

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
HENRIQUE LIOTTO ZANATTA
WESLEM MATIAS DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO
MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NA
PRODUÇÃO DE CONCRETO**

CASCADEL - PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

HENRIQUE LIOTTO ZANATTA

WESLEM MATIAS DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO
MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NA
PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Professora Orientadora: Mestre Engenheira Civil
Maria Vania Nogueira do Nascimento Peres.**

CASCADEL - PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
HENRIQUE LIOTTO ZANATTA
WESLEM MATIAS DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO
MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NA
PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação da Professora **Mestre Engenheira Civil MARIA VANIA NOGUEIRA DO NASCIMENTO PERES**.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora Prof^a. **Mestre MARIA VANIA NOGUEIRA DO NASCIMENTO PERES**

Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheira Civil

Professora **Mestre ANDREA RESENDE SOUZA**

Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheira Civil

Professor **Especialista LINCOLN SALGADO**

Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil

Cascavel, 30 de novembro de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho aos familiares, amigos e professores
que tiveram papel fundamental em nossas vidas e nos
deram apoio para conquistarmos nossos sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus pela força divina em nossas vidas.

A nossa família pela paciência, compreensão, força e motivação que nos proporcionaram.

A Vania, nossa professora orientadora, por ter desempenhado papel fundamental na realização deste trabalho. Agradecemos também, à Empresa São José Areia e Pedra e à Usina de Açúcar e Alcool Goioerê, do grupo USACUCAR, por nos ceder os materiais necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Não é preciso ter olhos abertos para ver o sol, nem é preciso ter ouvidos afiados para ouvir o trovão, para ser vitorioso você precisa ver o que não está visível.”

Sun Tzu.

RESUMO

Nos últimos anos houve um aumento na produção de álcool e açúcar no Brasil o que consequentemente aumentou a quantidade de bagaço de cana de açúcar proveniente do setor, que é um resíduo que não possui descarte adequado. Com o objetivo de reduzir a quantidade de cimento utilizado nas obras correntes da construção civil, pesquisas vêm sendo realizadas no intuito de encontrar um material que possa ser utilizado para essa finalidade. O trabalho que segue explora o bagaço da cana-de-açúcar, sem a realização de moagem, como material para substituição parcial do cimento Portland, nos teores 10%, 20% e 30% de CBC em concreto com Fck 30Mpa, verificando se a adição influencia significativamente nas propriedades do concreto. Nos agregados e na CBC, foram realizados ensaios de caracterização física como: granulometria, peso específico, absorção de água e umidade. Nos concretos foram realizados os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, índice de absorção de água e atividade pozolânica. Os resultados obtidos nos ensaios demonstraram nas amostras com 10% de CBC perda considerável da resistência à compressão, pequena queda no módulo de elasticidade e aumento da permeabilidade. Já para os concretos com 20% de CBC apresentaram maior perda de resistência à compressão, considerável queda do módulo de elasticidade e aumento da permeabilidade e os concretos com 30% de CBC apresentaram quedas e perdas muito maiores que os demais na resistência à compressão, no módulo e aumento maior ainda da permeabilidade. Dessa forma, a pesquisa vem demonstrar a impossibilidade da utilização da CBC sem a realização da moagem como material para substituição parcial do cimento na produção de concretos.

Palavras-chave: adição mineral; CBC; atividade pozolânica; moagem; propriedades do concreto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da produção brasileira de cana, açúcar e etanol.	21
Figura 2: Mapa das usinas de cana-de-açúcar do Brasil.....	21
Figura 3: Fluxograma de produção do cimento Portland.	25
Figura 4: Componentes do cimento Portland.	26
Figura 5: Classificação dos agregados em leves, médios e pesados.	27
Figura 6: Requisitos químicos.	30
Figura 7: Requisitos físicos.	30
Figura 8: Quantidade de amostras a serem coletadas para ensaios físicos ou químicos.	35
Figura 9: Quarteamento sobre superfície rígida; limpa e plana.....	36
Figura 10: Massa mínima por amostra de ensaio.	37
Figura 11: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).....	38
Figura 12: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	38
Figura 13: Quantidade de amostra a serem coletadas para ensaios físicos ou químicos.....	45
Figura 14: Quarteamento sobre superfície rígida; limpa e plana.....	46
Figura 15: Massa mínima por amostra de ensaio.	47
Figura 16: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).....	48
Figura 17: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	48
Figura 18: Massa mínima de amostra de ensaio.....	51
Figura 19: Massa mínima da amostra de ensaio.....	53
Figura 20: Massa mínima de amostra para ensaio.....	55
Figura 21: Quantidade de amostra a serem coletadas para ensaios físicos ou químicos.....	57
Figura 22: Quarteamento sobre superfície rígida; limpa e plana.....	58
Figura 23: Massa mínima por amostra de ensaio.	58
Figura 24: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).....	59
Figura 25: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	59
Figura 26: Número de camadas para moldagem dos corpos de prova.	65
Figura 27: Compressômetro com bases independentes, com dois anéis fixados no corpo de prova.	67
Figura 28: Quantidade de material, em massa, para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultado da granulometria do agregado miúdo.	39
Tabela 2: Resultados para determinação da massa específica do agregado miúdo.	42
Tabela 3: Resultados para determinação da absorção de água do agregado miúdo.	43
Tabela 4: Resultado do teor de umidade do agregado graúdo.	44
Tabela 5: Resultado da granulometria do agregado graúdo.	49
Tabela 6: Resultado da massa específica e absorção de água do agregado graúdo.	52
Tabela 7: Resultado do teor de material pulverulento.	54
Tabela 8: Resultado do teor de umidade do agregado graúdo.	56
Tabela 9: Resultado da granulometria da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.	60
Tabela 10: Resultado da massa específica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.	62
Tabela 11: Valores da resistência a compressão.	68
Tabela 12: Resistência à compressão média aos 28 dias.	74
Tabela 13: Resistência a compressão para a atividade Pozolânica.	77
Tabela 14: Índice de atividade pozolânica.	77
Tabela 15: Permeabilidade do concreto.	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica do agregado miúdo.	40
Gráfico 2: Curva granulométrica do agregado graúdo.	50
Gráfico 3: Curva granulométrica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.	61
Gráfico 4: Resistência a compressão aos 28 dias.	75
Gráfico 5: Módulo de elasticidade.....	76
Gráfico 6: Absorção de água por imersão.	79
Gráfico 7: Absorção média por traço.	79

LISTA DE EQUAÇÕES

Massa específica aparente do agregado miúdo seco	41
Massa específica aparente do agregado miúdo seco	41
Absorção de água do agregado miúdo.....	42
Teor de umidade total do agregado graúdo	44
Massa específica aparente do agregado.....	51
Absorção de água do agregado graúdo.....	52
Quantidade de material que passou pela peneira 0,075 mm.....	53
Teor de umidade total do agregado graúdo	55
Massa específica do material.....	62
Resistência à compressão	66
Deformação específica	69
Módulo de elasticidade.....	69
Índice de absorção de água.....	70
Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – América Concrete Institute

AGEITEC – Agência Embrapa de Informação Tecnológica

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CBC – Cinza do Bagaço da cana-de-açúcar

cm²/g – Centímetro quadrado por grama

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CP – Cimento Portland composto

