao consumo excessivo de matéria-prima, à elevada geração de resíduos e às modificações impostas na paisagem. Entretanto, este setor é um dos que mais contribui para o desenvolvimento econômico e social do país (GNOATTO, 2016).

Além da construção civil, as indústrias também promovem grande poluição ao ambiente, dentre elas, destacam-se as indústrias que utilizam chumbo, como matéria prima. O chumbo é classificado como uma das principais formas de contaminação do meio ambiente, tendo, além dos teores naturais de contaminação, os teores decorrentes de ações antrópicas, bem como, indústrias de baterias, siderúrgicas, metalúrgicas, entre outros, expondo potencial elevado de danos ao meio ambiente e também a saúde humana.

Devido à cinza do bagaço de cana de açúcar ser eficiente na adsorção de efluentes industriais contaminados com metais pesados, em especial o chumbo, este material tornou-se um biossorvente. (MOHAN, et al).

A cinza do bagaço de cana de açúcar, que se constitui, basicamente, de sílica, SiO_2 apresenta potencial para ser utilizada como adição mineral, por possuir características pozolânicas, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos (CORDEIRO et al., 2008).

Assim, a incorporação da cinza do bagaço de cana de açúcar no concreto pode contribuir muito para a redução do impacto ambiental provocado pelos efluentes industriais contaminados com chumbo. Além da diminuição da necessidade de extração de matérias-primas, da redução do consumo de energia, e ainda, o potencial de obter materiais com características técnicas competitivas em relação aos produtos atuais.

O presente projeto consiste no estudo da estabilização do chumbo presente em efluentes industriais adsorvido na cinza do bagaço de cana de açúcar por meio da incorporação na fabricação de concreto.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Estudar a capacidade de retenção/estabilização do chumbo (Pb^{2+}) adsorvido na cinza do bagaço de cana de açúcar (biossorvente) mediante a incorporação no concreto.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar os teores de chumbo na cinza do bagaço de cana de açúcar após a adsorção do íon chumbo, utilizando absorção atômica por chama.
- Investigar a influência da incorporação da cinza obtida por meio da queima do biossorvente na resistência mecânica do concreto.
- Avaliar a eficiência do concreto no processo de retenção/fixação do chumbo utilizando ensaios de lixiviação e solubilização.

3. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste item são abordados aspectos importantes sobre o emprego de aditivos minerais em argamassas e concretos, principalmente associados à cinza do bagaço de cana-de-açúcar, que é o principal material utilizado nesta pesquisa e uma contextualização sobre a produção sucroalcooleira no Brasil, além da descrição do chumbo, material que será adsorvido pela cinza do bagaço como forma de estabilização por solidificação por meio da incorporação no concreto como parte substituinte do cimento.

3.1. CHUMBO

O metal branco azulado denominado chumbo, possui número atômico 82, massa atômica de $207,21 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ e ponto de fusão em 327°C , se enquadra no 5º período da tabela periódica e ao grupo do carbono (Grupo 14). Possui características intrínsecas, como maciez, maleabilidade, baixa condutividade elétrica, além da facilidade de combiná-lo com outros elementos, o que o torna um dos metais mais utilizados na indústria desde a revolução industrial (ATKINS, 2006).

O chumbo, apesar de ser encontrado na natureza desde a formação terrestre não é um elemento com disponibilidade abundante, podendo ser encontrado juntamente com outros elementos. Seus minérios estão distribuídos por toda a atmosfera. A forma mineral mais comum de ser encontrada é o sulfeto de chumbo, ou galena, outras formas de disponibilidade são por meio dos minerais carbonato de chumbo (cerussita) e do sulfato de chumbo (anglesita) respectivamente representados na figura 1.

Figura 1. Minerais de obtenção do chumbo a) Galena; b) Cerussita e c) Anglesita.



Fonte: Mineralogy Database – 2010

Por se tratar de um elemento tóxico não essencial que se acumula no organismo, este metal tem sido estudado nos últimos anos, tanto do ponto de vista toxicológico como epidemiológico, verificando-se uma vasta literatura sobre a cinética do chumbo no corpo humano, ou seja, a interação contínua entre a absorção, distribuição, armazenamento e eliminação deste metal, sendo capaz de comprovar de modo claro a elevada toxicidade para os seres vivos. (ANDRADE, 2001)

A toxicidade do chumbo afeta diretamente os sistemas nervoso e hematopoiético. No entanto, podem acarretar em prejuízos significativos ao sistema renal, cardiovascular e no sistema reprodutivo. Alguns estudos comprovaram que mesmo níveis baixos de chumbo no sangue, até mesmo em concentrações menores do que $10 \mu\text{g. dL}^{-1}$ provocam efeitos adversos à saúde humana, desde irritabilidade, cefaléia, tremor muscular, alucinações, perda da memória e da capacidade de concentração, até mesmo progredir causando o delírio, convulsões, paralisias e coma, principalmente em crianças (ATSDR, 1992).

3.2. UTILIZAÇÃO DO CHUMBO

É um dos metais com maior uso industrial, seja na construção civil, fábricas de baterias, munições, proteção contra raios X, além de compor parte de ligas metálicas na produção de soldas, cabos elétricos, fusíveis, entre outros (ICZ, 2010).

A alta ductibilidade e maleabilidade deste metal facilitam o emprego deste material no formato de chapas, por permitir uma maior trabalhabilidade. A flexibilidade permite a utilização na forma de tubo. Ainda neste conceito, o chumbo tem se desempenhado como um excelente metal, quando empregado para a proteção da corrosão do material que ocorre em virtude da rápida oxidação superficial do material formando uma película de óxido, originando o protóxido de chumbo. (SILVA; TEIXEIRA, 2010).

Dissolve-se a quente nos ácidos nítrico, acético, sulfúrico e clorídrico em ebulição, porém reage à ação dos outros ácidos, o que o torna um dos elementos preferidos para o revestimento interno de recipientes para ácidos. Além disso,

possui uma propriedade ímpar de absorver radiações de ondas curtas, tais como, as provenientes do rádio ou as geradas pelos raios-X. Detém, ainda propriedades favoráveis capazes de diminuir o atrito entre determinadas ligas. (SILVA; TEIXEIRA, 2010).

Essas propriedades tornam o chumbo um material de fácil combinação com os demais elementos, portanto, faz com que o chumbo seja um metal com o maior emprego na indústria moderna, seja na forma pura ou sob o formato de composto. (SILVA; TEIXEIRA, 2010).

Considerado o sexto metal mais utilizado no setor industrial, tem como principal utilização a construção de baterias automotivas e estacionárias, responsáveis por 90% do consumo mundial de chumbo. (FIGUEIREDO, CAPITANI; GITAHY, 2005).

Ainda, é relevante citar a utilização do chumbo na forma de lâminas ou tubos, em que suas propriedades de resistência a corrosão e flexibilidade são características essenciais requeridas por estes ramos industriais. Também é considerado como fonte de matéria prima no revestimento de cabos, componente de soldas e nos materiais de revestimento na indústria automobilística, atuando como um material de proteção de radiações ionizantes. Além, de estar presente em uma variedade de ligas metálicas e seus compostos são feitos e utilizados frequentemente nas indústrias.

Em consequência disso os efluentes industriais são considerados a principal fonte de poluição por esse contaminante. A atividade industrial, em geral, tem contribuído muito para um aumento significativo nas concentrações de íons metálicos em águas, representando uma grande fonte de contaminação dos corpos aquáticos.

3.3. ADSORÇÃO DE CHUMBO NA CINZA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR

Atualmente diversas atividades industriais já adotaram o processo de adsorção e/ou floculação para realizar o tratamento de efluentes líquidos, seja por uma questão de praticidade ou ainda pelo baixo custo ao ser comparado com outros meios. De acordo com a literatura, adsorção em fase fluída é um dos

métodos mais comuns e eficientes para remoção de metais dos efluentes industriais.

A adsorção pode ser considerada como uma atividade de deslocamento de um ou mais elementos que compõem uma fase líquida para a superfície de uma fase sólida. Nos dias de hoje a definição comum para a adsorção é que, por afinidade, uma concentração finita de moléculas de um fluido adere a uma superfície em consequência de um não balanceamento de forças. As definições relevantes da adsorção são o fluido (adsortivo), a superfície na qual o fenômeno ocorre (adsorvente) e os elementos retidos pela superfície (adsorbato). Existem dois tipos principais de adsorção que são a física e a química (Ruthven, 1984).

Gupta e Torres (1998) avaliaram a remoção de metais pesados e as alterações na toxicidade de um efluente de uma estação municipal de tratamento de águas residuais usando cinzas volantes de carvão. Após o tratamento, foi registrada uma redução na toxicidade e nas concentrações de Cu^{2+} , Pb^{2+} , PO_4^{-3} e NO_3^{-} .

3.4. A CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

Segundo a definição biológica, a cana-de-açúcar é uma espécie alógama, da família Gramíneae (Poaceae) tribo Andropogoneae, gênero *Saccharum* e dentro deste gênero existem seis espécies: *S. officinarum* L., *S. robustum* Brandes e Jeswiet, *S. barberi* J., *S. sinensis* Roxb., *S. spontaneum* L., e *S. edule* Hask (Daniels e Roach, 1987).

A cana-de-açúcar é uma planta típica de climas tropicais e subtropicais, seu plantio se adapta com facilidade a diferentes tipos de solo, porém, solos com camadas permeáveis superficiais ou mal drenados não são indicados para o cultivo. Seu desenvolvimento, inicialmente, proporciona a germinação e o crescimento vegetativo para em seguida promover a maturação e acúmulo de sacarose nos colmos (COPERSUCAR, 2011).

A cana-de-açúcar está presente na economia brasileira desde os primórdios do desenvolvimento do país, sendo mais de cinco séculos de tradição e sua importância deve-se ao fato do produto dar origem não somente a um alimento, mas a uma série de derivados como o melão, a cachaça, além da

geração de energia, a produção de etanol, entre outros, bem como representa uma importante fonte de renda e emprego na produção rural (SZMRECSÁNYI, 1979).

O processo de cultivo da cana-de-açúcar iniciou-se na era colonial em decorrência da necessidade de se colonizar e explorar as terras brasileiras, estas que no período apresentavam pouca importância ao governo português. O açúcar, por sua vez, apresentava um alto valor de comércio no período, e apresentou crescente demanda após o século XV contribuído para sua rápida difusão no país (SZMRECSÁNYI, 1979). A planta ao ser introduzida ao ambiente brasileiro, apresentou boa adaptação, logo espalhando-se no Nordeste e posteriormente para outras regiões.

A evolução do cultivo da cana de açúcar no Brasil deu-se por diferentes etapas, destacando-se aqui algumas fases mais recentes, sendo elas marcadas desde uma maior intervenção e regulamentação do Estado, até a sua retirada gradual, passando a ter papel somente como coordenador, tomando-se por base Shikida (2015).

A primeira fase aqui apontada estende-se de 1946–1947 a 1968–1969, período este marcado pela expansão distinta e algumas contradições quanto ao desenvolvimento equilibrado, destacada na literatura por Ramos (1999) sendo ainda apontada por Shikida (2015) como um período de forte intervenção estatal na agroindústria canavieira. O surgimento do Instituto de Açúcar e Alcool (IAA), em 1933 com o intuito de intermediar conflitos e ser o órgão regulador da economia canavieira, proporcionou uma maior atuação no controle de preços e da comercialização, estabelecendo-se quotas de produção capazes de garantir, sobretudo, o equilíbrio interno entre as safras anuais de cana-de-açúcar, o consumo dos seus principais produtos, entre outros. Desse modo o produtor não precisava se preocupar com a redução dos custos de produção e com a competitividade, pois o preço era garantido pelo Estado.

A segunda fase, estende-se de 1969–1970 a 1974–1975, abrangendo a consolidação da produção integrada, onde a agricultura passou por uma sólida transformação, adquirindo assim bases mais tecnológicas e modernas com a influência do crédito fornecido pelo governo, e a busca de maior competitividade no mercado externo. O período destaca-se pelo surgimento do Programa

Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar (Planalsucar) que contribuiu para o melhoramento dos sistemas de produção da agroindústria canavieira e posteriormente, como destacado por vários autores dentre eles Szmrecsányi (1979), Shikida (1997), Ramos (1999), etc, no final do referido período, dois fatores principais motivaram a criação do programa Proálcool, a crise no setor açucareiro que era voltado ao atendimento principalmente do mercado interno e a crise do petróleo que viabilizaram o surgimento do programa.

A terceira fase, que caracteriza o período de 1975–1976 a 1985–1986, é conhecida como o ciclo de maior dinamismo do Proálcool e grande crescimento da produção, principalmente do álcool, uma vez que o etanol passou a ser integrado a matriz energética brasileira, com a concretização dos veículos a etanol (SHIKIDA, 1997 e (SHIKIDA, 2015). A segunda crise do petróleo estimulou do carro movido a álcool, contando com o apoio de usinas e destilarias bem como diversos outros setores que passaram a fomentar o Proálcool. Os produtores inseridos no programa passaram a conviver com expedientes como reserva de mercado, concessão de subsídios, entre outros, que geravam boas margens de lucro (Paulillo et al., 2007).

A quarta fase, entre 1985-1986 e 1996-1997, é marcada pela crise do Proálcool, ocasionada pela instabilidade da produção alcooleira e a queda nas vendas de veículos movidos a álcool, bem como a retirada gradual da participação dos investimentos público no programa, o que influenciou diretamente os financiamentos de máquinas e equipamentos voltados a agroindústria canavieira, bem como o processo de ampliação de unidades produtivas (Paulillo et al., 2007). O período também é marcado pelo início da desregulamentação do setor a partir dos anos 90, uma vez que o sistema de crédito se apresentava em crise, passando a concorrência a ser via mercado resultando em diversos esforços voltados a redução de custos de produção e melhor aproveitamento da cana de açúcar e seus subprodutos (Alves, 2002 e Paulillo et al., 2007).

A quinta fase compreende o período de 1996–1997 a 2002–2003, sendo marcado principalmente pela maior desregulamentação do Estado no setor, porém, o mercado ainda não era adequado a autorregulação, passando o estado a ser apenas um coordenador dos processos a fim de se evitar grandes crises

no setor, sendo portanto, as mudanças no período marcadas pela busca das usinas e destilarias pela diferenciação de suas atividades por meio de novas estruturas técnicas e organizacionais para obter maior competitividade (VIAN, 2003).