Ca(OH)₂ - Hidróxido de cálcio

C₃A – Aluminato tricálcico

C₄AF – Ferroaluminatotetracálcico

C₂S – Silicato dicálcico

C₃S – Silicato tricálcic

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

DERAL - Departamento de Economia Rural da Secretaria da Agricultura e do Abastecimento

dm³ – Decímetro cúbico

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

fck – Resistência característica à compressão do concreto

g/cm³ – Grama por centímetro cúbico

g/l – Gramas por litro

H₄SiO₄ – Ácido ortossilícico

kg – quilogramas

mg/l – Miligramas por litro

ml – Mililitro

mm – Milímetro

MPa – Megapascal

SENEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná

Sd – Desvio padrão da dosagem

SiO₂ – Dióxido de silício

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar

USACUCAR – Usina de Açúcar Santa Terezinha

Z – Pozolana

µm– Micrómetro ou milésimo do metro

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO 1	16
1.1 INTRODUÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 JUSTIFICATIVA	17
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	18
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	18
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	19
2 CAPÍTULO 2	20
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1.1 Cana-de-açúcar	20
2.1.2 Bagaço da cana-de-açúcar	22
2.1.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	23
2.1.4 Concreto	24
2.1.4.1 Cimento Portland.....	24
2.1.4.2 Agregados.....	26
2.1.4.3 Aditivos	27
2.1.4.4 Água	28
2.1.4.5 Adições minerais	28
2.1.5 Pozolana	29
2.1.5.1 Classificação dos materiais pozolânicos.....	29
2.1.5.2 Atividade Pozolânicas	30
2.1.5.3 Vantagens da utilização de materiais pozolânicos	31
2.1.6 Propriedades do concreto fresco.....	31
2.1.7 Propriedades do concreto endurecido.....	32
2.1.8 Influência das adições minerais no comportamento do concreto	33
3 CAPÍTULO 3	34
3.1 METODOLOGIA.....	34
3.1.1 Tipo de estudo e local da pesquisa	34
3.1.2 Seleção e características dos materiais	34
3.1.2.1 Agregado miúdo	34

3.1.2.1.1 Determinação da composição granulométrica.....	35
3.1.2.1.2 Determinação da massa específica	40
3.1.2.1.3 Determinação da absorção de água	42
3.1.2.1.4 Determinação do teor de umidade	43
3.1.2.2 Agregado graúdo	44
3.1.2.2.1 Determinação da composição granulométrica.....	45
3.1.2.2.2 Determinação da massa específica e absorção	50
3.1.2.2.3 Determinação do teor de material pulverulento	52
3.1.2.2.4 Determinação do teor de umidade	54
3.1.2.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar CBC.....	56
3.1.2.3.1 Determinação da composição granulométrica.....	56
3.1.2.3.2 Determinação da massa específica	61
3.1.2.4 Cimento Portland.....	62
3.1.2.5 Água	63
3.1.3 Características do concreto.....	63
3.1.3.1 Definição da resistência característica à compressão do concreto - F_{ck}	63
3.1.3.2 Determinação do traço do concreto	63
3.1.3.3 Determinação dos teores de adição da CBC.....	64
3.1.3.4 Moldagem dos corpos de prova.....	64
3.1.4 Ensaio de resistência à compressão	65
3.1.5 Ensaio de módulo de elasticidade.....	67
3.1.6 Determinação de absorção de água por imersão	70
3.1.7 Índice de atividade pozolânica	71
3.1.8 Análise dos dados	73
4 CAPÍTULO 4	74
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1.1 Análise das propriedades do concreto fresco	74
4.1.2 Resistência a compressão	74
4.1.3 Módulo de elasticidade.....	76
4.1.4 Índice de atividade pozolânica	77
4.1.5 Determinação da absorção de água por imersão	78
5 CAPÍTULO 5	81
5.1 CONCLUSÃO	81
6 CAPÍTULO 6	82

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	83
APÊNDICE A – RESISTENCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS	89
APÊNDICE B – DEFORMAÇÃO A E B DO CONCRETO.....	90
APÊNDICE C – TENSÃO EFETIVA DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	91
APÊNDICE D – MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO.....	92

1 CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

O concreto tem um papel fundamental no desenvolvimento do homem desde a antiguidade. Compostos formados basicamente de aglomerantes, agregados e água serviram como insumos para diversas construções ao longo da história.

A construção civil no Brasil consome grande quantidade de cimento para a confecção de concretos e argamassas, só no ano de 2015 foram consumidos 65 milhões de toneladas do insumo (SNIC, 2016). A matéria prima para a produção do cimento não é renovável e para a construção civil é um insumo que tem um custo significativo, fomentando a busca por materiais que visam diminuir o consumo de cimento na produção de concretos e argamassas. Sendo assim, a utilização de resíduos gerados em outras atividades da economia pela construção civil é vantajosa (ABCP, 2012).

O aumento da produção industrial originou uma necessidade de redução dos custos com produção de energia, assim, muitas empresas buscaram métodos de produção de energia sustentáveis e de baixo custo (RANIERE RODRIGUES DOS SANTOS *et al.*, 2006). Em usinas de álcool e açúcar a utilização de biomassa como fonte de cogeração de energia aumentou significativamente nas últimas décadas. No Brasil a produção de energia a partir da biomassa representa cerca de 9% da matriz energética total do país e a cana-de-açúcar corresponde a 76% da capacidade instalada pela fonte biomassa (UNICA, 2017). O resultado do processo é a geração da cinza da cana como resíduo. Constituída basicamente de Sílica, SiO_2 , a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) possui grande potencial para a utilização como adição mineral substituindo parte do cimento em argamassas e concretos (CORDEIRO *et al.*, 2008).

As adições minerais, segundo Taylor (1992), podem ser utilizadas de duas formas: moídas juntamente com o clínquer ou adicionadas ao cimento durante o amassamento. As adições minerais em materiais à base de cimento devem apresentar as seguintes características: quantidade de carbono, atividade pozolânica e promover melhor trabalhabilidade.

Com este estudo pretende-se apresentar as características do concreto com utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial do cimento Portland.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as características do concreto com cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento nas porcentagens de 10, 20 e 30%.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a resistência à compressão do concreto;
- Analisar o módulo de elasticidade;
- Levantar o índice de atividade pozolânica;
- Avaliar a permeabilidade do concreto.

1.3 JUSTIFICATIVA

No contexto apresentado, pode-se verificar que a produção de cimento é considerável, não somente no Brasil, mas mundialmente, apresenta valores de produção de 4.000 milhões de toneladas de acordo com o último levantamento realizado em 2013 (DNPM/PE, 2014).

Na busca por economia de energia e redução dos índices de poluição, os resíduos da agroindústria são uma boa opção para a construção civil em geral, principalmente para as indústrias de cimento, um destes materiais é a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) largamente produzida em usinas de álcool e açúcar. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2017), o CBC é um material que não possui descarte correto podendo ocasionar grandes impactos ambientais, mas na construção civil pode ser utilizada como material de substituição parcial do cimento por apresentar características pozolânicas.

Pesquisadores como Guilherme Chagas Cordeiro (2006), Romildo Toledo Filho (2008), Anderson Maciel Zardo (2004), entre outros, contribuíram muito com os estudos relacionados ao emprego de cinza de casca de arroz e da cinza da cana-de-açúcar na produção de argamassas e concretos.

No mundo todo, principalmente nas regiões asiáticas, o emprego da cinza de casca de arroz na produção de concreto e argamassa vem sendo muito utilizados (SCREMIN *et al.*, 2008).

No Brasil o potencial da utilização da cinza da cana-de-açúcar como material de substituição do cimento na produção de concreto é viável tendo em vista a produção de cana-de-açúcar de 647,6 milhões de toneladas, previstas para a safra 2017/2018 (CONAB, 2017) e, segundo Cordeiro (2006) cerca de 0,7% da massa de cana-de-açúcar permanece como forma de cinza residual após processos de queima, sendo assim, o Brasil tem um potencial de produção de cerca de 4,5 milhões de toneladas de cinza provenientes da cana-de-açúcar.

O trabalho acadêmico visa encontrar uma forma de diminuir o consumo de cimento nas construções, matéria prima não renovável e muito importante para a construção civil, além de apresentar uma destinação aos resíduos gerados pelas indústrias de álcool e açúcar, por meio da adição parcial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de concreto sem a realização da moagem, o que proporcionaria um uso mais viável para obras correntes.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento influencia significativamente nas propriedades do concreto?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

Espera-se que com a adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar no amassamento do concreto apresente pouca variação da resistência à compressão do módulo de elasticidade e melhora no índice de permeabilidade do concreto, devido à sílica presente na cinza.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa será limitada ao levantamento da atividade pozolânica, resistência à compressão, módulo de elasticidade e índice de permeabilidade do concreto com a adição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, não sendo considerado nenhum outro ensaio relacionado ao comportamento do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

As porcentagens de substituição parcial do cimento pela cinza foram definidas com base nas publicações referentes ao assunto. Todos os ensaios serão realizados após 28 dias no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Construção Civil do Centro universitário Assis Gurgacz.

Foram moldados 6 corpos de prova para cada porcentagem de adição de CBC (10, 20 e 30%) e 6 corpos de prova sem adição para ensaio de compressão e módulo de elasticidade, além de 2 amostras para cada porcentagem de adição de CBC e 2 amostras sem adição para o ensaio de permeabilidade, já para o ensaio de atividade pozolânica foram utilizados 8 corpos de prova, totalizando 56 corpos de prova para a realização dos ensaios.

Os dados coletados foram comparados a amostras de concreto sem adição da CBC verificando as variações dos resultados.

2 CAPÍTULO 2

Neste capítulo serão abordadas as definições de cana-de-açúcar, materiais para a confecção de concreto e suas características.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Cana-de-açúcar

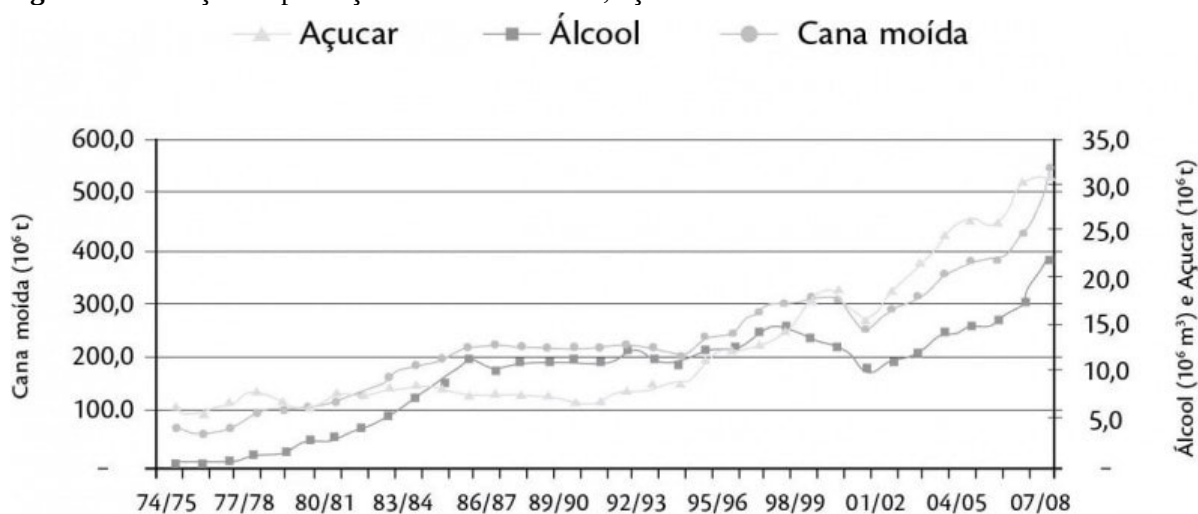
A cana-de-açúcar é originária da espécie *Saccharum officinarum*, proveniente do território asiático, a qual é semeada desde a antiguidade. A planta original possuía diversas enfermidades e com o tempo sofreu mudança pelo cruzamento e com as inovações tecnológicas, destas mudanças surgiu o que hoje é conhecida como cana-de-açúcar.

O início do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil se deu a partir do começo do século XVI com a instalação dos primeiros engenhos de açúcar e com o passar do tempo substituiu a indústria extrativa de pau-brasil. O cultivo da cana-de-açúcar foi a base da economia do nordeste brasileiro, sendo que sua principal força de trabalho era a mão-de-obra escravizada, utilizada até o fim do século XVII.

A produção da cana-de-açúcar no Brasil cresceu de forma acelerada após ser proposto o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em novembro de 1975, com produção anual de menos de 100 milhões de toneladas aumentada para quase 220 milhões de toneladas em 1986/87. O cultivo da cana-de-açúcar voltou a crescer na safra de 93/94 devido ao aumento das exportações de açúcar, mas sofreu uma queda devido à crise que atingiu o setor entre 1998 e 2001 (NOVACANA, 2013).

O lançamento dos veículos flex, lançados no Brasil em 2003, fez com que a produção de cana-de-açúcar voltasse a crescer para que pudesse atender a demanda de álcool hidratado, sua produção atingiu o patamar de 520 milhões de toneladas em 2007, conforme Figura 1 (NOVACANA, 2008).

Figura 1: Evolução da produção brasileira de cana, açúcar e etanol.

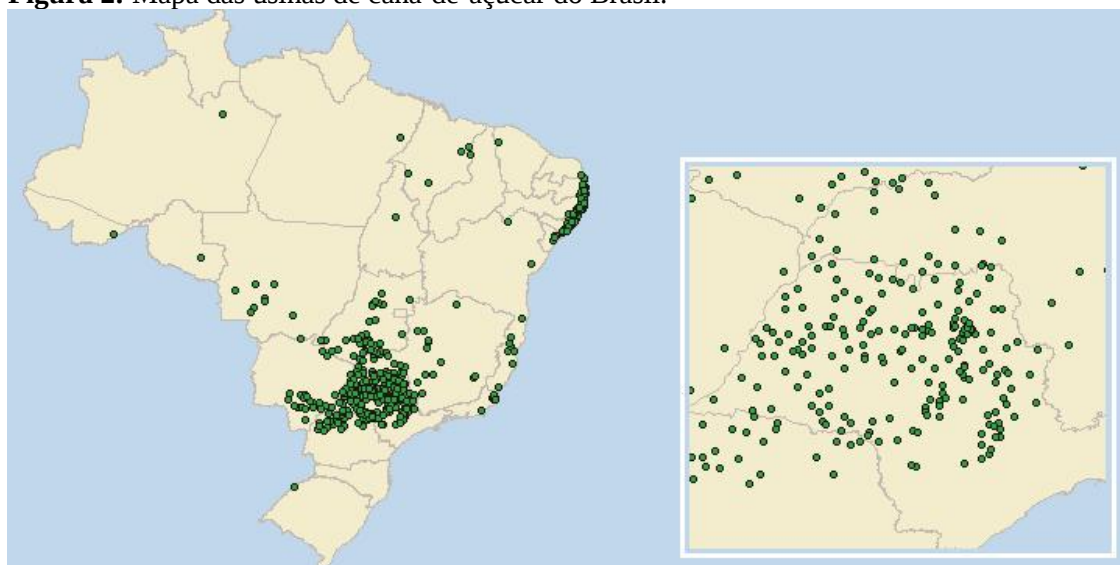


Fonte: UNICA (2008).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo que a produção estimada para a safra 2017/2018 deve alcançar o patamar de 647,6 milhões de toneladas, o que corresponde em um decréscimo de (-1,5%) em relação à safra anterior (CONAB, 2017).

Hoje o Brasil possui 434 usinas autorizadas pelas ANP para a produção de álcool em operação, conforme Figura 2, o maior produtor é o estado de São Paulo com 60% de toda a cana, açúcar e etanol e em segundo lugar o estado do Paraná com 8% da cana moída. Em geral as áreas de cultivo se localizam num raio de 25 quilômetros das usinas devido aos custos de transporte.

Figura 2: Mapa das usinas de cana-de-açúcar do Brasil.



Fonte: UDOP – União dos Produtores de Bioenergia (2017).

A cana-de-açúcar possui um bom aproveitamento, pois seus subprodutos podem ser utilizados na alimentação humana e animal, fertilização de solos e na cogeração de energia. Dentre seus subprodutos e resíduos se destacam: bagaço, torta de filtro, melaço, vinhaça, óleo fúsel, álcool bruto e levedura seca.