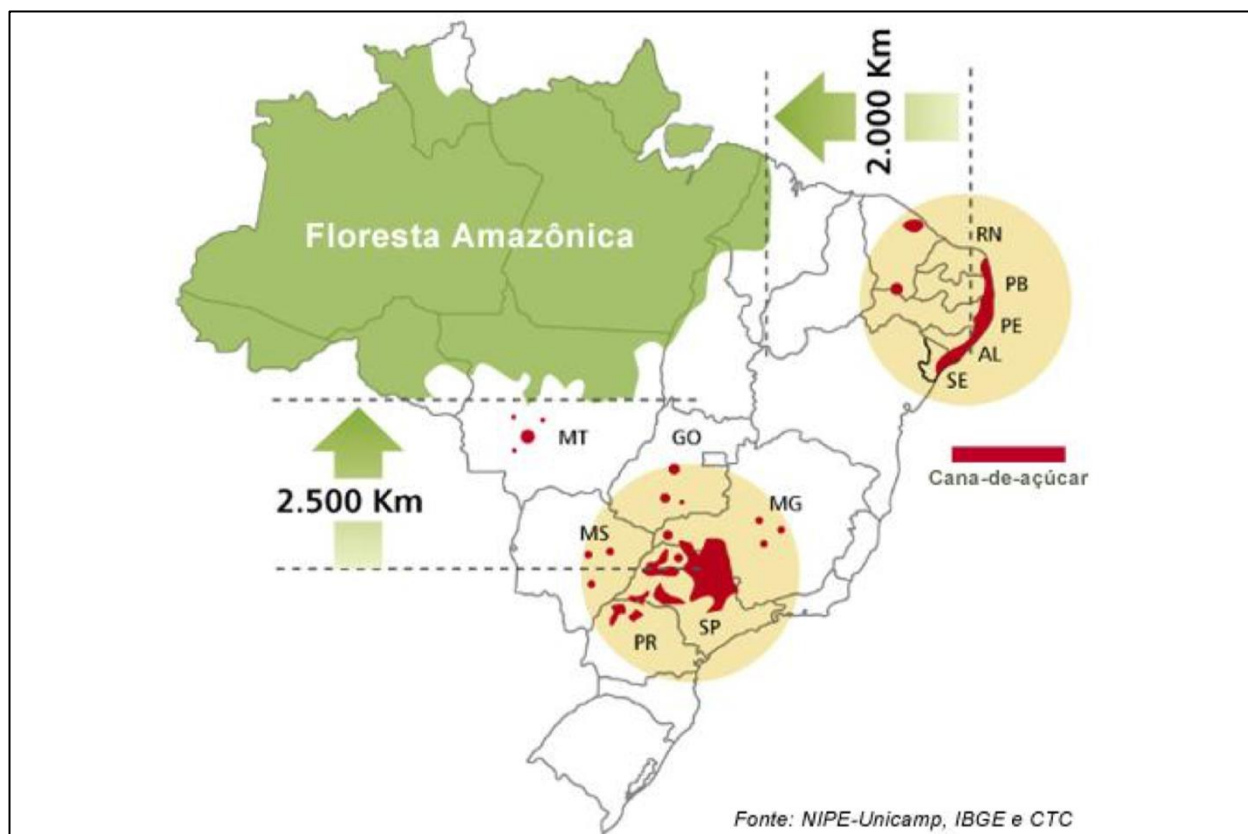
Por fim, o período que se estende de 2003–2004 a 2012–2013 caracterizado pelo investimento direto estrangeiro no setor e apresentando dois fatores característicos principais, sendo eles o aquecimento do mercado do etanol a partir dos carros *flex-fuel* e também com a falta de planejamento do setor, carente de um planejamento a médio e longo prazo bem como a regulamentação institucional que estabeleça diretrizes para o setor no país (SHIKIDA, 2015).

Quando se analisa o cenário mais atual da produção sucroalcooleira, observa-se uma maior formalização do emprego dentre as principais atividades agropecuárias, bem como o aumento da produção, incentivado pelo aumento no preços dos produtos derivados do petróleo e instabilidade econômica internacional, depois de um período obscuro para a produção sucroalcooleira do país, onde teve-se o fechamento de diversas usinas de processamento (SNA, 2018)

A Cadeia da Cana-de-açúcar apresenta fortes relações não somente com a produção de alimentos, mas também de bebidas e geração de energia, sendo dessa forma um importante componente na matriz energética e capaz de gerar empregos e renda para o país, bem como sendo referência no desenvolvimento de combustíveis renováveis e o fornecendo mundialmente. O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo cultivados na safra de 2017/2018 cerca de 633 milhões de toneladas, gerando uma produção de aproximadamente 38 milhões de toneladas de açúcar e 28 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2017).

Observa-se, na Figura 2, a distribuição geográfica dos principais centros produtores de cana-de-açúcar no Brasil, sendo evidente sua concentração na região nordeste do país, grande parte de São Paulo, Norte do Paraná e Sul de Minas Gerais, e parte do Centro-Oeste Brasileiro.

Figura 2. Área de concentração de cana-de-açúcar no Brasil



FONTE: IBGE, 2011

3.5. RESÍDUOS

De acordo com a ABNT (ABNT, 2004), resíduo sólido e semi-sólido resultam de atividades industriais, hospitalares, comercial, agrícola, doméstica e de varrição. Estão incluídos nesta definição lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. Os resíduos sólidos, quanto a sua periculosidade, podem ser classificados como:

- Classe I – Perigosos;
- Classe II – Não Perigosos;
- Resíduos classe II A – Não inerte;
- Resíduos classe II B – Inerte.

Resíduos da classe I são aqueles que apresentam periculosidade conforme características seguintes: Inflamabilidade, Toxicidade e Patogenicidade. Estas características são definidas de acordo com a (ABNT, 2004) NBR 10004.

Os resíduos da Classe II A - não inertes não se enquadram nas definições da Classe I e Classe II B. Os não inertes apresentam propriedades tais como: solubilidade em água ou combustibilidade e biodegradabilidade.

Resíduos Classe II B - Inertes são aqueles quando submetidos a um contato estático e dinâmico com a água deionizada ou destilada à temperatura ambiente, não tiveram nenhum dos seus constituintes solubilizados a concentrações superiores permitidos pelos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez e sabor. Como exemplos desses resíduos, podem-se citar tijolos, vidros, rochas e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

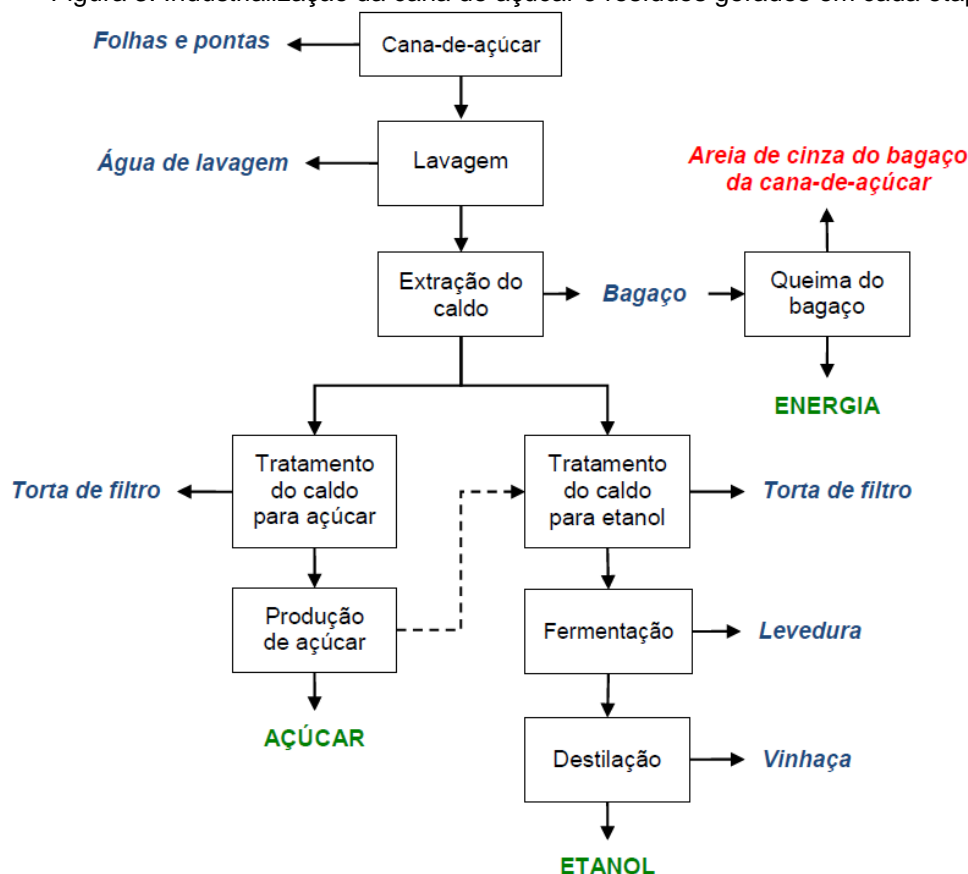
3.5.1. Resíduos da Indústria Sucroenergética

Como qualquer outro setor produtivo, a indústria da cana de açúcar gera uma quantidade considerável de resíduos que, se não forem reaproveitados, oferecem um elevado desperdício para o setor, além do risco social e ambiental.

Conforme a Lei Federal 12.305 (2010), no Art. 3º inciso XVI os resíduos sólidos são deliberados como um “material, substância, objeto ou bem descartado que resulta de atividade humana em sociedade cuja destinação final pode ocorrer, nos estados sólido ou semissólido, cujas particularidades tornem inviável o lançamento deste na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, exigindo então, soluções técnicas ou economicamente viáveis frente a melhor tecnologia possível.

Na Figura 3 está representado por meio do fluxograma o processo simplificado da produção de açúcar, álcool, energia e os resíduos provenientes destes processos.

Figura 3. Industrialização da cana de açúcar e resíduos gerados em cada etapa.



FONTE: Adaptado de Cordeiro, 2006.

Sendo a cinza do bagaço da cana de açúcar o objeto de estudo neste trabalho e o principal resíduo gerado na indústria canavieira torna-se necessário conhecer suas características, as quais são apresentadas a seguir.

3.5.2. Cinza do Bagaço de Cana de Açúcar (CBC)

A cana, após a colheita, é levada até a usina onde passa por três moendas, sendo o produto da primeira destinado para a produção de açúcar. Nas moagens posteriores o que é produzido é o álcool combustível. O resíduo gerado deste processo é o bagaço, que é levado por uma esteira e usado como combustível para alimentar as caldeiras que produzem vapor para a geração de eletricidade, um processo de cogeração de energia (SALES et al., 2010).

Esse processo de geração de energia elétrica é totalmente automatizado e inserido na linha de produção das usinas, criando-se assim uma terceira fonte de renda bastante significativa para os produtores de açúcar e álcool. O produto

final desta queima é uma cinza residual, que varia de acordo com as condições de queima e umidade do bagaço, que é normalmente utilizado como fertilizante nas plantações de cana (SALES et al., 2010), apesar de possuir poucos nutrientes para o solo (CORDEIRO, 2006).

A combustão de carvão para produção de energia gera dois tipos de cinzas: cinza pesada e cinza volante. A cinza pesada apresenta textura grosseira que caem no fundo da caldeira, e representam 15 a 20 % das cinzas produzidas. A cinza volante tem textura mais finas e são arrastadas pelos gases da fornalha da caldeira. As cinzas volantes não comercializadas são transferidas, por meio de caminhões, para as minas de carvão desativadas, onde são estocadas (Silva et. al.,1999).

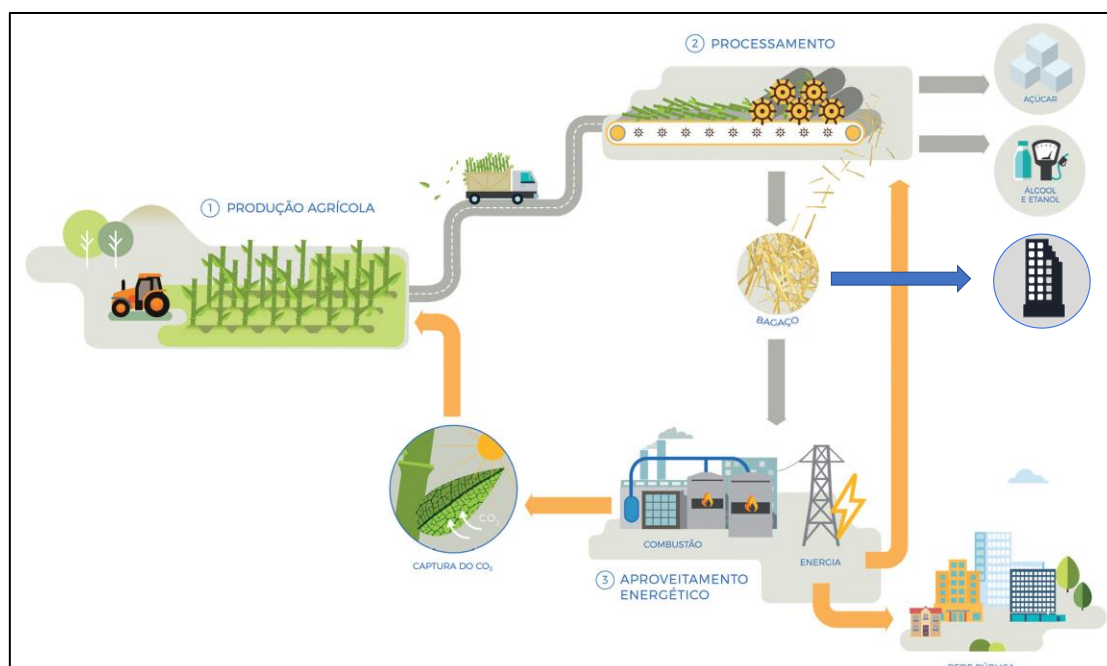
As atividades industriais pertinentes à utilização de cinzas volantes em artigos economicamente viáveis têm sido populares nos últimos anos como na fabricação de cimento, concreto e tijolos. Uma rota alternativa para a utilização desses rejeitos é na fabricação de vidros, vitros-cerâmicos e compósitos (Menezes et al., 2002). As cinzas pesadas não têm esse mercado. São eliminadas em bacias de sedimentação ou na regularização de terrenos, gerando um problema de ordem ambiental e estética na área e vizinhança de influência de operação da usina (Rocha, 2002).

A cana é moída em grandes rolos nas usinas, sob grande pressão, sendo extraído o caldo para fabricação do açúcar e álcool (Feitas, 2005). O bagaço separado nas moendas é usado como combustível nas caldeiras para produção de vapor (Castro, 1995). Esse processo gera grande quantidade de resíduo cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

A cinza residual mesmo sendo um material de difícil degradação e apresentar poucos nutrientes minerais, é utilizada como adubo nas próprias lavouras de cana de açúcar (Manhães, 1999).

A Figura 4 apresenta esquematicamente o ciclo produtivo canavieiro, desde a produção agrícola, até o destino final dos resíduos do bagaço da cana de açúcar, bem com os processos de cogeração de energia e fixação de CO₂ que dão origem a cinza do bagaço de cana de açúcar.