2.1.2 Bagaço da cana-de-açúcar

Segundo a AGEITEC (2015), o bagaço é um resíduo fibroso obtido após extração do caldo pelas moendas, a quantidade produzida depende do teor de fibras presente na cana-de-açúcar, a qual apresenta em média 46% de fibra e 50% de umidade, resultando em 280 quilos de bagaço por tonelada de cana processadas e suas principais aplicações podem ser como combustível para caldeiras, alimento para gado confinado e produção de celulose.

O bagaço quando descartado de modo incorreto no solo ou próximo a rios se torna um material poluente, conseqüentemente, as usinas, buscando uma forma de reutilizar o bagaço, optaram por utilizá-lo na geração de energia, por meio da queima.

Hoje das 434 usinas sucroalcooleiras todas são autossuficientes em energia graças à produção de vapor por meio da queima do bagaço da cana-de-açúcar em caldeiras, porém somente 20% destas unidades (88 unidades) comercializam a energia excedente no mercado, sendo que 54 unidades geram energia elétrica para a rede de transmissão no estado de São Paulo (61% do total) e 34 unidades em outros 11 estados brasileiros (NOVACANA, 2017).

O setor sucroalcooleiro no estado do Paraná possui hoje em operação 25 usinas, onde emprega cerca de 55 mil pessoas, está localizada nas regiões de Umuarama, Paranavaí, Maringá e Jacarezinho a maior parte da produção do estado, a produção prevista para o estado do Paraná para a safra 2016/2017 é de 44 milhões a 46 milhões de toneladas segundo (DERAL, 2016).

Segundo Novacana (2013), estima-se que se fosse aproveitado totalmente a biomassa da cana disponível no Brasil para geração de energia elétrica, seria possível produzir energia na ordem de 11.000 MW, o que equivale a uma usina do porte de Itaipu. Somente para o estado de São Paulo a reserva de biomassa da cana permitiria gerar 4.800 MW para a distribuição na rede, sendo 20% maior do que é gerado em todo complexo da Companhia Energética de São Paulo (CESP).

Por um lado, a reutilização do bagaço da cana-de-açúcar traz benefícios, porém a queima acaba gerando outro resíduo perigoso, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, que não pode ser descartado de maneira incorreta.

2.1.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

De acordo com Cordeiro (2006), para cada tonelada de cana-de-açúcar processada na usina sucroalcooleira, são gerados aproximadamente 26% de bagaço e 0,70% de cinza residual, logo, para os 647,6 milhões de toneladas de cana prevista para a safra 2017/2018 poderá gerar 4,5 milhões de toneladas de cinza da cana-de-açúcar na safra de 2017/2018.

A queima do bagaço da cana-de-açúcar ocorre dentro da sala de caldeira, na qual o bagaço possui ótima ignição, por mais que apresente teor elevado de umidade, isso se dá por conter alto teor de materiais voláteis presentes na sua constituição. Segundo Cordeiro (2006) a temperatura de ignição do bagaço está entre 500°C e 600°C com a umidade de 50%, porém com umidade entre 35% e 40%, a temperatura cai para 300°C a 400°C.

Segundo Manhães (1999), a cinza que é gerada a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar é usada como adubo nas próprias lavouras de cana-de-açúcar, por ser um material de difícil desagregação, apresentando na sua constituição poucos nutrientes minerais, tornando assim quase inviável sua utilização. Não podendo ser utilizado como adubo busca-se alternativas para que se possa agregar um maior valor ao subproduto, destacando-se o emprego como aditivo mineral para os sistemas cimentícios.

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresenta grande quantidade de dióxido de silício, encontrado acima de 60% (em massa), esse silício está presente no solo e é absorvido pelas raízes da planta na forma de ácido monossílico (H_4SiO_4), logo após a água da planta sair por transpiração, o ácido monossílico se deposita na parede externa das células da epiderme na forma de sílica gel. Segundo Cordeiro (2006), outra fonte possível de sílica na cinza é a areia (quartzo) proveniente da lavoura, que não é removida totalmente durante a sua lavagem no processamento da cana-de-açúcar.

O estudo sobre a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como aditivo mineral ainda é recente, porém as pesquisas existentes apontam para a viabilidade do uso da cinza em conjunto com o cimento Portland. Esses estudos ainda indicam que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresenta composição química adequada para ser empregada como aditivo mineral,

sendo indicada a realização da moagem desta cinza para que se possa elevar a reatividade e aumentar a superfície específica das partículas para conferir um material mais homogêneo.

2.1.4 Concreto

O concreto é um material da construção resultante da mistura de aglomerantes (cimento Portland), agregados e água, podendo ser utilizados aditivos para retardar ou acelerar pega, diminuir o consumo de água, entre outras finalidades (NEVILLE, 1997).

2.1.4.1 Cimento Portland

A palavra cimento é originada do latim *Caementu* e sua origem remonta cerca de 4.500 anos (ABCP, 2008). As obras do Egito antigo já utilizavam ligas fabricadas a partir de gesso calcinado. Obras gregas e romanas como o Panteão e o Coliseu foram construídas utilizando solos de regiões vulcânicas que endureciam quando submetidas à reação com água.

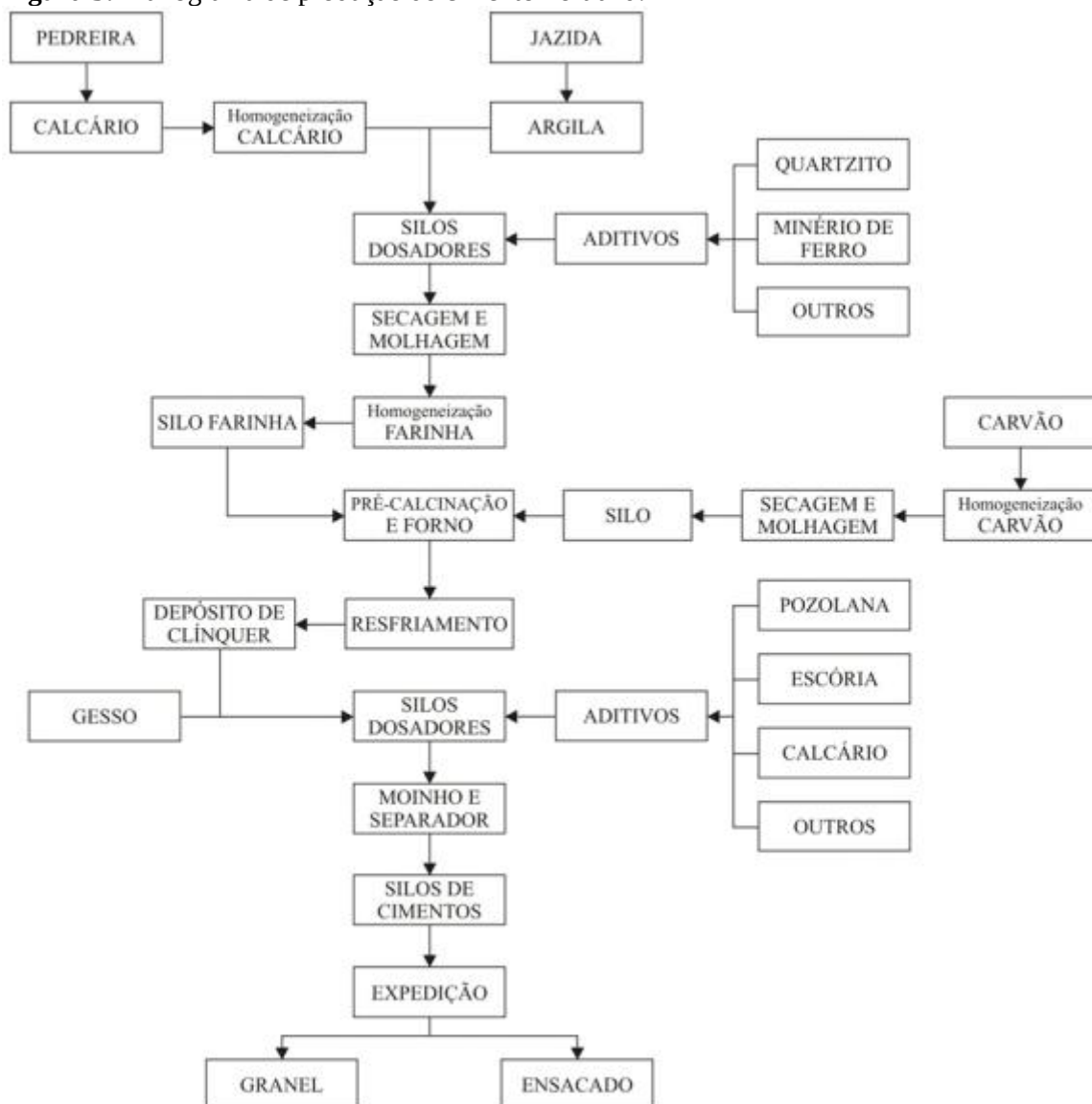
O grande passo para o desenvolvimento do cimento ocorreu em 1756, realizado pelo inglês John Smeaton, que após realizar a calcinação de calcários moles e argilosos, com seguiu descobrir um material de alta resistência. Em 1818, o Francês Vicat, pela mistura de componentes argilosos e calcários, obteve resultados semelhantes aos de Smeaton. Em 1824 o construtor inglês Joseph Aspdin levou argilas e calcários a elevadas temperaturas transformando-as em pó fino, que apresentaram características de endurecimento após hidratação. O construtor patenteou a descoberta como Cimento Portland, que recebeu este nome por apresentar coloração semelhante as rochas encontradas na ilha britânica Portland (ABCP, 2008).