Figura 4. Ciclo da Cana de Açúcar



FONTE: adaptado de TEREOS, 2018

Para cada tonelada de cana-de-açúcar, 260 kg de bagaço são gerados com 50% de umidade, isso faz com que o bagaço da cana-de-açúcar seja o maior resíduo da agroindústria brasileira (CORTEZ et al., 1992). Estima-se que, a cada ano, de 5 a 12 milhões de toneladas deste material não seja utilizada, correspondendo a aproximadamente 30% da cana moída. Cerca de 60 a 90% deste bagaço é utilizada pelas próprias usinas como fonte energética, substituindo o óleo combustível no processo de aquecimento das caldeiras e para a geração de energia elétrica (FAPESP, 2008).

Com o objetivo de diminuir problemas associados à gestão de resíduos e a emissão de gases poluentes a atmosfera, aliado à composição química adequada da cinza do bagaço, diversos estudos veem comprovando vantagens nas propriedades dos materiais cimentícios utilizando a cinza como aditivo mineral, portanto, nos próximos capítulos serão introduzidas tais características.

4. CONCRETO

Concreto é um material heterogêneo composto por uma mistura de cimento, água, agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia), podendo

conter aditivos e/ou adições. Em seu estado fresco é considerado plástico e pode ser moldado obtendo a forma e dimensões variadas. Já no estado endurecido tem elevada resistência a compressão, porém baixa resistência a compressão.

4.1. ELEMENTOS COMPONENTES DO CONCRETO

4.1.1. Cimento

O cimento Portland, mundialmente conhecido, foi descoberto na aproximadamente em 1824, e a produção industrial iniciou após o ano de 1850. O cimento Portland é um material pulverulento fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais (ABCP, 2002).

O cimento é o elemento mais importante que compõe os concretos e também o responsável pelo endurecimento da mistura de materiais que compõem o concreto (BASTOS, 2006).

O cimento é composto de clínquer e adições, sendo o clínquer o principal componente, presente em todos os tipos de cimento (Figura 5). O clínquer tem como matérias-primas básicas o calcário e a argila. A propriedade básica do clínquer é que ele é um ligante hidráulico, que endurece em contato com a água (BASTOS, 2006).

Figura 5: Clínquer para a fabricação de cimento.



Fonte: Bastos, 2006.

Para a fabricação do clínquer, a rocha calcária inicialmente britada e moída é misturada com a argila moída. A mistura é submetida a um calor intenso de até 1450°C e então bruscamente resfriadas, formando pelotas (o clínquer). Após processo de moagem, o clínquer transforma-se em pó (BASTOS, 2006).

As adições são matérias-primas misturadas ao clínquer no processo de moagem, e são elas que definem as propriedades dos diferentes tipos de cimento. As principais adições são o gesso, as escórias de alto-forno, e os materiais pozolânicos e carbonáticos (BASTOS, 2006).

Os tipos de cimento que existem no Brasil diferem em função da sua composição, como o cimento Portland comum, o composto, o de alto-forno, o pozolânico, o de alta resistência inicial, o resistente a sulfatos, o branco e o de baixo calor de hidratação. Dentre os diferentes tipos de cimento listados na Tabela 1, os de uso mais comuns nas construções são o CII E-32, o CII F- 32 e o CIII-40. O cimento CPV-ARI é também muito utilizado em fábricas de estruturas pré-moldadas. (BASTOS, 2006).

4.1.2. Agregados Miúdos

Os agregados podem ser definidos como os “materiais granulares e inertes que entram na composição das argamassas e concretos” (BAUER, 1979). São muito importantes no concreto uma vez que cerca de 70 % da sua composição é constituída pelos agregados, e são os materiais de menor custo dos concretos.

As areias (Figura 6) são agregados miúdos provenientes de processos naturais ou ainda artificiais que promovem a desintegração de rochas, também podem ser originados de processos industriais. Sua nomenclatura varia de acordo com a forma de obtenção, se for resultante da ação de agentes da natureza: areia natural; se for proveniente de processos industriais: areia artificial; se de processo de reciclagem e/ou britagem: areia reciclada; e de areia britada quando for proveniente de cominuição mecânica da rocha (NBR 9935, 2011).

Figura 6: Agregado natural miúdo (areia).



Fonte: (BASTOS, 2006).

4.1.3. Agregados Graúdos

As britas são os agregados graúdos mais usados no Brasil, com uso superior a 50 % do consumo total de agregado graúdo nos concretos (MEHTA & MONTEIRO, 1994). No passado era comum a mistura de britas 1 e 2 para a confecção de concretos, porém, hoje no Brasil, a grande maioria dos concretos feitos para as obras correntes utiliza apenas a brita 1 (Brita com dimensão máxima característica igual a 19 mm) na sua confecção.

Os agregados podem também ser classificados em leves, normais e pesados. As britas normais (Figura 7) são geralmente obtidas pela trituração de rochas, como basalto, gnaiss e granito.

Figura 7: Pedra Brita.



Fonte: (BASTOS, 2006).

4.1.4. Água

A água é necessária no concreto para possibilitar as reações químicas do cimento, chamadas reações de hidratação, que irão garantir as propriedades de resistência e durabilidade do concreto. Tem também a função de lubrificar as demais partículas para proporcionar o manuseio do concreto. Normalmente a água potável é a indicada para a confecção dos concretos (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

4.1.5. Aditivos e Adições

A ASTM C-125 admite que qualquer material que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras que seja usado como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura é considerado um tipo de aditivo ou uma adição.

Segundo a NBR 11768 (2011) os aditivos são produtos adicionados durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior que 5% da massa de material cimentício contida no concreto, com o objetivo de modificar no sentido de melhorar as propriedades do concreto no estado fresco e/ou no estado endurecido. Ou seja, o concreto precisa ter, antecipadamente, determinada característica para que o aditivo possa acentuar, retardar, acelerar ou plastificar.

Já as adições, conforme a NBR 12653 (2014), são materiais silicosos ou silicoaluminosos que quando finamente dividido e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Diferentemente do aditivo, que não possui nenhuma característica semelhante. Neste caso, as adições conferem ao concreto propriedades que ele originalmente não tinha.

As adições atuam somando ou substituindo parcialmente o cimento, dadas as suas propriedades semelhantes e, em geral, adiciona-se teor maior ou igual a 5% em relação ao peso do cimento, melhorando significativamente o desempenho do concreto. São materiais extremamente finos, reduzem a

permeabilidade e, conseqüentemente, melhoram a resistência mecânica. Portanto, provocam efeitos permanentes (NBR 12653, 2014).

Visto o alto teor de sílica presente na cinza do bagaço de cana de açúcar pretende-se incorporá-la como adição mineral nos concretos produzidos neste trabalho.

4.2. CINZA POZOLÂNICA COMO ADIÇÃO MINERAL DO CONCRETO

Como a utilização dos resíduos provenientes da cinza do bagaço de cana-de-açúcar é o material utilizado nesta pesquisa, neste item serão abordados aspectos importantes sobre o emprego destes tipos de adições minerais em argamassas e concretos.

As adições minerais vêm sendo empregadas na produção de cimentos há décadas e possuem características intrínsecas que são estudadas por pesquisadores com diversos objetivos, entre elas, o aumento na resistência à compressão do concreto, alterando tanto suas propriedades mecânicas bem como trabalhabilidade, menor custo de produção e, ainda, possibilitam destinar corretamente os resíduos. As adições pozolânicas, tem como característica aumentar a resistência mecânica e provocar um refinamento da estrutura porosa, além, de consumir o hidróxido de cálcio, circunstância que tendência a carbonatação, e conseqüentemente, pode comprometer a vida útil das estruturas em concreto armado (CASCUDO & CARASEK, 2011).

Dois conhecimentos básicos sobre adições ao cimento se dão em relação ao efeito filer (físico) e o efeito pozolânico (químico).

O efeito filer é administrado pela ocorrência de partículas oriundas das adições que refinam a estrutura porosa do concreto se forem utilizadas nas proporções ideais. Sendo assim, ocorre uma redução significativa na quantidade e no tamanho dos poros, eliminando desta forma alguns vazios, e conseqüentemente, gerar um compósito de cimento Portland mais compacto (MORAES, 2001).

Já as adições que possuem características pozolânicas, segundo a NBR 12.653 (ABNT, 2015), classificam-se como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, isolados, não possuem propriedade ligante, no entanto, se finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio

presente na hidratação do cimento Portland à temperatura ambiente, originando compostos com propriedades ligantes.

A reação das adições pozolânicas com o hidróxido de cálcio na presença de água dará origem a compostos hidratados parecidos com os provenientes da hidratação do cimento Portland. O que difere os dois sistemas é que o cimento Portland sozinho é capaz de liberar o hidróxido de cálcio como um subproduto, ao passo que durante a atividade pozolânica irá consumir este subproduto para formar cristais mais resistentes. (HOPPE FILHO, 2008).

A seguir apresentam-se mais com maior rigor as reações ocasionadas pelas ações das pozolanas nos materiais cimentícios.

4.2.1. POZOLANAS

Diversos registros históricos comprovam que pozolanas eram misturadas com água e cal e usadas a cerca de 2000 anos atrás pelos romanos em construções que continuam praticamente intactas até os dias atuais (MASSAZZA, 1998). Alguns exemplos destas construções são o Coliseu construído entre os anos de 80 a 70 a.C. e o Pantheon (118 a 126 d.C.), ambos em Roma.

A construção do Coliseu utilizou-se, como pozolana, um composto aglomerante de Pozzuoli, da ilha grega de Santorim (KLEMM, 1989) já o Pantheon empregou cinzas vulcânicas em suas paredes de concreto (BLEZARD, 1998).

As maiores e mais importantes construções civis no mundo utilizam-se, atualmente, em sua constituição a pozolana. Um importante exemplo de construção, a Usina Hidrelétrica de Itaipu onde a cinza volante foi utilizada.

Diversos subprodutos e resíduos estão se tornando rapidamente uma fonte de aditivos minerais principalmente devido a suas características e tendências ambientais resultando em vantagens econômicas e diminuição da emissão de gases poluentes para a atmosfera, uma vez que as propriedades do material pozolânico podem resultar neste ser usado como substituto parcial do cimento Portland no concreto (Mehta et al., 1994).

4.2.2. REAÇÕES POZOLÂNICAS

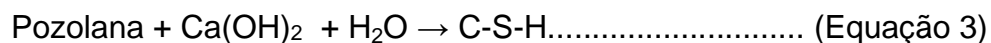
A hidratação do cimento Portland é uma reação química que proporciona uma reação entre os silicatos e aluminatos com água (H), ocorrendo quase que instantaneamente à medida que se adiciona água ao cimento (NEVILLE, 1997).

Os principais constituintes do cimento são: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). O C_3S , é responsável por proporcionar a resistência inicial e gerar o aumento de resistência final da pasta, este apresenta uma rápida hidratação e desprende certa quantidade de calor, sendo, portanto, uma reação exotérmica sua hidratação. O C_2S , por sua vez, é responsável pelo aumento da resistência nas idades avançadas, apresentando uma lenta hidratação e despreendendo baixa quantidade de calor. A hidratação destes dois compostos produz silicato de cálcio hidratado ($C_3S_2H_3$ ou simplesmente C-S-H) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) (NEVILLE, 1997).

As reações e os valores de entalpia estão descritos na Equação 1 e Equação 2.



Acrescentando-se materiais pozolânicos à mistura, durante a hidratação do cimento, a sílica (SiO_2) e/ou alumina (Al_2O_3) amorfas, presentes nestes materiais, reagem com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), liberado na hidratação do cimento, formando C-S-H, conforme apresentado de maneira genérica na Equação 3.



Sendo assim, de forma simplificada, a reação do hidróxido de cálcio com a pozolana pode variar segundo fatores como: conteúdo da pozolana, teor de SiO_2 ativa na mistura, natureza das fases ativas da pozolana, taxa de reação, área superficial da pozolana, relação de sólidos por água e temperatura da

mistura, influenciando, assim, seus efeitos em função da adição a argamassas e concretos (CORDEIRO, 2006).

Os materiais pozolânicos podem ser: sílica ativa, argilas calcinadas, cinza da casca do arroz, cinza volante, cinzas vulcânicas e cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. A seguir serão apresentados detalhes acerca da cinza do bagaço, que foi a pozolana utilizada na pesquisa e sua aplicação a argamassas e concretos.

4.3. APLICAÇÃO DAS CINZAS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM ARGAMASSAS E CONCRETOS

A constante preocupação com a preservação do meio ambiente tem incentivado a busca de diversas alternativas para substituição dos agregados naturais ou do cimento com incorporação de certos resíduos usados na confecção de argamassas e concretos, neste intuito o presente capítulo apresenta uma síntese da utilização do bagaço da cana-de-açúcar como aditivo em argamassas e concretos.

A indústria da construção é apontada pelo Conselho Internacional da Construção (CIB) como o setor de atividades humanas que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, gerando consideráveis impactos ambientais, estes impactos podem ser oriundos da geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção (MMA, 2016).

Neste sentido a indústria de cimento, principal constituinte do concreto, é responsável pela emissão de cerca de 5 a 7% da emissão mundial de dióxido de carbono. Só no Brasil, para cada tonelada de clínquer produzido são liberados na atmosfera pelo menos 700 kg de gás CO₂ (Ali et al 2014); (SNIC, 2010); (Mehta e Monteiro, 2014).

Portanto, torna-se fundamental reduzir-se a utilização destes materiais aglomerantes, neste sentido, a utilização de composto químico, como aditivos minerais proveniente da cinza do bagaço como a sílica surge nesse intuito.

Geralmente, este material apresenta uma quantidade, em massa, acima de 60% de sílica (CORDEIRO, 2006). A composição química da cinza, estudada por diversos autores, evidencia a grande quantidade de sílica: 72,7% (HERNÁNDEZ et al., 1998), 63,2% (SINGH, SINGH e RAI, 2000), 64,5% (GANESAN et al., 2007), 69,7% (FREITAS, 2005), 89,4% (MANSANEIRA, 2010).

Mantendo essa sílica em estado amorfo é possível o emprego deste material como pozolana, dependendo das condições de queima empregadas. A utilização deste material em substituição parcial ao cimento Portland, agregada valor econômico ao resíduo agroindustrial, além de trazer vantagens ambientais e técnicas ao produto gerado (CORDEIRO et al., 2009). Entretanto, é necessário a moagem para se homogeneizar a distribuição granulométrica variável da cinza e aumentar a superfície específica e desta forma, a atividade pozolânica das partículas (CORDEIRO et al., 2008).

Estudos da inclusão da cinza do bagaço como aditivo mineral ainda são iniciais, apesar do longo desenvolvimento da cana-de-açúcar no Brasil. Dentre os estudos realizados cita-se o de Freitas (2005) onde se utilizou as cinzas do bagaço coletadas das caldeiras de duas usinas da região fluminense (Amostras A e B), por meio de ensaios de índice de atividade pozolânica e análises de difração de raios X. Os resultados dos ensaios iniciais mostraram as cinzas *in natura* com pouca pozolanicidade e com presença de material cristalino. Com isso, a autora optou por um estudo de tempo (4, 5 e 6 horas) e temperatura (500, 600 e 700°C) de calcinação. A partir dos ensaios, selecionou-se a Amostra A calcinada a 600°C por 5 horas para passar pelo estudo de moagem (30 minutos, 1, 2, 3 e 4 horas) com o objetivo de tornar a cinza mais reativa. Apesar do melhor tempo de moagem ter sido 3 horas (107%), a autora selecionou o tempo de 1 hora (102%) para a realização dos ensaios mecânicos com argamassas com diferentes teores de substituição de cimento pela cinza, por conta da pequena variação e do menor gasto de energia.