A produção do cimento Portland é realizada a partir de materiais carbonáticos oriundos de calcário e gesso, alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), encontradas em argilas e xistos. O processo de fabricação se dá por meio da moagem das matérias primas e queima dos materiais em proporções adequadas em fornos com temperatura em torno de 1450 °C. Após a queima, a mistura que sofreu uma fusão apresenta-se em forma de pelotas, denominadas de clínquer.

Segundo Neville (1997), o clínquer é misturado a quantidades de gesso e materiais corretivos em moinho rotativo até chegar a uma granulometria fina com cerca de 75 μm . As

funções dos materiais de correção, como areia e minério de ferro, servem para suprir a defasagem de algum material não presente nas matérias primas principais. Após a moagem o cimento fica depositado em silos. Segundo Coutinho (1997), a homogeneização e a moagem podem ser realizadas por via úmida ou via seca, a primeira não sendo muito utilizada pelo alto custo energético para retirar a água posteriormente. A Figura 3 apresenta um fluxograma do processo de fabricação do cimento Portland por via seca.

Figura 3: Fluxograma de produção do cimento Portland.



Fonte: Neville (1997).

A composição final do cimento apresenta como principais componentes silicato tricálcico (C_3S^*), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e

ferroaluminatotetracálcico (C_4AF), Figura 4. Outros componentes também podem ocorrer, porém em menor quantidade que são: periclásio, sulfatos alcalinos e cal livre.

Figura 4: Componentes do cimento Portland.

Nome do composto	Abreviação
Silicato tricálcico	C_3S
Silicato dicálcico	C_2S
Aluminato tricálcico	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	C_4AF

Fonte: Itambé (2008).

Quando o cimento é hidratado ocorre endurecimento do material, algumas horas após a hidratação, que consiste na hidratação dos silicatos e aluminatos. A hidratação do C_3S e C_2S origina silicato de cálcio hidratados, que possuem variação química muito variada, mas são apresentadas genericamente por C-S-H, e hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$. Os cristais C-S-H formados são pequenos e fibrilares e o $Ca(OH)_2$ formam grandes cristais prismáticos (NEVILLE, 1997). Após a hidratação dos silicatos e aluminatos começa a se formar ligações interpartículas, como consequência ocorre o endurecimento progressivo da pasta.

2.1.4.2 Agregados

Agregados são materiais minerais, sólidos e inertes, quando apresentados em granulometrias adequadas são utilizados na fabricação de materiais artificiais resistentes após a mistura de aglomerantes e ativação hidráulica, ou com ligantes betuminosos (OLIVEIRA, 2015).

Segundo Oliveira (2015), os agregados podem ser classificados quanto à origem, dimensões e massa unitária.

Quanto à origem podem ser: naturais - são obtidos na natureza sob sua forma definitiva, como os seixos rolados, areias de rios, cascalho e pedregulhos; artificiais - são obtidos pelo britamento de rochas, como os pedriscos e pedra britada; e industrializados - são obtidos a partir de processos industriais, como a argila expandida e a escória britada.

Quanto à dimensão de suas partículas a NBR 7211 - Agregado para concreto - Especificação (ABNT, 2009), determina como agregado miúdo a areia de origem natural ou resultante de britamento de rochas estáveis, podendo ser a mistura dos dois, na qual os grãos passam pela peneira 4,8 mm e ficam retidos na peneira 0,075 mm. Agregado graúdo é o

pedregulho natural, pedra britada, ou a mistura de ambos, na qual os grãos passam pela peneira 152 mm e ficam retidos na peneira 4,8 mm.

Quanto à massa unitária os agregados podem ser classificados como agregados leves, médios e pesados, conforme Figura 5.

Figura 5: Classificação dos agregados em leves, médios e pesados.

Leves	$M.E. < 1000 \text{ kg/m}^3$
Médios	$1000 \leq M.E. \leq 2000 \text{ kg/m}^3$
Pesados	$M.E. > 2000 \text{ kg/m}^3$

Fonte: Oliveira (2015).

2.1.4.3 Aditivos

O uso de aditivos em concretos e argamassa é tão antigo quanto o cimento e outros aglomerantes. Segundo Coutinho (1997), os romanos utilizavam ovos, sangue, banha ou leite para melhorar a trabalhabilidade dos aglomerantes utilizados. Depois da invenção do cimento Portland no século XIX, as funções dos ativos evoluíram.

Segundo Effting (2014), os aditivos são produtos químicos adicionado ao cimento, à argamassa ou ao concreto para modificar as propriedades físicas ou químicas dos produtos cimentícios, quando necessário, podendo atuar tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido do concreto. Os aditivos são muito empregados na produção de concretos e argamassas, podendo ser considerado como quarto componente do concreto, além da água, do cimento e dos agregados, geralmente variam entre 0,05% a 5% da massa dos materiais cimentícios.

Para a NBR 11768 (ABNT, 2011), aditivos químicos são produtos que quando adicionados a concretos de cimento Portland modificam algumas propriedades para adequá-las as condições exigidas. A norma estabelece também a classificação dos aditivos de acordo com as funções que exercem, sendo: Aditivo redutor de água/plastificante (PR, PA e PN), aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo I (SP-I R, SP-I A e SP-I N), aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo II (SP-II R, SP-II A, SP-II N), aditivo incorporador de ar (IA), aditivo acelerador de pega (AP), aditivo retardador de pega (RP).

2.1.4.4 Água

Segundo Téchne (2003), o concreto endurece com a reação de hidratação, assim a água é um elemento essencial para a produção de concreto, porém não pode ser utilizada qualquer água para amassamento, deve ser água potável, ou seja, água que esteja em condições de consumo. Como o abastecimento de água potável é comum não existe muita dificuldade na obtenção da mesma, mas em regiões em que não esteja disponível água de boa qualidade a NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014), especifica limites máximos de matéria orgânica a 3 mg/l, para resíduos sólidos 5 g/l, sulfatos 0,3 g/l e açúcar 5 mg/l, a fim de não prejudicar o desempenho e qualidade dos materiais cimentícios.

2.1.4.5 Adições minerais

Adições minerais são materiais inorgânicos compostos de sílico-cálcio-aluminosos, que podem ser empregados como materiais substitutos do cimento, não totalmente, mas em parte. As adições minerais que corriqueiramente são utilizadas são as pozolana que reagem com a cal ou a escória de alto forno que possui propriedades pozolânica e cimentícias devido a seu teor de cálcio (ALBUQUERQUE e LIMA, 2014).

As adições minerais devem ser empregadas conforme o desempenho esperado para o concreto, pois elas modificam as propriedades do concreto. As adições são interessantes para o ponto de vista ambiental, já que a maioria dos materiais seriam descartados sem destinação correta acarretando em poluição, assim podem ser aproveitados na produção de cimento ou concreto diretamente com custo benefício baixo.

Os materiais mais utilizados são cinzas volantes: material subproduto da combustão de carvão mineral, que proporciona retardamento do tempo de pega, baixo calor de hidratação, trabalhabilidade e coesão e redução de porosidade; sílica ativa: subproduto da produção de silício metálico que proporciona refinamento dos poros, melhoria das resistências mecânicas de 10 a 40% (resistência a compressão) e aumento da coesão da pasta, mas traz algumas desvantagens como o aumento de consumo de água e a carbonatação; escória de auto forno: subproduto da fabricação de ferro gusa, melhora a trabalhabilidade, refinamento dos poros e maiores resistências; cinza da casca de arroz: traz propriedades similares a sílica ativa e Fíller calcário: proporciona melhor trabalhabilidade, densidade, permeabilidade e exsudação (MORAES, 2012).

2.1.5 Pozolana

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2012), os materiais pozolânicos são materiais siliciosos ou silico-aluminosos, naturais ou artificiais, que podem conter elevado teor de sílica em forma reativa, finamente pulverizadas capaz de reagir na presença de água e em temperatura natural com o hidróxido de cálcio. Qualquer material que tenha as mesmas características descritas acima pode ser considerado pozolânico, seja ele natural ou artificial.

As pozolanas naturais são em geral materiais de origem vulcânica, rochas com elevado teor de óxido de silício reativo e óxido de alumínio. Já as principais pozolanas artificiais são as cinzas volantes resultantes da combustão do carvão mineral em usinas termoelétricas.

As pozolanas naturais são pouco usadas no Brasil, por isso as mais utilizadas são as obtidas com o tratamento térmico de argilas e determinadas rochas com presença de sílica, ou ainda provenientes do subproduto de atividades industriais ou agroindustriais, como as cinzas volantes, cinza da casca de arroz, cinza do bagaço de cana-de-açúcar e bauxita (NITA, 2007).

2.1.5.1 Classificação dos materiais pozolânicos

A NBR 12653 (ABNT, 2012), classifica os materiais pozolânicos em três grupos: classe N, classe C e classe E. Essa classificação ocorre em função da sua origem, características físicas e químicas, estabelecidas nessa mesma norma.

Os materiais pozolânicos classificados na classe N são pozolanas naturais ou artificiais, que obedecem aos requisitos aplicados pela NBR 12653 – Materiais Pozolânicos (ABNT 2012), como certos materiais vulcânicos de caráter petrográficos ácidos, chertossilicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. As pozolanas da classe C são decorrentes do cinza volante, produzida a partir da queima do carvão mineral em usinas termoelétricas, obedecendo aos requisitos aplicados na NBR 12653 (ABNT 2012). Por último as pozolanas classificadas na classe E, sendo qualquer pozolana cujos requisitos difiram das classes anteriores, conforme estabelecido pela NBR 12653 (ABNT 2012).

Segundo a NBR 12653 (ABNT 2012), os materiais pozolânicos devem atender as conformidades com as exigências químicas e físicas estabelecidas respectivamente pelas Figura 6 e Figura 7.

Figura 6: Requisitos químicos.

Valores expressos em porcentagem (%)			
Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$

Fonte: NBR 12653 (2012).

Figura 7: Requisitos físicos.

Propriedades a	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira com abertura de malha de 45 μm	$\leq 34 \%$	$\leq 34 \%$	$\leq 34 \%$
Índice de atividade pozolânica:			
— com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 75 \%$	$\geq 75 \%$	$\geq 75 \%$
— com a cal aos 7 dias	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$
— água requerida	$\leq 115 \%$	$\leq 110 \%$	$\leq 110 \%$
^a Critérios de uniformidade: a massa específica e a finura de amostras individuais não podem ter variação, em relação à média estabelecida em dez ensaios consecutivos, superior a no máximo 5 %, em todos os casos.			

Fonte: NBR 12653 (2012).

2.1.5.2 Atividade Pozolânicas

As pozolanas quando introduzida em uma matriz cimentícia, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, formado pelo processo de hidratação do cimento. O termo atividade pozolânica está relacionado às reações que envolvem os componentes ativos das pozolanas, hidróxido de cálcio e água. Em geral esse termo está relacionado a dois outros fatores: a quantidade máxima de hidróxido de cálcio que reage com a pozolana, e a taxa com que tal combinação é processada (MASSAZZA, 1998).

As atividades pozolânicas dependem principalmente da sua natureza, na qual se destaca a qualidade e quantidade de fases ativas (amorfas) que estão presentes na pozolana com a reação química entre os materiais pozolânicos e o hidróxido de cálcio. É formado um composto com propriedades aglomerantes que melhoram as propriedades do cimento, concreto e argamassas, decorrente do fato que o silício e óxido de alumínio presente na sua composição (FARIAS FILHO *et al.*, 2000).

2.1.5.3 Vantagens da utilização de materiais pozolânicos

As principais vantagens no emprego de materiais pozolânicos são: a economia no custo do cimento, maior trabalhabilidade, menor calor de hidratação, menor permeabilidade e menor segregação do agregado. Todas essas vantagens só existem se o material apresentar a atividade pozolânica, isto é, capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, redução do processo de retração que reduz a reatividade álcali-agregado (FREITAS JR., 2013).

2.1.6 Propriedades do concreto fresco

Conceito que identifica a menor ou maior aptidão do concreto a ser empregado sem perda de homogeneidade. Determina a facilidade com os quais os concretos podem ser misturados, lançados, adensados e acabados (AMARAL, 2005).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as propriedades do concreto fresco são compostas de pelo menos dois componentes principais: fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade do concreto fresco e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação.

Segundo Amaral (2005), as principais propriedades do concreto fresco estão relacionadas com a trabalhabilidade, consistência, segregação, exsudação, compacidade, massa específica e ar incorporado.

A trabalhabilidade é uma propriedade do concreto fresco que identifica sua maior ou menor aptidão em ser empregada para determinada finalidade sem perder sua homogeneidade, sendo uma das propriedades mais importante do concreto fresco, sua integridade está ligada aos processos de transporte, lançamento e adensamento.

Os fatores que podem influenciar na trabalhabilidade estão relacionados à consistência em função da quantidade de água, a compacidade em função da quantidade de vazios, e o travamento em função da quantidade de finos e homogeneidade. O ensaio mais conhecido para a determinação da trabalhabilidade do concreto é o *Slump test* – Abatimento de tronco de cone.

A segregação é a separação dos constituintes do concreto, antes do início da pega. As causas para que ocorra a segregação estão ligadas à diferença de densidade argamassa/agregado, excesso de água, excesso de vibração/adensamento e a falta de cuidado na hora do lançamento.

A exsudação é o excesso de água na mistura do concreto e acaba provocando a migração de finos, formando assim a nata de cimento na parte superior, as consequências para esse excesso de água, e o surgimento de fissuras na parte superior do concreto, o modo que se pode corrigir essa exsudação e aumentar o teor de finos na mistura de concreto, ou utilizar aditivos plastificantes.

2.1.7 Propriedades do concreto endurecido

Segundo Almeida (2002), o estado do concreto endurecido ocorre após o fim da pega e suas principais propriedades são: compacidade, resistência mecânica, elasticidade, retração, fluência, durabilidade, massa específica, propriedades térmicas, absorção, permeabilidade e difusão.

A resistência à compressão simples é a característica mais importante de um concreto, esta resistência é determinada com o rompimento de corpos de prova, na qual é possível obter vários resultados de diferentes concretos para que possam ser comparados.

A resistência do concreto à compressão, para um mesmo concreto, pode sofrer influência de alguns fatores como: fator água/cimento, idade do concreto, forma e dimensão do corpo de prova e a qualidade dos materiais utilizados para a sua produção.