Do mesmo modo, Cordeiro (2006) com o objetivo de analisar a viabilidade da utilização da cinza residual ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar como aditivo mineral em concretos de resistência convencional e de alto desempenho. Foram produzidos cinzas em processos de queima e moagem controladas, em

que foram selecionadas duas, com base na atividade pozolânica e no consumo de energia. Sendo assim, comparou-se as propriedades reológicas e mecânicas entre concretos de cimento Portland e as cinzas, com teores de substituição do cimento de 0, 10, 15 e 20%. Entre as conclusões, pode-se constatar que a cinza ultrafina do bagaço proporcionou redução na absorção por capilaridade e na penetração acelerada de íons cloreto devido à atividade pozolânica e o refinamento de poros proporcionados pela cinza.

Ganesan et al. (2007) estudaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como substituta do cimento Portland sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto endurecido. Os ensaios realizados foram: resistência à tração e à compressão, absorção de água, permeabilidade e resistência à penetração de íons cloreto. Entre as conclusões destacaram-se que 20% foi o teor ótimo de substituição de cimento pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Souza et al. (2007) utilizaram cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar, com índice de atividade pozolânica de 86%, em substituição parcial ao cimento na produção de três traços de argamassas (um padrão e outros dois com substituição de 10% e 20% do cimento por CBC) e caracterizaram experimentalmente no estado endurecido. Os resultados experimentais mostram que ambos os traços produzidos com substituição parcial do cimento por CBC tiveram desempenho igual ou superior quanto à resistência à compressão do traço padrão na idade de 28 dias (25,6 Mpa de média), comprovando que o material é eficaz para o teor de substituição.

Cordeiro et al. (2008) investigaram os efeitos físicos e químicos de uma cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades de argamassas. Inicialmente foi analisada a influência do tamanho das partículas da CBC na resistência à compressão, grau de empacotamento das partículas, índice de atividade pozolânica e o teste de Chapelle modificado. Posteriormente, foram comparados os desempenhos de argamassas contendo CBC e quartzo moído, um material insolúvel, de baixa reatividade e mesmo teor de empacotamento. Entre os resultados, destaca-se que a cinza com maior finura apresentou o maior grau de empacotamento, gerando uma argamassa com maior resistência à compressão e atividade pozolânica. Além disso, no teste de atividade pozolânica, a resistência à compressão da argamassa com CBC foi 31% maior

que a resistência da argamassa com quartzo moído. Os resultados sugeriram que a CBC apresenta propriedades físico químicas adequadas para a sua utilização com aditivo mineral e sua reatividade depende do tamanho e finura das partículas.

Cordeiro et al. (2009) investigaram o papel do tipo de moinho e circuito de moagem em laboratórios, área superficial e atividade pozolânica de CBC. Entre os resultados encontrados, destaca-se que a granulometria de valores de D_{80} abaixo de 60 μm e áreas de superfície específica de Blaine acima de 300 m^2/kg resultaram em produtos que podem ser classificados como pozolânicos independentemente do tipo e configurações de moagem. Além disso, a substituição parcial de cinzas ultrafinas por cimento (10, 15 e 20% em massa) em um concreto de alto desempenho não alterou de forma mensurável o comportamento mecânico, mas melhorou a reologia e a resistência à penetração de íons cloreto.

Cordeiro et al. (2009) estudaram o processo de queima e caracterização de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar com alta reatividade. No estudo foram testadas, em forno tipo Mufla, diferentes temperaturas de calcinação com o objetivo de obter uma cinza com sílica amorfa e baixo teor de carbono. Entre as conclusões destaca-se que a cinza calcinada, em forno mufla, à temperatura de 600°C durante 3 horas, após um patamar de 3 horas a 350°C (taxa de aquecimento 10°C/min) apresentou-se favorável em relação à presença de sílica amorfa, baixo teor de carbono e elevada área de superfície específica.

Morales et al. (2009) estudaram a influência das condições de queimas (a temperatura de 800 e 1000°C) de cinzas ultrafinas do bagaço de cana sobre as suas características microestruturais. Entre os resultados destacam-se a alta atividade pozolânica apresentada pelas cinzas calcinadas e a influência da calcinação na composição química e na morfologia das cinzas.

Chusilp et al. (2009) pesquisaram sobre as propriedades físicas do concreto contendo cinza do bagaço de uma fábrica de açúcar, incluindo a resistência a compressão, permeabilidade a água e liberação de calor. As cinzas foram usadas como substitutas do cimento em proporções de 10, 20 e 30%. Concluiu-se que a cinza do bagaço é um material adequado para uso como pozolana na confecção de concretos, de acordo com os seguintes resultados:

- A elevação da temperatura foi menor para o concreto com 30% de substituição e menor para o de 10% de substituição (comparando apenas os concretos com cinzas). Percebe-se assim, que quanto maior a proporção de cinza menor a liberação de calor.

- A fração ideal de substituição de cimento por cinza é de 20%, onde o concreto apresentou a maior resistência à compressão aos 28, sendo estas de 28 Mpa, uma baixa permeabilidade e liberação de calor, se comparado ao concreto de referência.

Desta forma, observa-se uma variação significativa dos percentuais de aditivos orgânicos adicionados a composição do concreto, estando geralmente entre 0 a 50% de substituição/adição, apresentando bons resultados a compressão e a tração dos concretos e argamassas. Portanto torna-se viável a utilização de tais aditivos uma vez que se tem ganho em suas propriedades mecânicas, bem como estes proporcionam um menor impacto ambiental.

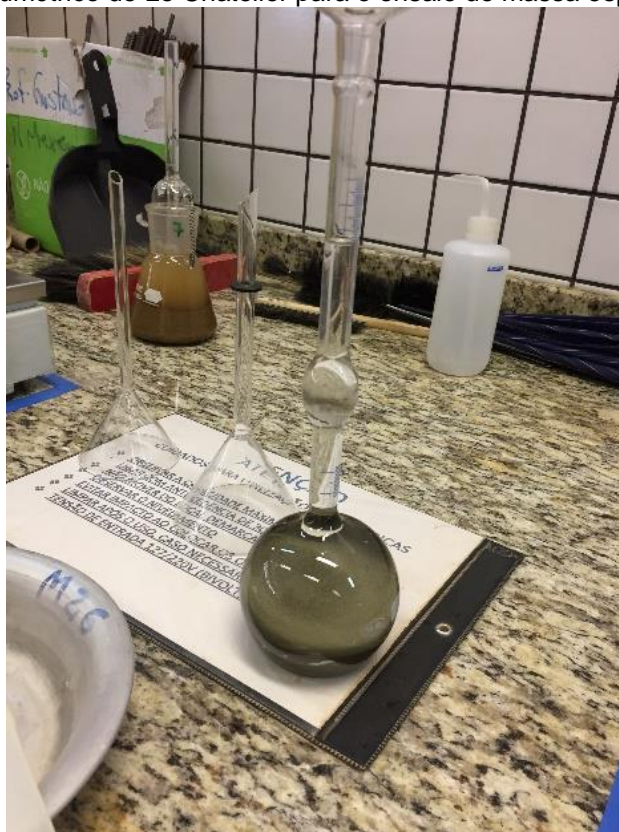
5. METODOLOGIA DE PESQUISA

Nesta etapa do trabalho são descritos os materiais empregados e os procedimentos metodológicos para o cumprimento dos objetivos anteriormente especificados.

5.1. CIMENTO

Para a pesquisa o cimento adotado foi o cimento Portland composto com pozolana (CPII - Z) tendo em vista sua comercialização na região sul do Brasil. A caracterização do material, para o cimento adotado nesta pesquisa, foi realizada por meio de análises em laboratório e procedimento padrão, feitos em conformidade com a NBR NM 23 (ABNT, 2001) que define como massa específica do cimento Portland a massa de unidade de volume do material. Os equipamentos necessários para a realização do ensaio são: frasco volumétrico de Le Chatelier, balança, recipiente e termômetro (Figura 8).

Figura 8: Frasco Volumétrico de Le Chatelier para o ensaio de massa específica do cimento.



Fonte: Autora.

A amostra a ser avaliada foi submetida a abertura da peneira de 150 mm, após isto o frasco de Le Chatelier foi preenchido com querosene até o nível zero indicado no frasco, registrando a primeira aferição (V_1). Então, adicionou-se a massa da amostra (m) em pequenas porções e após a estabilização, registrou-se a segunda leitura (V_2) e procedeu-se para o cálculo por meio da Equação 4.

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (\text{Equação 4})$$

M = Massa da amostra

V1 = Primeira leitura

V2 = Segunda leitura

5.2. AGREGADO MIÚDO E AGREGADO GRAÚDO DO CONCRETO

A granulometria dos agregados miúdo e graúdo foi determinada utilizando o ensaio de composição granulométrica com uso de peneiras com diferentes aberturas de malhas NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para realizar a dosagem do concreto pelo método da ABCP, é necessário o Módulo de Finura (MF) da areia e o Diâmetro Máximo Característico (DMC) da brita. Sendo assim a NM 248/2003 define como módulo de finura a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, considerando somente as peneiras da série normal, dividida por 100.

O diâmetro máximo característico é dado pela máxima abertura da peneira, de série normal ou intermediária, onde apresenta uma porcentagem igual ou inferior a 5% da amostra em massa retida (ABNT, 2003).

De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) os equipamentos necessários para a realização do ensaio são a balança, estufa, peneiras da série normal e intermediária, agitador mecânico de peneiras e pincel. Nas Figura 9 e Figura 10 e são apresentados o agitador mecânico e o conjunto de peneiras necessárias para o ensaio de composição granulométrica dos agregados. Foram utilizadas as peneiras com abertura de malha 9,5, 6,3, 4,75, 2,36, 1,18, 0,6, 0,3

e 0,15 milímetros para a caracterização do agregado miúdo (Figura 9) e 19, 12,5, 9,5 e 6,3 milímetros para a caracterização do agregado graúdo (Figura 10).

Figura 9: Agitador mecânico do agregado miúdo.



Fonte: Autora.

Figura 10: Agitador mecânico do agregado graúdo.



Fonte: Autora.

Com o material seco em estufa, colocou-se a amostra nas peneiras e agitou-se com o agitador mecânico. Após a agitação, pesou-se a massa retida em cada peneira. Com estes dados obtidos, foi possível calcular as porcentagens retidas e retidas acumuladas. Com os dados da massa retida nas peneiras, obteve-se o módulo de finura da areia e o diâmetro máximo característico da brita.

O agregado miúdo utilizado na produção dos concretos foi a areia natural proveniente da jazida do Rio Paraná na altura da cidade de Guaíra-PR. Para tornar possível sua caracterização a mesma foi seca em estufa no laboratório de Engenharia Civil da UTFPR câmpus Toledo, à temperatura de 100 °C +/- 5°C e o seu resfriamento foi feito à temperatura ambiente, dentro de tambores isolados de umidade e de fontes de calor.

5.3. ADITIVO

Utilizou-se o aditivo superplastificante Adiment Premium, à base de Éter policarboxilato, fabricado pela Otto Baumgart Indústria e Comércio S/A. As especificações foram fornecidas pelo fabricante que indicam a utilização de 1% a 3% sobre a massa de cimento (de 280 mL a 900 mL de aditivo para cada 100 kg de cimento).

5.4. ÁGUA

A água de amassamento foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Toledo - PR, fornecida pela empresa Companhia de Saneamento do Paraná.

5.5. ADIÇÕES

5.5.1. Cinza do Bagaço de Cana-De-Açúcar

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi oriunda da Usina Cooperativa Agrícola Regional de Produtores de Cana Ltda – COOPCANA, com sede no município de São Carlos do Ivaí no Paraná.

O material utilizado, apresentado na Figura 11, foi coletado do tanque de decantação (cinzas volantes + cinzas pesadas). Para a queima do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia se atinge uma temperatura entre 750 e 800 °C. Utilizou-se a CBC *in natura*, apenas realizou-se o peneiramento da mesma utilizando uma peneira com malha de 2mm, para a retirada de material grosseiro, descartando a sobra da peneira. Em seguida a CBC foi submetida a uma temperatura de 100°C +/- 5°C na estufa durante 24 horas para posteriores análises.

Figura 11. Cinza *in natura* após secagem em estufa.



Fonte: Autora.

5.5.2. Caracterização física da CBC

Para a caracterização física da CBC são realizadas as análises de massa específica, umidade, difração de raios X (DRX) utilizando o aparelho da marca e modelo Philips Analytical X-ray - X'Pert-MPD da cinza *in natura*.

Para a análise termogravimétrica (TGA) foi usado como gás o N₂ com fluxo ascendente, a uma vazão de 50 mL/min. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/min até 900 °C, com faixa de temperatura de 30 a 900 °C.

Para o DRX foi usado um ângulo de varredura que variou de 5° a 80° (2θ), incremento de 0,02°/s.

5.5.3. Adsorção do chumbo

Para esta etapa foi necessário analisar uma amostra de referência para a determinação da pré-existência de chumbo na CBC. Para tanto, obteve-se uma amostra da CBC *in natura* com água destilada que foi submetida a agitação mecânica de 100 rpm durante 24 horas, posteriormente foi realizada a filtração da CBC e a separação das fases.

As amostras de CBC *in natura* de 0,50 gramas, previamente secas em estufa, foram submetidas a soluções de nitrato de chumbo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) (foi utilizado o reagente analítico da marca VETEC com grau de pureza em 99%) em triplicatas sob as diferentes concentrações: 100, 200 e 500 mg.L^{-1} de chumbo (Pb^{+2}). A relação sólido-líquido utilizada nesta etapa foi de 0,02 g de CBC por mL de solução.

As amostras de CBC foram imersas nas soluções contendo o chumbo e posteriormente submetidas a agitação mecânica de 100 rpm durante 24 horas, realizando o controle do pH aproximadamente em 5,00 conforme Paz, Garnica e Curbelo. (2018) Em seguida, realizou-se a filtração das mesmas e a separação das cinzas adsorvidas e do sobrenadante.

Para garantir que o chumbo da solução foi adsorvido pelas CBC foi realizada a abertura tanto das amostras *in natura* quanto das com chumbo adsorvido. Este processo consistiu na dissolução do material por via úmida utilizando ácido nítrico com pureza de 65%, capaz de decompor os compostos orgânicos e inorgânicos nos elementos constituintes da amostra, ficando em solução apenas os elementos solúveis em meio ácido. Neste caso levou-se em consideração o chumbo presente na solução. Para a quantificação de chumbo as amostras foram novamente ensaiadas em laboratório por meio da espectrometria de absorção atômica modalidade chama (EAA/Chama) com curva padrão certificada para o chumbo (GBC 932 AA) (WELZ e SPERLING, 2008)

5.6. INCORPORAÇÃO DA CBC COM E SEM CHUMBO NO CONCRETO

Para a obtenção de resultados referente a influência das adições de CBC com e sem cinza no concreto foram realizados traços variando as proporções

desta adição e também em consequência de parte das adições conterem chumbo e parte não.

A concentração adotada neste estudo foi de 200 mg.L⁻¹ de chumbo para a solução utilizada nas amostras, foi realizada a adsorção de 6 kg de CBC. Esta concentração foi utilizada mediante as análises de adsorção realizadas anteriormente, indicando que nesta quantidade, praticamente todo o chumbo foi adsorvido. A produção de concreto foi feita com as mesmas proporções de substituição de cimento tanto para a CBC *in natura* quanto para a CBC com chumbo adsorvido.

As nomenclaturas adotadas neste estudo possuem as iniciais CP que significam corpos de prova, com as iniciais Pb²⁺ para as que utilizaram CBC adsorvida com chumbo e seguidas da identificação da porcentagem de substituição de CBC, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Nomenclatura dos corpos de prova estudados.

	Corpo de Prova	%CBC em relação a massa de cimento		Corpo de Prova	%CBC/Pb ²⁺ em relação a massa de cimento
GRUPO I	CP- 0	0	GRUPO II	CPPb- 0	0
	CP- 5	5		CPPb- 5	5
	CP-10	10		CPPb-10	10
	CP-15	15		CPPb-15	15
	CP-20	20		CPPb-20	20

Fonte: Autora.

Cada uma das porcentagem de CBC foi incorporada na mistura mantendo o traço adotado, em proporções de massa: 1:1,49:4,00:0,42 (cimento, areia, brita e água) com uma porcentagem de aditivo superplastificante de 3% em relação a massa de cimento. Para a produção dos concretos desenvolvidos nesse estudo foram utilizadas as quantidades que compõem a Tabela 2.

Tabela 2. Composição dos traços em massa

Amostra	Cimento (g)	Agreg. Miúdo (g)	Agreg. Graúdo (g)	Água (g)	Aditivo (g)	CBC* (g)
Concreto 0%	6000	8940	24000	2520	18	-
Concreto 5%	6000	8940	24000	2520	18	300
Concreto 10%	6000	8940	24000	2520	18	600
Concreto 20%	6000	8940	24000	2520	18	1200

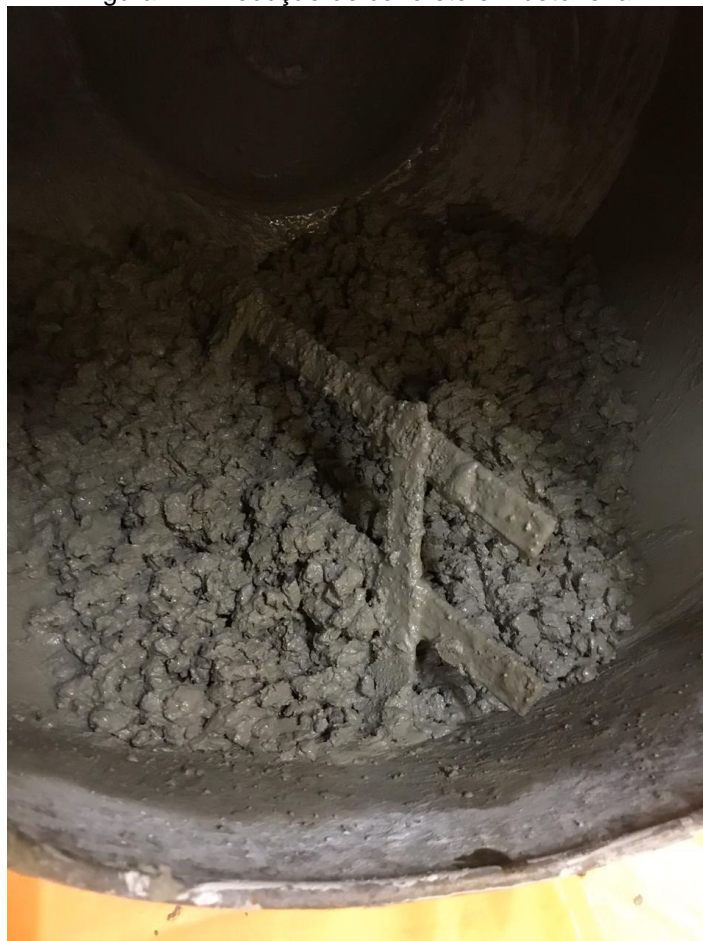
Nota 1: CBC* esta massa será utilizada tanto para a CBC *in natura* quanto para a CBC adsorvida com chumbo.

Fonte: Autora.

5.6.1. Produção do concreto

Inicialmente foi feita a imprimação da betoneira, que consiste em realizar um pequeno volume de concreto na betoneira utilizando o mesmo traço do estudo. Este procedimento é realizado para evitar que a primeira produção de concreto ou argamassa tenha a relação de água/cimento alterada em virtude de uma possível absorção da água de amassamento pelo equipamento. Após operar por cinco minutos a mistura, ela foi descartada e então o concreto em estudo pôde ser produzido na sequência. Baseado no procedimento descrito em Bauer (2000), para a mistura, a ordem de despejo dos materiais na betoneira e o tempo de mistura de aproximadamente 6 minutos foram respeitados, garantindo a obtenção de uma massa homogênea. Depois de realizar a mistura de cada traço conforme mostra a Figura 12, foi realizado o *Slump test* e sequencialmente foram moldados os corpos de prova conforme NBR 5738 (ABNT, 2015).

Figura 12. Produção de concreto em betoneira.



Fonte: Autora.

5.6.2. Ensaio de Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone

Foi realizado o ensaio que testa o abatimento do tronco de cone preconizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) e tem como fim verificar as condições de trabalhabilidade de cada concreto desenvolvido.

Segundo a norma, o molde do corpo de prova deve ser um tronco de cone oco, com diâmetro da base inferior igual a 200 mm, diâmetro da base superior de 100 mm e altura de 300 mm; e ainda a haste de compactação de 16 mm de diâmetro com 600 mm de comprimento, bem como a placa de base com lados de 500 mm e espessura de 3 mm, apresentados na Figura 13.

Figura 13. Equipamentos para a realização do Slump test.



Fonte: Autora.

Este ensaio orienta umedecer o molde e a placa de base, em seguida a molde deve ser posicionado sobre a placa da base e o preenchimento do molde deve ser feito em três camadas aproximadamente iguais, cada uma delas deverá ser compactada uniformemente com a haste de compactação. Posteriormente,

o molde deverá ser lentamente retirado respeitando-se uma duração de 5 a 10 segundos. Após a retirada, deverá ser feita a diferença entre a altura do molde e a altura média do corpo de prova desmoldado.

5.6.3. Moldagem dos corpos de prova para ensaio de resistência a compressão axial

A moldagem dos corpos de prova de concreto foi realizada conforme a NBR 5738:2015 VERSÃO CORRIGIDA (ABNT, 2016), em que foram utilizados moldes de aço com formato cilíndrico com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, conforme a Figura 14.

Figura 14. Corpo de prova cilíndrico.



Fonte: Autora.

Anteriormente a moldagem dos corpos de prova, os moldes e suas bases devem ser revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral ou outro lubrificante inerte ao cimento.

O concreto foi colocado de maneira uniforme com o auxílio de uma concha, dividindo-se em duas camadas com adensamento manual de 12 golpes feitos com a haste, conforme a preconização normativa.

Posteriormente, foi feito o arrasamento da superfície com a borda do molde, com o auxílio de uma colher de pedreiro. O desmolde dos corpos de prova foram realizados em 24 horas, em seguida, foram levados para o tanque de cura onde ficaram submersos em uma solução saturada de hidróxido de cálcio a aproximadamente $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95 %. Ficando

aconicionados em local sem exposição a gotejamento nem à ação de água em movimento.

5.6.4. Moldagem dos corpos de prova para ensaio de lixiviação do chumbo

Para a execução do ensaio de lixiviação foram moldadas placas de concreto utilizando um molde conforme a Figura 15 com dimensões de 15 cm x 15 cm e 3 cm de altura. Ainda, conforme a Figura 15 é possível observar que as frestas entre as formas foram vedadas com silicone para garantir que não houve perda da água de amassamento, o que alteraria a relação água/cimento.

Figura 15. Formas para corpos de provas das placas de concreto.



Fonte: Autora.

O concreto foi colocado nas formas conforme pode ser visualizado na Figura 16 e adensado manualmente com a ajuda de um soquete metálico, o desmolde foi feito depois de 24 horas, conforme pode-se ver as placas de concreto já desmoldadas na Figura 17 e submetido a cura durante 28 dias para posterior realização de ensaio de lixiviação.

Figura 16: Concreto fresco nos moldes de placas para ensaio de Permeabilidade.



Figura 17: Placa de concreto desmoldada após 24 horas (vista lateral).



Fonte: Autora.

5.7. ENSAIOS REALIZADOS COM O CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

5.7.1. Absorção de água por imersão

Após os 28 dias de cura, 3 corpos de prova de cada dosagem de concreto foram separados para o ensaio de absorção de água por imersão. De acordo com as prescrições da norma NBR 9778 (ABNT, 2009), o coeficiente de absorção é dado pela Equação 5.

$$\left(\frac{M_{sat}-M_s}{M_s}\right) * 100 \quad (\text{Equação 5})$$

M_{sat} = massa do corpo de prova saturado;

M_s = massa do corpo de prova seco em estufa.

5.7.2. Resistência a compressão

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) na idade de 28 dias. Para a distribuição uniforme da carga aplicada pelo equipamento os corpos de prova foram retificados em retifica automática conforme o prescrito pela normativa para a realização do ensaio de resistência à compressão que é apresentado na Figura 18.

Figura 18. Prensa hidráulica para obtenção da resistência a compressão.



Fonte: Autora.

5.7.3. Resistência a tração por compressão diametral

Quando ocorrem solicitações que provocam a tração, as fissuras se propagam na matriz e a zona de transição ocorre a um nível de tensão muito menor do que quando sob a tensão de compressão. Além disso, o aumento da resistência a compressão implica diretamente no aumento da resistência a compressão.

As prescrições da NBR 7222 (1983) foram utilizadas nesse trabalho para determinar a resistência a tração do concreto por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. A Figura 19 ilustra a realização do ensaio descrito.

Figura 19: Ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: Autora.

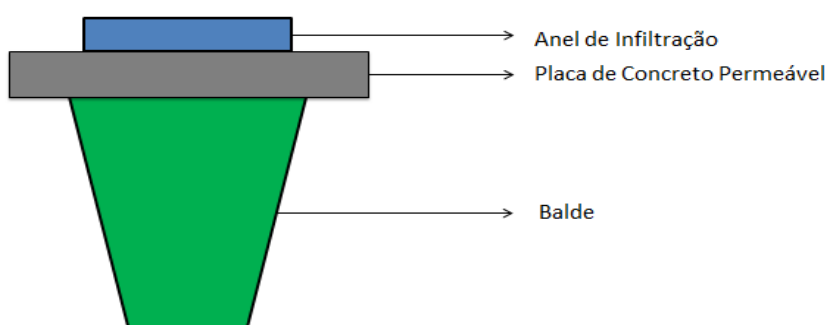
5.7.4. Coeficiente de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade do concreto foi realizado conforme a NBR 16416 (2015), ao passo que foram realizadas algumas adaptações exclusivamente para possibilitar a realização do ensaio neste estudo.

Para isso foram utilizadas placas do dimensões 15 cm x 15 cm e 3 cm de altura, a área das placas foram adaptadas para um menor desperdício de material. Portanto, as placas não seguiram a área mínima imposta pela NBR, porém, as proporções foram mantidas.

Sobre as placas foram fixadas um anel de infiltração conforme exposto na Figura 20. A fixação foi feita com massa epóxi bicomponente para evitar que a água de infiltração vazasse. Em seguida foram feitas duas linhas internas de referência uma a 10 mm e 15 mm em relação à face inferior do anel. A água foi medida uma vez na balança com resolução de 0,1g. O recipiente utilizado para captação da água permeada possuía capacidade de 20 litros. Para as medições de tempo utilizou-se um cronômetro. O esquema utilizado no ensaio encontra-se na Figura 20.

Figura 20: Ilustração da configuração dos materiais utilizados no ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autora.

Foi realizada uma pré molhagem na placa, apoiada em cima do recipiente e em seguida foi despejado água destilada na placa de concreto permeável, de forma constante, mantendo o nível de água pelo maior tempo possível entre as marcações do anel de infiltração recomendadas pela normativa, conforme a Figura 21.

Figura 21: Ensaio de coeficiente de permeabilidade sendo realizado.



Fonte: Autora.

5.8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A NBR 5739 (ABNT, 2007), determina um método de avaliação estatística de desempenho, a fim de identificar a dispersão dos resultados devido às operações de ensaio. Para isso, primeiramente deve-se calcular o desvio padrão dentro do ensaio, utilizando da Equação 6.

$$S_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_{2,n}} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

A_i: Amplitude de valores de resistência, em megapascals;

N: O número de exemplares da amostra;

d₂: Coeficiente tabelado de acordo com quantidade de corpos de prova

A partir do desvio padrão (S_e), calcula-se o coeficiente de variação dentro do ensaio, utilizando da Equação 7.

$$cv_e = \frac{S_e}{f_{cm}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

cve: Coeficiente de variação de ensaios de resistência à compressão de corpos de prova de concreto em porcentagem;

f_{cm}: Resistência média em megapascal.

Dessa forma é possível avaliar o coeficiente de variação dos ensaios por meio dos intervalos apresentados na Tabela 3, podendo variar de excelente a deficiente.

Tabela 3: Avaliação do nível de qualidade do ensaio em função do coeficiente de variação

Coeficiente de Variação (cv _e)				
Nível 1 (Excelente)	Nível 2 (Muito Bom)	Nível 3 (Bom)	Nível 4 (Razoável)	Nível 5 (Deficiente)
cv _e ≤ 3,0	3,0 < cv _e ≤ 4,0	4,0 < cv _e ≤ 5,0	5,0 < cv _e ≤ 6,0	cv _e > 6,0

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2007)

Além da análise dos desvios e do coeficiente de variação, os resultados dos ensaios experimentais passaram por Análise de Variância, ANOVA, utilizando do programa ASSISTAT pelo parâmetro F de Levene e pelo teste a posteriori de Tukey, sendo os valores determinados neste estudo a um nível de

5% de probabilidade, ou seja, 95% de confiabilidade dos dados para ambas as análises.

3.8.2 Análise de Variância (ANOVA)

A Análise de Variância (ANOVA) é um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos e devido aos diferentes tipos de experimentos que podem ser realizados, existem muitas variações da ANOVA.