A retração pode-se dizer que é a diminuição do volume de concreto desde o fim da cura até atingir um estado de equilíbrio, o processo de retração ocorre mais rapidamente até uns 3 a 4 meses, e depois ocorre mais lentamente.

2.1.8 Influência das adições minerais no comportamento do concreto

As adições minerais, segundo Moraes (2012) proporcionam ao concreto vantagens, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, mas não compensa baixas de qualidade dos constituintes do concreto, ou quando o traço é pobre.

Quanto às influências no estado fresco, são: Plasticidade e coesão – proporcionam maior relação volume sólidos/volume de água, melhor trabalhabilidade, facilidade de bombeamento e acabamento do concreto; Exsudação e segregação – maior volume de finos, maior compacidade de pasta e menor quantidades de canais para exsudação; Redução do consumo de água – efeito dispersor de partículas pequenas, nas adições de pozolana comuns, e superpozolanas aumentam o consumo de água; Calor de hidratação – menor calor de hidratação do que nas reações de hidratação do cimento e diminui o risco de fissuração térmica.

Quanto às influências no estado endurecido, são: Resistência mecânica – formação de mais compostos resistentes, refinamento dos poros e dos cristais na pasta e maior resistência da matriz na zona de transição; Durabilidade – redução na porosidade e permeabilidade do concreto e menor possibilidade de entrada de agentes nocivos; Resistência a sulfatos – diminuição dos poros, redução do total de álcalis do aglomerante e consumo de parte dos álcalis pela reação pozolânica.

3 CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

A pesquisa trata da análise das características do concreto com adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar nas porcentagens 10, 20 e 30%, também de análise quantitativa com objetivo exploratório. Foram realizados ensaios normatizados nos laboratórios de materiais e construção civil do Centro Universitário Assis Gurgacz.

Foram moldados corpos de prova de concreto de acordo com a (NBR 5738, ABNT 2003) e submetidos a ensaios de resistência à compressão (NBR 5739, ABNT 2007), módulo de elasticidade (NBR 8522, ABNT 2008), índice de atividade pozolânica (NBR 5752, ABNT 1992) e absorção de água por imersão para avaliar a permeabilidade do concreto (NBR 9778, ABNT 2005). Após os ensaios os resultados foram verificados por meio da bibliografia e em comparação ao testemunho, ou seja, corpo de prova sem adição de bagaço da cana-de-açúcar.

3.1.2 Seleção e características dos materiais

3.1.2.1 Agregado miúdo

Para a produção dos concretos utilizou-se areia média, adquirida no comércio de areia e pedra São José, situada na cidade de Cascavel, Paraná. A coleta do agregado foi por meio da extração direta no estoque da empresa, que estava acomodado em montes de acordo com cada tipo de agregado, inexistindo a presença de baías. A amostra foi coletada e posteriormente embalada e encaminhada para a realização dos ensaios de caracterização física do agregado.

Para se determinar as características físicas do agregado miúdo seguiram-se as indicações de ensaios da NBR 7211 – Agregado para concreto: Especificação (ABNT, 2009), em que se fez necessário o ensaio da composição granulométrica. Além desse ensaio a NBR

7211, especifica e sugere ensaios especiais, sendo eles: ensaio de massa específica NBR NM 52 – Agregado miúdo: Determinação de massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009), NBR NM 30 – Determinação da absorção de água (ABNT, 2000) e a umidade do agregado miúdo.

3.1.2.1.1 Determinação da composição granulométrica

Para a realização do ensaio de determinação da composição granulométrica seguiu-se como referência a NBR NM 248 – Agregados: Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003).

A quantidade de material coletado obedeceu aos requisitos da NBR NM 26 – Agregados: Amostragem (ABNT 2009), que regulamenta os procedimentos para a amostragem de agregados, desde a sua extração, redução e transporte das amostras.

Para a realização dos ensaios adotou-se a areia média, segundo a NBR 6502 – Rochas e solos (ABNT, 1995), o tamanho de grão varia entre 0,2 mm e 0,6 mm, de acordo com a Figura 8, em virtude de o tamanho do grão da areia média ser menor que 9,5 mm, a quantidade total de agregados miúdo que deverá ser coletado é de 25 kg ou 40 dm³.

Figura 8: Quantidade de amostras a serem coletadas para ensaios físicos ou químicos.

Tamaño nominal del agregado/ <i>Tamanho nominal do agregado</i>	Número mínimo de muestras parciales/ <i>Número mínimo de amostras parciais</i>	Cantidad total de muestra de campo (mínimo)/ <i>Quantidade total da amostra de campo (mínimo)</i>	
		En masa/ <i>Em massa</i> (kg)	En volumen/ <i>Em volume</i> (dm ³)
≤ 9,5 mm	3	25	40
> 9,5 mm ≤ 19 mm		25	40
> 19 mm ≤ 37,5 mm		50	75
> 37,5 mm ≤ 75 mm		100	150
> 75 mm ≤ 125 mm		150	225

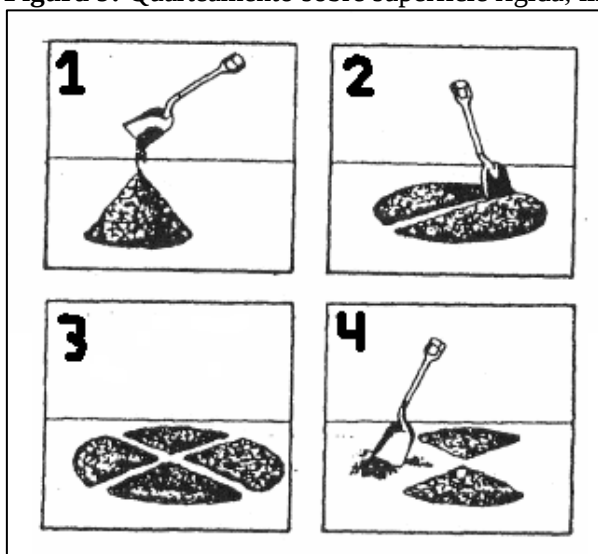
Fonte: NBR NM 26 (ABNT, 2009).

Após a coleta realizou-se o quarteamento da amostra, segundo a NBR NM 27 – Agregados: Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório (ABNT, 2001). O ensaio consiste em despejar a amostra sobre uma superfície lisa, limpa e plana e para que não ocorra nenhuma perda de material, faz-se necessária a homogeneização da mesma revolvendo-a no

mínimo de três vezes. Após a homogeneização juntou-se a amostra formando um cone, então com a utilização de uma colher de pedreiro achatou-se cuidadosamente o cone, até formar um tronco de cone, cujo diâmetro seguiu as especificações da norma, sendo seu valor de quatro a oito vezes a sua altura.

Após o achatamento do cone a amostra foi dividida em quatro partes iguais utilizando uma colher de pedreiro, eliminando duas partes no sentido diagonal, sempre cuidando para que não houvesse perda de materiais da amostra, ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Quarteamento sobre superfície rígida; limpa e plana.



Fonte: NBR NM 27 (ABNT, 2001).

Com o material remanescente repetiram-se as operações descritas acima até chegar à quantidade necessária da amostra para execução dos ensaios, em que foram utilizadas apenas duas amostras (X e Y) do quarteamento, a massa mínima por amostra de ensaio foi definida pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), que traz para agregados com dimensões máximas nominais menores que 4,75 mm, deve-se adotar 300 gramas do agregado miúdo para cada amostra, de acordo com a Figura 10.

Figura 10: Massa mínima por amostra de ensaio.

Dimensión máxima nominal del agregado / Dimensão máxima nominal do agregado mm	Masa mínima de la muestra de ensayo / Massa mínima da amostra de ensaio kg
< 4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300
(*) Después del secado. / Após secagem.	