Analisando a possibilidade da aplicação de testes neste trabalho, tem-se que os lotes ensaiados aos três dias de idade não são possíveis de comparação da ANOVA por não possuírem mais que duas formas de tratamento. Já aqueles ensaiados aos sete e aos 28 dias puderam ser submetidos aos testes por possuírem 3 e 4 tratamentos, respectivamente.

Ao realizar o teste da ANOVA, tem-se que no mínimo um par das médias é distinto, mas não é possível identificar qual(is). Portanto após concluir-se que existe uma diferença significativa entre tratamentos, por meio do teste F, avalia-se a magnitude destas diferenças utilizando um teste de comparações múltiplas. O teste Tukey (TSD – Tukey Significant Difference) é um dos testes de comparação de médias mais utilizados, por ser bastante rigoroso e de fácil aplicação. O teste Tukey é utilizado para testar toda e qualquer diferença entre duas médias de tratamento e é aplicado quando o teste “F” para tratamentos da ANOVA (análise de variância) for significativo.

6. RESULTADOS

6.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO AGLOMERANTE E AGREGADOS

6.1.1. Cimento

Foi utilizado o cimento Portland CII – Z – com adição de material pozolânico, Segundo a NBR 11578:1991 Cimento Portland Composto - Especificação (ABNT, 1991), o cimento composto é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland (produto constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio), e da adição de sulfato de cálcio. Podendo ainda, ser constituído de materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores especificados em norma.

O cimento CP II-Z-32 é classificado como cimento composto com pozolana, sendo que, a classe 32 representa o mínimo de resistência à compressão aos 28 dias de idade, sendo o limite inferior de 32 MPa e limite superior de 49 MPa (ABNT, 1991).

Foi realizado o ensaio de massa específica para o cimento e obteve-se o resultado de 2,96g/cm³.

6.1.2. Agregado Miúdo

Realizando o ensaio de massa específica aparente do agregado miúdo conforme NBR 52 (ABNT, 2009) obteve-se o valor de 2,638 g/cm³

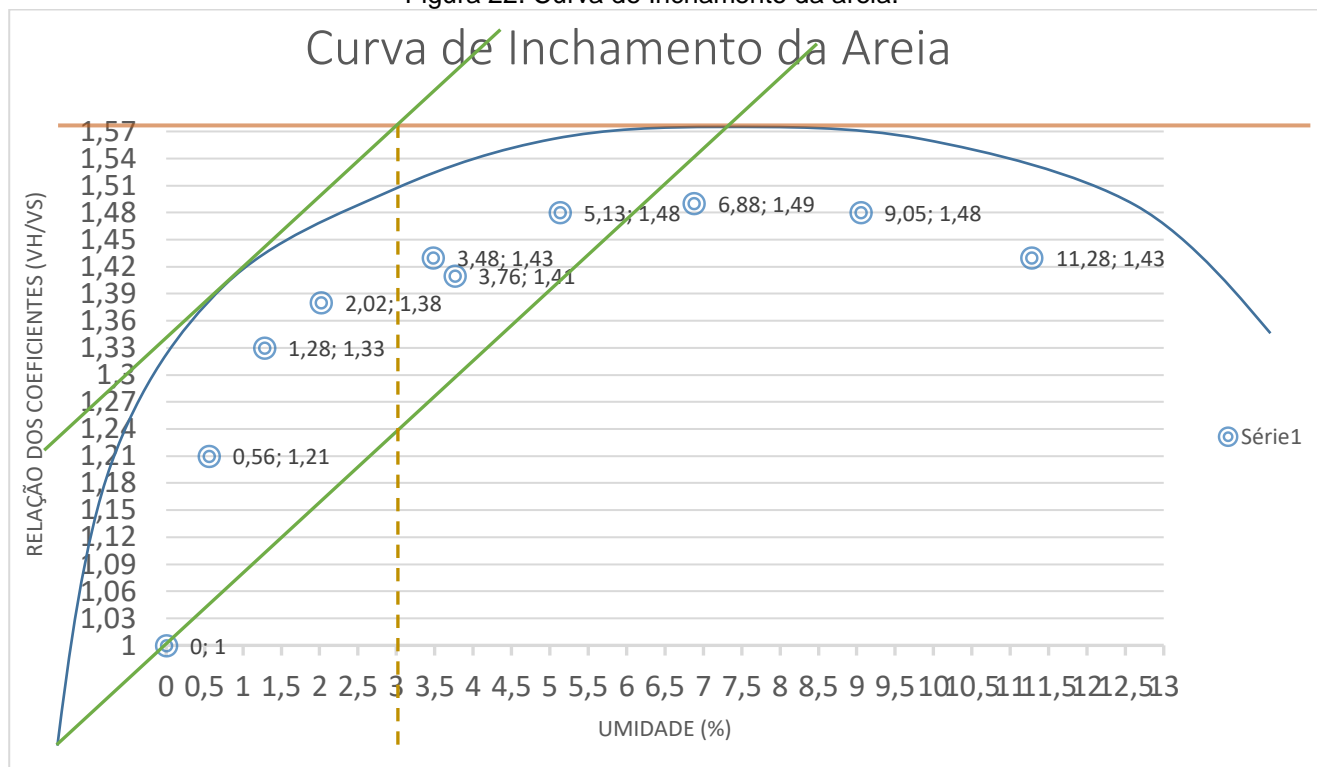
Já o valor determinado para a massa unitária foi de 1,607g/cm³, por meio da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A porcentagem obtida no ensaio de material pulverulento foi elevada, ou seja, no valor de 4,80%, podendo prejudicar a trabalhabilidade e a aderência entre a pasta e o cimento, podendo promover danos na resistência mecânica.

Também foi realizado o ensaio de inchamento da areia, resultando a umidade real, coeficiente de inchamento e coeficiente médio de inchamento.

A curva do inchamento da areia apresentada na Figura 22, com o teor de umidade versus o coeficiente de inchamento, por meio da análise da curva é possível determinar o valor de 3,2% para a umidade crítica do material e o coeficiente médio de inchamento no valor de 46%.

Figura 22. Curva de Inchamento da areia.



FONTE: Autora, 2019.

Para a composição granulométrica determinada por meio da NBR 248 (ABNT, 2003) realizou-se o ensaio de uma amostra de 500 gramas de areia natural que resultou em porcentagens retidas e acumuladas que estão dispostas na Tabela 4.

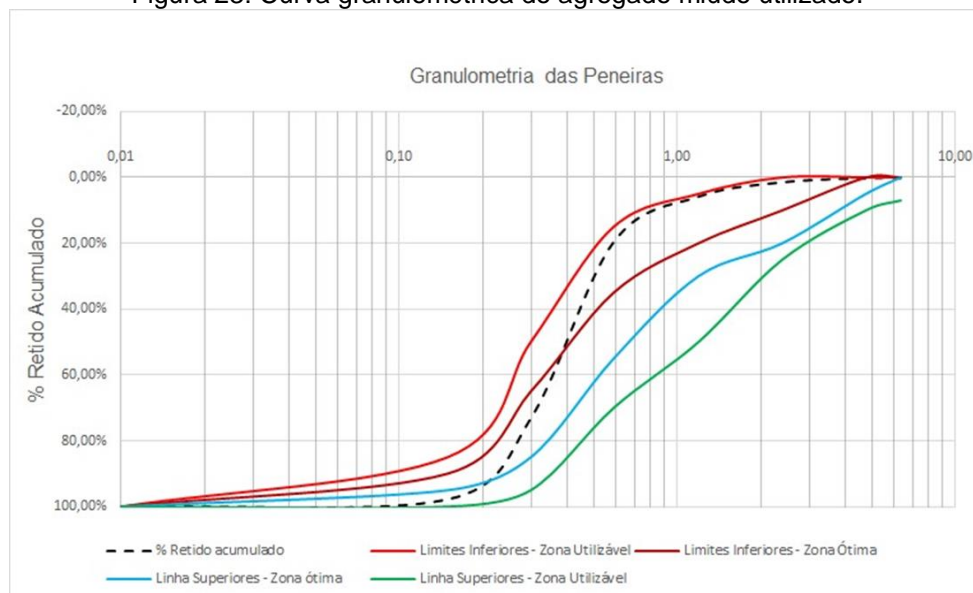
Tabela 4. Granulometria dos agregados miúdos.

Peneiras	Retido (g)	% Retido	% Retido acumulado
6,35 mm	0	0	0
4,76 mm	0,4	0,08	0,08
2,38 mm	6,3	1,26	1,34
1,19 mm	21,7	4,34	5,68
590 µm	68,6	13,72	19,4
297 µm	268,1	53,62	73,02
149 µm	123,7	24,74	97,76
Fundo	11,2	2,24	100

Fonte: Autora.

A curva granulométrica da areia está apresentada na Figura 23 em conjunto com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 23: Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado.



Fonte: Autora.

6.1.3. Agregado Graúdo

A partir do resultado do ensaio de granulometria do agregado graúdo foi possível determinar a dimensão máxima do agregado (DMC) com valor igual a 2,38mm.

Na tabela 5 estão apresentados os valores de porcentagem retida e porcentagem retida acumulada do agregado graúdo natural, brita 1, constituinte do concreto.

Tabela 5. Granulometria dos agregados graúdos

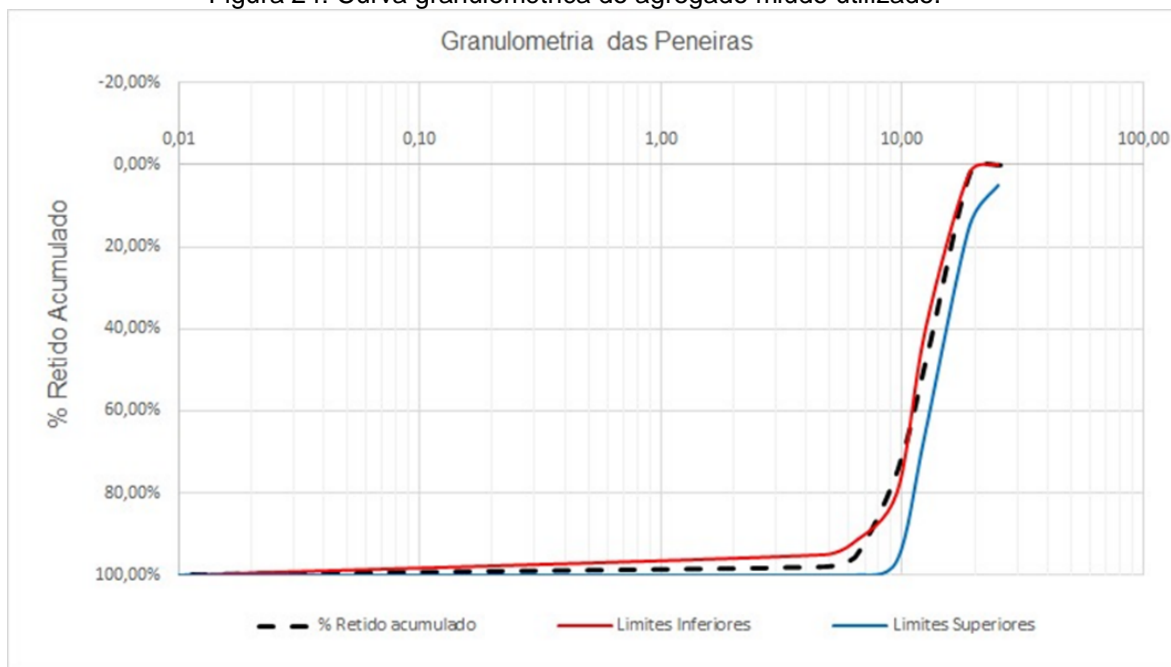
Peneiras	Retido (g)	% Retido	% Retido acumulado
25,40 mm	0	0	0
19,10 mm	51,4	1,71	1,71
12,70 mm	1318,9	43,97	45,68
9,52 mm	862,5	28,75	74,43
6,35 mm	636,2	21,21	95,64
4,76 mm	72,4	2,41	98,05
Fundo	58,6	1,95	100

*Obs.: Amostra de 3000 gramas.

Fonte: Autora.

A curva granulométrica da brita 4 está disposta na Figura 24 em conjunto com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 24: Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado.



Fonte: Autora.

6.2. CARACTERIZAÇÃO DA CBC

A CBC foi submetida ao ensaio de massa específica por meio da NBR 16605 (ABNT, 2017) e obteve o resultado de 2,65 g/cm³.

Como citado na metodologia, a CBC *in natura* foi submetida a análise em laboratório por meio do ensaio de espectrometria de absorção atômica para determinar a pré-existência de chumbo nas amostras. Para garantir a fidelidade dos dados, ainda foi realizada a abertura da cinza em solução nítrica (abertura da amostra), o que permitiu obter dados de presença de chumbo nas partículas constituintes da CBC, os resultados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6. Caracterização da pré-existência de Chumbo (Pb²⁺) na CBC *in natura*.

Amostra CBC <i>in natura</i>	Pb²⁺ existente
Amostra A1	Nd<LQ
Amostra A2	Nd<LQ
Amostra A3	Nd<LQ
Abertura da Amostra A1	Nd<LQ
Abertura da Amostra A2	Nd<LQ
Abertura da Amostra A3	Nd<LQ

Nota: *Nd: Não detectado pelo aparelho; Limite de detecção (LQ) = 0,01 mg.L⁻¹.

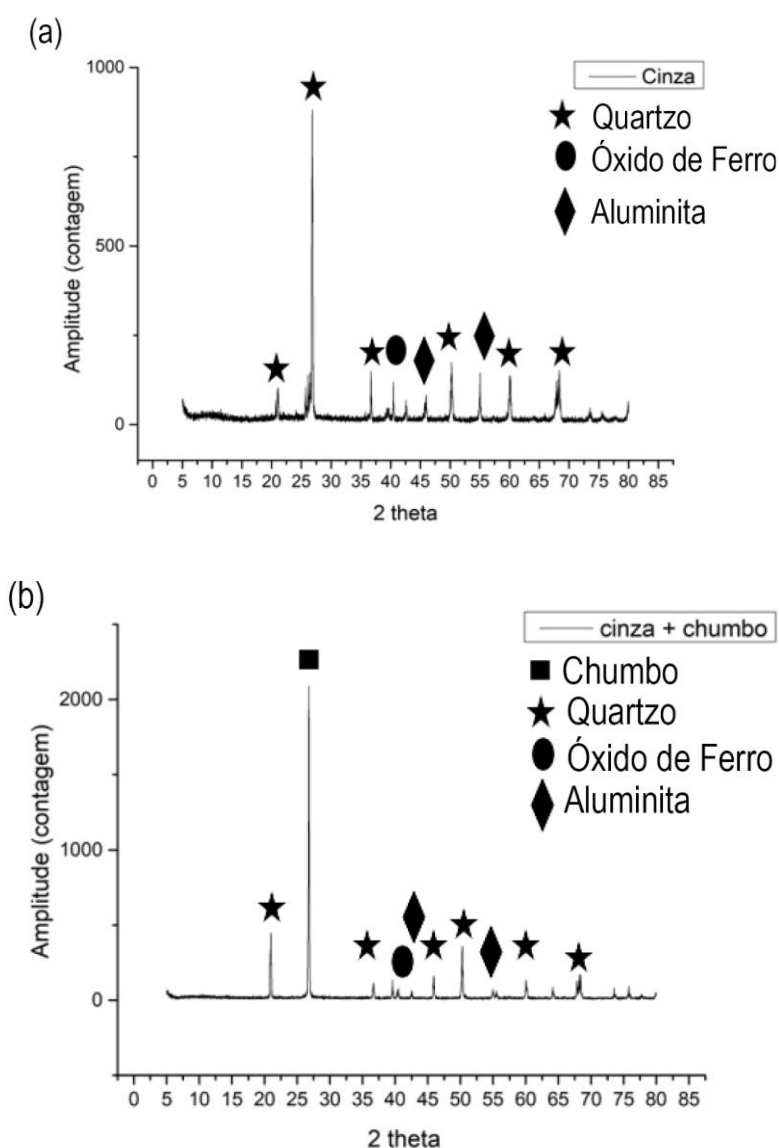
Fonte: Autora.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 7 é possível garantir que não foi determinado, mediante o limite de detecção do equipamento, a presença de chumbo no sobrenadante, logo, conclui-se que o chumbo que estiver presente, nas análises, será necessariamente da adsorção pela CBC.

Foi realizado o ensaio de DRX (Difração de Raios-X) para medir diretamente a estrutura cristalina das fases presentes. A medida dos picos de difração está relacionada com a abundância de cada fase na mistura.

O ensaio foi feito para o cimento, para a CBC *in natura* e para a CBC adsorvida com chumbo, os resultados obtidos estão na Figura 25 apresentados.

Figura 25. Difractogramas da CBC *in natura* (a); da CBC adsorvida com chumbo (b);



Fonte: Autora.

Na Figura 25-a foi apresentado o difratograma da CBC. A cinza apresentou alguns picos de cristalinidade e foram detectadas fases cristalinas de dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3).

Na Figura 25-b é possível verificar a presença do chumbo na forma cristalina na CBC que passou pelo processo de adsorção, o que garante que o chumbo foi adsorvido pela CBC.

Os valores obtidos para o teor de cristalinidade do cimento foi de 75,36% e 24,64% o teor de halo amorfo, para a CBC *in natura* foi de 72,84% o teor de cristalinidade e 27,16% o teor de halo amorfo e no caso da cinza adsorvida o teor de cristalinidade obtido foi de 82,6% e 17,4% de halo amorfo.

6.3. ADSORÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR

A adsorção da cinza foi analisada em triplicata com 2 repetições, para três concentrações: 100 mg.L^{-1} , 200 mg.L^{-1} e 500 mg.L^{-1} . Os resultados obtidos no ensaio de espectrometria de absorção atômica foram tabulados e estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7. Caracterização da adsorção da CBC para diferentes concentrações de Chumbo (Pb^{2+}).

Concentração (mg.L^{-1})	Q_{eq} (mg.L^{-1})	% Adsorvida	Desvio Padrão	Erro
Pb^{2+} (100,00)	5,85	100,00	0,00	0,00
Pb^{2+} (200,00)	10,15	99,96	0,01	0,01
Pb^{2+} (500,00)	7,03	24,48	1,96	1,38

Fonte: Autora.

Ao analisar a Tabela 7, nota-se que para as concentrações de 100 e 200 mg.L^{-1} de Pb^{2+} a adsorção foi de praticamente 100%, tendo uma maior capacidade adsorptiva ($Q_{eq} = \frac{(C_f - C_i) \cdot V}{m}$), na concentração de 200 mg.L^{-1} . No entanto, a concentração de 500 mg.L^{-1} não obteve resultados relevantes, pois a quantidade de cinza utilizada, deve ter atingido seu ponto de saturação, ou seja, havia mais chumbo do que sítios disponíveis para promover a adsorção do íon metálico. A solução a ser adotada para a realização dos ensaios de adsorção da cinza posteriores será a de 200 mg.L^{-1} .

A partir da concentração a ser utilizada (200 mg.L⁻¹ de Pb²⁺), foi realizado novamente o processo de adsorção da CBC, agora em maior escala, para incorporação no concreto. Na Tabela 8 seguem os resultados obtidos para a presença de Pb²⁺, agora foram analisadas em duas etapas de triplicatas totalizando seis amostras, nomeadas sobrenadante seguidas de uma numeração de I a VI.

Tabela 8: Caracterização da adsorção da CBC para concentração de 200 mg.L⁻¹ de Chumbo (Pb²⁺).

Amostra	C final	Qeq (mg.L ⁻¹)	Ci-Cf = mg.L ⁻¹	% adsorvida	Média %	Média Qeq	Desvio	Erro
S. Amostra1-I	0,00	10,15	203,00	100,00	99,94	10,15	0,0106	0,007
S. Amostra 1-II	0,52	10,12	202,48	99,74				
S. Amostra 1-III	0,00	10,15	203,00	100,00				
S. Amostra 2-I	0,00	10,15	203,00	100,00				
S. Amostra 2- II	0,00	10,15	203,00	100,00				
S. Amostra 2-III	0,00	10,15	203,00	100,00				

Fonte: Autora.

Após os resultados obtidos foram realizadas as aberturas das amostras de cinza contaminadas com chumbo de maneira que os resultados pudessem garantir a adsorção. A abertura foi feita em solução de ácido nítrico com pureza de 65% e posteriormente submetidas a determinação de espectrometria de absorção atômica e os resultados estão dispostos na Tabela 9.

É possível verificar que o valor teórico de chumbo obtido através dos cálculos ficaram muito próximos dos valores detectados através da espectrometria de adsorção atômica, garantindo que 77% do chumbo foi realmente adsorvido pelas cinzas, a diferença de valores pode ser explicada pela rápida volatilização do mesmo.

Tabela 9: Concentração de chumbo após abertura da cinza.

Abertura da Amostra (concentração 200 mg.L ⁻¹)	Teórico (mg.L ⁻¹)	Experimental (mg.L ⁻¹)
A. Amostra1-I	126,88	112,12
A. Amostra 1-II	126,50	98,25
A. Amostra 1-III	126,88	103,48
A. Amostra 2-I	126,88	108,02
A. Amostra 2- II	126,88	83,12
A. Amostra 2-III	126,88	97,01

Fonte: Autora.

6.4. INCORPORAÇÃO DA CBC NO CONCRETO

6.4.1. TRAÇO DE REFERÊNCIA

Depois de caracterizar devidamente o aglomerante e os agregados foi possível determinar o traço a ser utilizando, seguindo todo o procedimento do método ABCP e buscando um traço poroso que permitisse a fácil permeabilidade da água no concreto, obteve-se o seguinte traço (apresentando proporções em massa de cimento): 1:1,49:4,00:0,42 (cimento, areia, brita e água) com 0,3% de aditivo superplastificante.

6.4.2. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Este trabalho se propõe analisar a influência da variação da adição de cinza *in natura* e da cinza adsorvida com chumbo, variando as mesmas em proporções de 5%, 10%, 15% e 20% analisando qual delas provoca menores impactos em sua resistência à compressão quando comparada ao traço de referência com 0% de adição.

Os concretos produzidos foram o de referência e o com 10% de adição de cinza *in natura*. Depois de produzir o concreto e aguardar seu período de cura, o ensaio de compressão uniaxial foi realizado e os dados estão na Tabela 10, descrita a seguir.

Como é possível analisar, a resistência aos 28 dias ficou próxima de 30 MPa para o concreto de referência com 0% de adição de cinza e de 21 Mpa para o concreto com 10% de adição de cinza *in natura*, ou seja, sem estar adsorvida com chumbo. Os valores das médias de resistência à compressão são apresentados na Tabela 10.

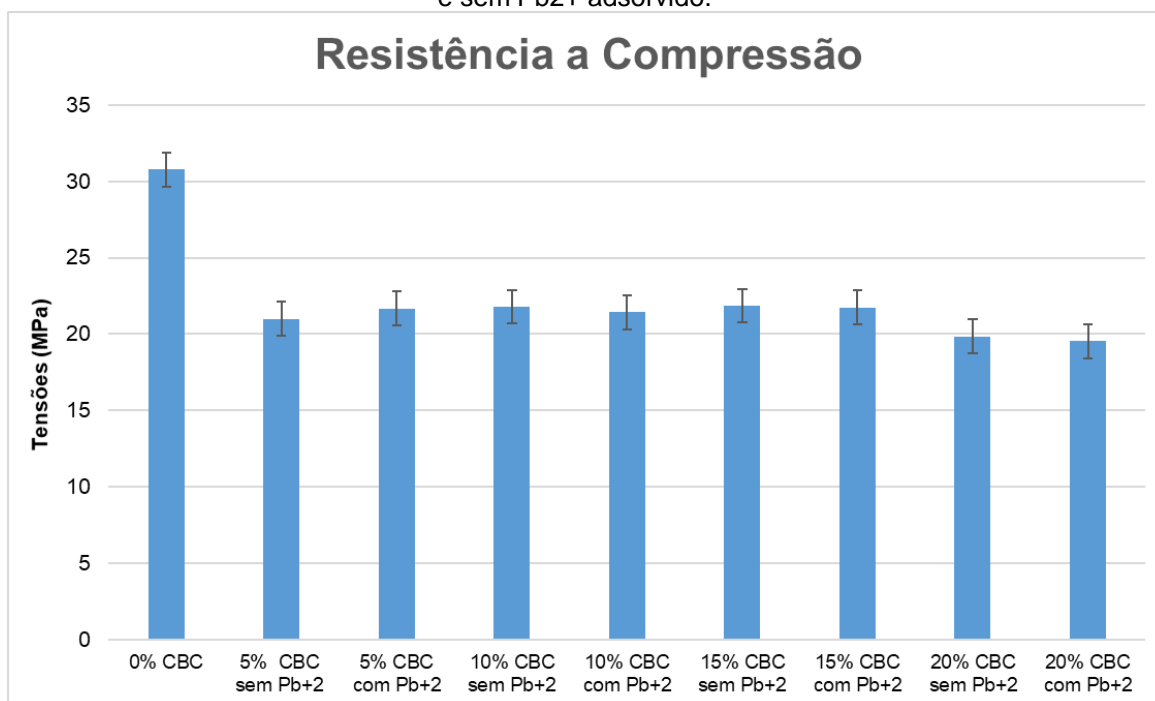
Tabela 10 - Resistência a compressão do concreto produzido com adição de CBC com e sem chumbo adsorvido aos 28 dias.

Resistência a Compressão (28 dias)				
Traço	Amostra	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
0% de Adição de CBC	1	32,00	30,77	2,98
	2	29,00		
	3	27,73		
	4	34,34		
5% de adição de CBC sem Pb2+	1	23,04	21,01	1,55
	2	21,33		
	3	20,19		
	4	19,47		
5% de adição de CBC com Pb2+	1	18,62	21,67	6,32
	2	28,04		
	3	14,33		
	4	25,67		
10% de adição de CBC sem Pb2+	1	19,20	21,79	3,16
	2	23,61		
	3	25,31		
	4	19,03		
10% de adição de CBC com Pb2+	1	22,65	21,42	2,20
	2	23,80		
	3	20,21		
	4	19,00		
15% de adição de CBC sem Pb2+	1	19,79	21,86	3,20
	2	22,45		
	3	26,14		
	4	19,06		
15% de adição de CBC com Pb2+	1	20,17	21,74	3,44
	2	19,35		
	3	26,85		
	4	20,60		
20% de adição de CBC sem Pb2+	1	19,52	19,86	1,67
	2	19,35		
	3	18,32		
	4	22,24		
20% de adição de CBC com Pb2+	1	18,76	19,53	2,18
	2	22,79		
	3	18,22		
	4	18,33		

Fonte: Autora (Anova).

A Figura 26 apresenta o gráfico com as resistências obtidas do concreto frente ao esforço de compressão aos 28 dias de cura úmida, foram analisados os traços com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% ambos apresentando a variação de ter ou não chumbo adsorvido na CBC.

Figura 26: Resistência média de compressão do concreto com variação de adição de CBC com e sem Pb²⁺ adsorvido.



Fonte: Autora.

Diante do exposto, nota-se que a resistência média obtida no traço sem adição de CBC foi de 30,77 MPa, ao ponto que iniciam-se as adições por menores que sejam, a resistência teve um decréscimo sendo ela com chumbo adsorvido ou não.

6.4.3. RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

Este ensaio é realizado pela média aritmética dos valores de resistência a tração de no mínimo quatro corpos de prova para cada traço analisado, conforme a NBR 7222 (2011).

Os valores da resistência a tração por compressão diametral obtidos no estudo estão dispostos na Tabela 11. Observa-se que a maior variação entre as resistências obtidas ocorreu com o maior teor de adição de CBC, e que o fato de conter ou não chumbo adsorvido não interferiu significativamente nos resultados.

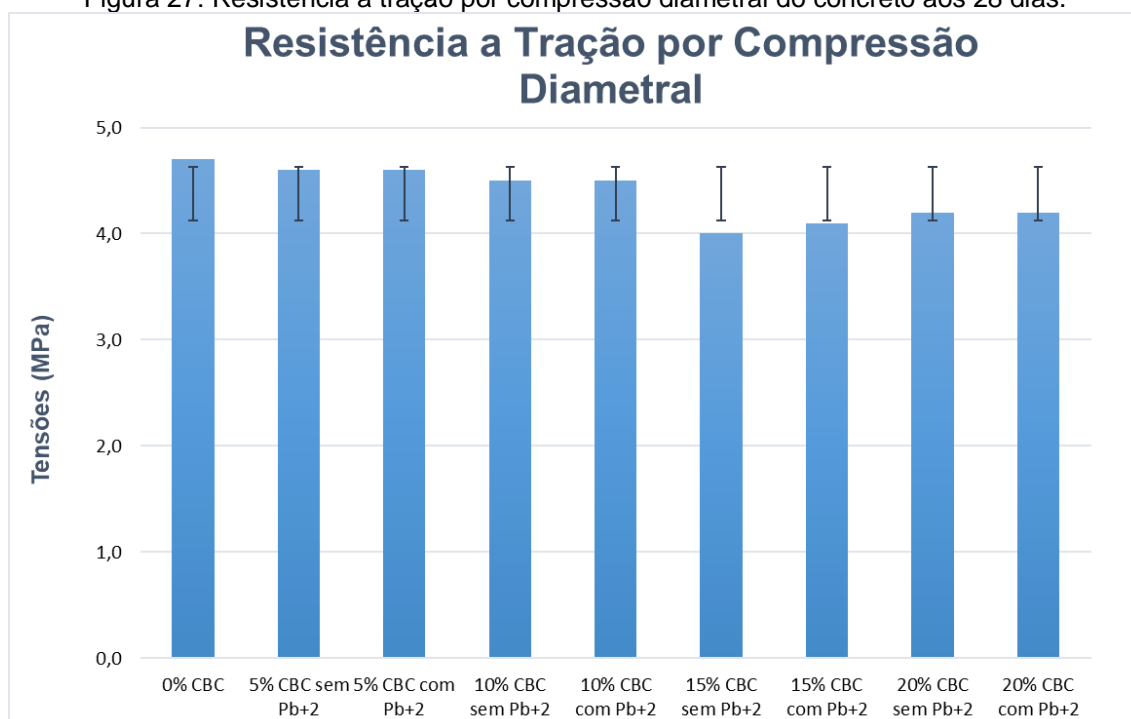
Tabela 11: Resistência a tração por compressão diametral do concreto produzido com adição de CBC com e sem chumbo adsorvido aos 28 dias.

Resistência a Tração				
Traço	Amostra	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
0% de Adição de CBC	1	4,72	4,70	0,14
	2	4,80		
	3	4,50		
	4	4,80		
5% de adição de CBC sem Pb2+	1	4,80	4,62	0,28
	2	4,60		
	3	4,23		
	4	4,85		
5% de adição de CBC com Pb2+	1	4,03	4,56	0,38
	2	4,78		
	3	4,56		
	4	4,87		
10% de adição de CBC sem Pb2+	1	4,75	4,52	0,28
	2	4,23		
	3	4,33		
	4	4,78		
10% de adição de CBC com Pb2+	1	4,70	4,45	0,44
	2	3,80		
	3	4,66		
	4	4,65		
15% de adição de CBC sem Pb2+	1	3,45	3,99	0,68
	2	3,65		
	3	4,98		
	4	3,89		
15% de adição de CBC com Pb2+	1	3,40	4,07	0,50
	2	4,45		
	3	4,46		
	4	3,98		
20% de adição de CBC sem Pb2+	1	4,56	4,16	0,66
	2	4,87		
	3	3,67		
	4	3,54		
20% de adição de CBC com Pb2+	1	4,78	4,19	0,47
	2	3,75		
	3	3,90		
	4	4,35		

Fonte: Autora (Anova).

Na Figura 27 é possível verificar o gráfico que apresenta as médias obtidas e apresentadas na Tabela 12, ao observar o desvio padrão das amostras ensaiadas conclui-se que as adições pouco influenciaram na obtenção de resistência a compressão diametral, independente de conter adsorvido chumbo ou não na CBC incorporada.

Figura 27: Resistência a tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias.



Fonte: Autora.

6.5. PERMEABILIDADE DO CHUMBO INCORPORADO NO CONCRETO

Após realizadas todos os ensaios de praxe, foi executado o ensaio de permeabilidade e lixiviação do concreto conforme a Figura 28. A água permeada foi coletada e levada para análises de detecção de chumbo conforme a tabela.

Figura 28: Permeabilidade da água nas placas de concreto.



Fonte: Autora.

Os resultados obtidos na água permeada das placas de concreto feitas com CBC com chumbo adsorvido não apresentaram quantidade de Pb^{2+} possível de quantificação pelo aparelho utilizado sendo que o limite de detecção de chumbo (LQ) é de $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$. As análises foram realizadas em triplicata.

Levando em conta que foi utilizado uma concentração de 200 mg.L^{-1} na cinza incorporada pode-se concluir que o chumbo foi estabilizado por meio da solidificação no concreto.

Tabela 12: Análise de presença de Pb^{2+} existente na água permeada.

Amostra água permeada	Pb^{2+} existente
Amostra I	Nd
Amostra II	Nd
Amostra III	Nd
Amostra IV	Nd
Amostra V	Nd
Amostra VI	Nd

Nota: *Nd: Não detectado pelo aparelho; Limite de detecção = $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$.

Fonte: Autora.

CONCLUSÃO

O estudo envolvendo a estabilização de chumbo por solidificação em cinzas de bagaço de cana de açúcar incorporado em concreto permitiu inferir que a cinza do bagaço de cana de açúcar apresentou-se como uma boa alternativa para a retirada do chumbo (Pb^{2+}) de soluções aquosas.

A resistência a compressão do concreto utilizando o traço sem nenhum tipo de adição apresentou uma resistência maior do que a verificada após adição de CBC, no entanto, a partir da primeira porcentagem de CBC adicionada, que foi de 5%, a variação para as próximas porcentagens, que foram de 10%, 15% e 20%, chegando em até 10,18%.

Já na resistência a tração por compressão diametral a influência do maior teor de adição mineral para o traço sem CBC foi de 8,7%. Considerado baixo para a resistência obtida.

O fato da CBC estar contaminada ou não com a adsorção de chumbo não interferiu significativamente na perda de resistência tanto na resistência a compressão quanto a tração por compressão diametral.

Os resultados de permeabilidade comprovaram que o chumbo foi estabilizado por meio do processo de solidificação por incorporação da cinza do bagaço de cana de açúcar incorporado no concreto.

REFERÊNCIAS

ABRECON, (2011). Disponível em: <<https://abrecon.org.br/brasileiro-produz-por-ano-meia-tonelada-de-residuos-de-construcao-civil/>>. Acesso em: 26 set. 2019.

ALI, M.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. (2016). “**A review on emission [19] analysis in cement industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews**”. vol. 15, pp. 2252-2261, 2011. doi: 10.1016/j.

ALVES, L. R. A. (2002). “**Transmissão de preços entre produtos do setor sucroalcooleiro do Estado de São Paulo.**” 107 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ANDRADE, J.M.F (2001). Gestão ambiental para implementação da reciclagem de baterias automotivas, controle das recicladoras de chumbo e de suas áreas potencialmente contaminadas. Disponível em: <http://www.mp.ba.gov.br/atuacao/ceama/material/doutrinas/residuos/gestao_ambiental_para_implementacao_da_reciclagem_de_bateria.pdf>. Acesso em: dezembro de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004). **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2015). **NBR 12653: Materiais pozolâncios**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). **NBR 12653: Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2015). **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2007). **NBR 5739:** Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009). **NBR 7211:** **Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2011). **NBR 7222:** **Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2001). **NBR - NM 248:** **Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-1:** **Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação - Parte 1:Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.** Rio de Janeiro.

ATKINS, P.; JONES, L. (2006). “**Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente.**” 3. Ed. Porto Alegre: Bookman.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (1992). “**Case studies in environmental medicine – lead toxicity.**” US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta.

ÁVILA T. C.; FERNANDES S. E.; AKASAKI J; L; (2016). “**A influência da substituição de cimento por cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em concretos.**” ANAP, Brasil, v.9 n.17 35-46.

BARROSO, T. R. (2011). “**Estudo Da Atividade Pozolânica E Da Aplicação Em Concreto De Cinzas Do Bagaço De Cana-de-açúcar Com Diferentes Características Físico-Químicas.**” Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)

- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - Campos dos Goytacazes – RJ.

BESSEN, G. R. (2011). **“Coleta seletiva com inclusão de catadores: construção participativa de indicadores e índices de sustentabilidade.”** 275p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo.

BLEZARD, R. G. (1998). **“The history of calcareous cements. In: Hewlett, P. C., Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”**, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 1-19.

CASCUDO, O; CARASEK, H. (2011). **“Ação da carbonatação no concreto”**. Concreto: Ciência e Tecnologia. – São Paulo: IBRACON. V1. pp. 849-883.

CHUSILP, N., JATURAPITAKKUL, C., KIATTIKOMOL, K. (2009). **“Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete”**, Construction and Building Materials, v. 23, pp. 3352-3358.

CONAB. **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA Cana-de-açúcar**. Acomp. safra bras. cana, v. 4 - Safra 2017/18, n. 2 - Segundo levantamento, v. 4, n. 2, p. 1–73, 2017. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: novembro de 2019.

COPERSUCAR, Cooperativa Açucareira. On-line. Disponível em: <<http://www.copersucar.com.br>>. Acesso em: dezembro de 2019.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R. (2009a). **“Effect of calcinations temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash.”** Construction and Building Materials, v. 23, pp. 3301-3303.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., TAVARES, L. M., FAIRBAIRN, E. M. R. (2009b). **“Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as**

pozzolanic admixture in high-performance concrete.” Cement and Concrete Research, v. 39, pp. 110-115.

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

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 45p.

CORDEIRO, G.C., TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, L.M., FAIRBAIRN, E.M.R. (2008). **“Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars”.** Cement and Concrete Composites v.30, pp.410–418.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. (1992). **“Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização.”** SBPE – Sociedade Brasileira de Planejamento Energético – Revista Brasileira de Energia, Vol. 2 - nº 2.

DANIELS J., ROACH B. T. (1987). **“Taxonomy and evolution in sugarcane.”** In: Heinz DJ, ed. Sugarcane improvement through breeding. Amsterdam: Elsevier Press, 7–84.

GNOATTO E. L.; (2016). **Diagnóstico das Alternativas de Destinação Final dos Resíduos da Construção Civil – Classe A No Brasil;** Trabalho de Conclusão de Curso - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ CURITIBA.

Fapesp 2008, disponível em:
<<https://revistapesquisa.fapesp.br/1998/04/01/propriedades-do-bagaco-da-cana-de-acucar/>> Acesso em: 16 set. 2019

FREITAS, E. S. (2005) **“Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil”**. Dissertação Mestrado. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos Dos Goytacazes, RJ.

GUPTA, G.; TORRES N.; HAZARD J. (1998). p.243–248.

GANESAN et. al. (2007). **“Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material.”** Cement & Concrete Composites, pp 515–524.

GIL, A. C., (2002). **“Como elaborar projetos de pesquisa.”** 4. ed. - São Paulo : Atlas.

HEMERLY, F. X. (1999). **“Cadeia produtiva da cana-de-açúcar: alternativas para aumento de sua eficiência”**. 4a Reunião Anual de Programação de Pesquisa do CCTA. Campos dos Goytacazes: UENF, 44p.

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

HOPPE FILHO, J. (2008). **“Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto”** (Tese de doutorado) – Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. On-line. Disponível na Internet via <http://www.ibge.net>. Consultado em 13 de agosto de 2019.

KLEMM, W. A., (1989). **“Cementitious materials: historical notes”**. Materials science of concrete I, Westerville: The American Ceramic Society, pp. 1-26.

LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E. (2003). **“Mineral admixtures in mortars – Effect of inert materials on short-term hydration”**. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 12, pp. 1939-1947.

LIMA S. A. (2008). **“Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju.”** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

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

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K. (1996). **Pozzolanic and cementitious materials**. 1 ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 191 p.

MANHÃES, M. S. (1999). **Adubação, correção do solo e uso de resíduos da agroindústria**. In: Tecnologia Canavieira nas Regiões Norte Fluminense e Sul do Espírito Santo - Boletim Técnico, n.12. Campos dos Goytacazes: UFRJ, apud Cordeiro (2004). 24-31 p.

MANSANEIRA, E. C. (2010). **“Verificação da potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em cimento Portland”**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2010.

MARIANO, L. S. (2008). **Gerenciamento de resíduos da construção civil com reaproveitamento estrutural: estudo de caso de uma obra com 4.000m²**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 114p.

MASSAZZA, F. (1998). **“Pozzolana and pozzolanic cements”**. **Chemistry of cement and concrete**, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 471-631.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. (1994). **“Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais”**, 1a Edição, Editora PINI.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2014). **“Concrete: Microstructure, Properties, and Materials”**, fourth ed., McGraw-Hill.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – **Cidades sustentáveis, urbanismo sustentável, construção sustentável**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br> Acessado em: 12 agosto 2019.

MOHAN, Dinesh; PRACHI, Singh; SARSWAT, Ankur; STEELE, Philip; PITTMAN, Charles U. (2015). **Lead sorptive removal using magnetic and nonmagnetic fast pyrolysis energy cane biochars**. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.448, p238-250.

MORAES, R. C. (2001) **Efeitos físicos e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto** – Dissertação de mestrado – Universidade de Santa Maria – Santa Maria, Rio Grande do Sul.

MORALES, E. V., VILLAR-COCIÑA, E., FRÍAS, M., SANTOS, S. F., SAVASTANO JR., H. (2009). **“Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation”**. *Cement & Concrete Composites*, v. 31, pp. 22-28.

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

NOLASCO, A. M. (1993). **Utilização de resíduo da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil**. São Carlos. 140f + anexos. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Engenharia de São Carlos.

PADUA, P. G. L., SOUZA, C. A., AGUIAR, M. T. P. (2011). **“Physical-Chemical Characteristics of Cane Bagasse Ashes used in the manufacturing of concretes”**, Congr s International de la Chimie des Ciments.

PAULILLO, L. F.; VIAN, C. E. de F.; SHIKIDA, P. F. A.; MELLO, F. T. (2007). **Álcool combustível e biodiesel no Brasil: quo vadis?** Revista de Economia e Sociologia Rural, Brasília, DF, v. 45, n. 3, p. 531-565.

PAZ, J. E. M.; GARNICA, A. I. C.; CURBELO F. D. S. (2018). **Estudo da adsorção de chumbo utilizando como adsorvente bagaço de cana-de-açúcar ativado.** Paraíba. Revista Holos. DOI:10.15628/holos.2018.7544.

RAMOS, P. (1999). **Agroindústria canavieira e propriedade fundiária no Brasil.** São Paulo: HUCITEC. 243 p.

RUTHVEN, D. (1984). **Principles of adsorption and adsorption processes. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification.** Vol. 19. [https://doi.org/10.1016/0255-2701\(85\)80013-1](https://doi.org/10.1016/0255-2701(85)80013-1).

SALES, A., LIMA, S.A. (2010). **“Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replancement”**, Waste Management, in press.

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

SHIKIDA, P. F. A. (1997). **A evolução diferenciada da agroindústria canavieira no Brasil de 1975 a 1995.** 191 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SHIKIDA, P. F. (2015). **A Evolução e fases da agroindústria canavieira no Brasil.** Revista de Política Agrícola, v. 23, n. 4, p. 43–57, 2015.

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

SNA (2018). disponível em: <https://www.sna.agr.br/novos-tempos-atividade-canavieira-tem-maior-formalizacao-do-agronegocio/>

SNIC (2018). **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. “Relatório Anual,”** Rio de Janeiro.

SOUZA et al. (2007). **Desenvolvimento de Argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar.** CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. Bento Gonçalves: IBRACON. CD ROM.

SZMRECSÁNYI, T. (1979). **O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil: 1930-1975.** São Paulo: HUCITEC. 540 p.

TAYLOR, H. F. W. (1997). **Cement Chemistry**, 2nd ed., Thomas Telford: London.

TEREOS, (2018). Disponível em: <<http://www.tereos.com.br/sustentabilidade/>>
Acesso em: 17 set. 2019

VIAN, C. E. de F. (2013). **Agroindústria canavieira: estratégias competitivas e modernização.** Campinas: Átomo, 216 p.