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para a continuação do ensaio a amostra foi seca em estufa por vinte e quatro horas a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, deixado a amostra esfriar em temperatura ambiente, e determinando as suas massas (X e Y). O conjunto de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria atendeu as exigências da NBR NM-ISO 3310-1 – Peneiras de ensaio: Requisitos técnicos e verificação Parte 1 – Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ABNT, 2010) ou NBR NM-ISO 3310-2 – Peneiras de ensaio: Requisitos técnicos e verificação Parte 2 – Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada (ABNT, 2010) e contou com as peneiras da série normal e intermediária, conforme Figura 11, sendo utilizada a NBR 7211 (ABNT, 2009) para determinar as peneiras que foram usadas no ensaio, conforme Figura 12, a fim de que no final pudesse ser comparado os valores obtidos no ensaio com os que a norma apresenta como limites inferiores e superiores.

Figura 11: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Serie Normal / <i>Série Normal</i>	Serie Intermedia / <i>Série Intermediária</i>
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 12: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

As peneiras foram encaixadas e previamente limpas a fim de formar um único conjunto com a ordem crescente das peneiras, iniciando com um fundo para reter o material que passa pela última peneira. O conjunto foi formado por: fundo, peneira 150µm, 300µm, 600 µm, 1,18 mm, 2,36 mm, 4,75 mm, 6,30 mm e 9,5 mm. O conjunto de peneira foi colocado no agitador mecânico de peneiras e adicionado a amostra X, que ficou ligado por um tempo de quinze minutos a fim de garantir a separação e classificação dos diferentes tamanhos de grãos da amostra.

Após desligar o agitador de peneira, retiraram-se cada uma das peneiras e pesou-se o conteúdo retido em cada uma delas, inclusive o fundo. Repetiu-se o mesmo procedimento para a amostra Y.

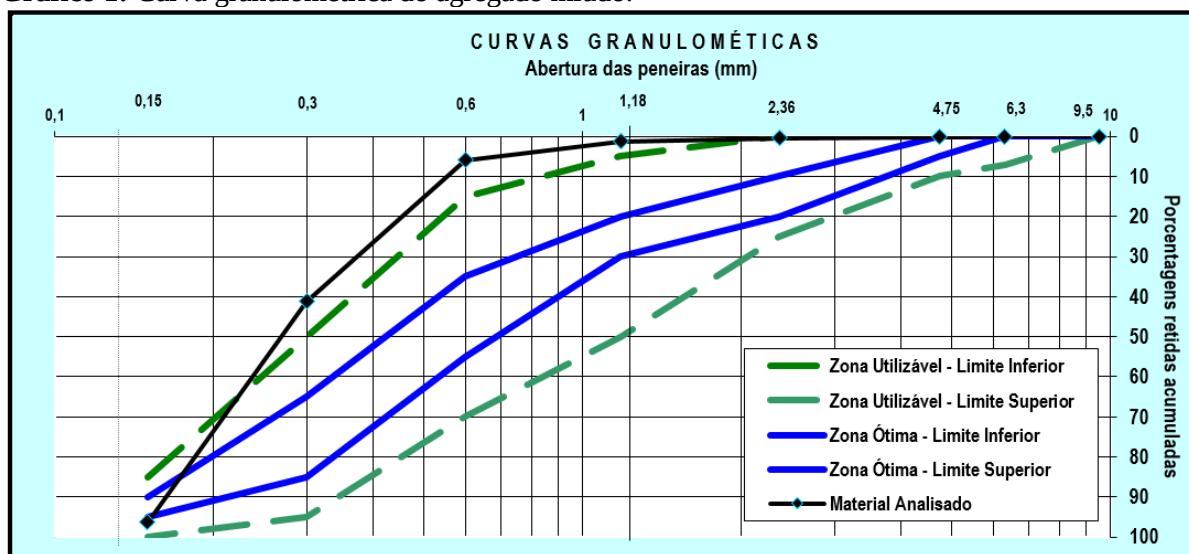
Após a realização dos ensaios, os valores obtidos foram inseridos em uma planilha fornecida pela UDESC – Joinville, para que pudesse ser gerada a curva granulométrica do agregado miúdo, conforme Gráfico 1. Os resultados obtidos no peneiramento para cada amostra estão representados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultado da granulometria do agregado miúdo.

Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (gr) =		300,0		(Mrm) Massa retida Média (%)	(Mra) Massa retida Acumulada (%)
	b) massa inicial seca (gr) =		300,0			
	(Mrg) Massa retida (gr)		(Mr%) Massa retida (%)			
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b		
6,3	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4,75	0,6	0,3	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%
2,36	1,06	0,7	0,4%	0,2%	0,3%	0,4%
1,18	2,5	2,7	0,8%	0,9%	0,9%	1,3%
0,6	14,1	13,8	4,7%	4,6%	4,7%	6,0%
0,3	104,3	106,9	34,8%	35,7%	35,2%	41,2%
0,15	165,6	164,4	55,2%	54,9%	55,1%	96,3%
Fundo	11,7	10,5	3,9%	3,5%	3,7%	100,0%
(Mt) Total S	299,9	299,2	Módulo de finura =		1,45	
			Diâmetro Máximo =		1,18mm	
Mt = (S de Mrg), Mr% = (Mrg / Mt) *100 Mra = (S Mrm Massa retida media)						
Módulo finura = S % retidas acumuladas, nas peneiras dasérie normal / 100 D. máximo = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada < 5%						

Fonte: Autores (2017).

Gráfico 1: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: UDESC – Joinville (2014).

Analisando a curva granulométrica do agregado miúdo, pôde-se perceber que a amostra ensaiada não estava dentro dos limites estipulados pela NBR 7211 (ABNT, 2009), porém, o mesmo foi adquirido no comércio local como sendo areia média. Foi observado por meio da curva granulométrica que havia a presença de um elevado teor de material fino, caracterizando-se a amostra como uma areia média fina.

3.1.2.1.2 Determinação da massa específica

Segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), massa específica é a relação entre a massa do agregado miúdo seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. A amostragem do agregado foi realizada de acordo com as NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27 (ABNT, 2001), a quantidade de massa necessária para a realização do ensaio foi de 1.000 gramas, obtida por meio do quarteamento.

Iniciando o ensaio foram pesados 500 gramas do agregado miúdo. A amostra foi colocada dentro de um recipiente graduado com capacidade de 500 ml, registrando a massa do conjunto (m_{ar}) e completando com água até atingir a marca de 500 ml. Em seguida, realizou-se a agitação do recipiente a fim de se eliminar as bolhas de ar colocando o recipiente com a amostra em banho de água mantendo a temperatura constante de 21 ± 2 °C.

Após uma hora aproximadamente, completou-se com água até a marca de 500 ml do recipiente determinando a massa total, em seguida foi despejado o conteúdo do recipiente em uma bandeja e colocado para secar em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ até que se obtivesse massa constante, após, foi deixado esfriar à temperatura ambiente em um dessecador e então pesada a amostra.

A massa específica aparente do agregado miúdo seco foi calculada pela Equação (1) e Equação (2).

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (1)$$

Onde:

d_1 : massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetros cúbico;

m : massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V : volume do frasco, em centímetros cúbico;

V_a : volume de água adicionado ao frasco, de acordo com a seguinte formula, em centímetros cúbicos.

$$V_a = \frac{M_2 - M_{ar}}{\rho_a} \quad (2)$$

Onde:

m_{ar} : massa do conjunto (frasco mais agregado), em gramas;

m_t : massa total (frasco mais agregado mais água), em gramas;

ρ_a : massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Os valores obtidos após a realização do ensaio foram transferidos para uma tabela, na qual foram feitos os cálculos por meio da Equação (1) e (2) para determinar a massa específica do agregado miúdo, obtendo uma massa específica de 2,82 gramas por centímetro cúbico, conforme Tabela 2

Tabela 2: Resultados para determinação da massa específica do agregado miúdo.

Amostra	Massa (g) da amostra nas condições:				Massa Especifica Aparente do Agregado seco g/cm ³
	Seca (m)	Saturada Superfície Seca (ms)	Frasco + Areia (m1)	Frasco + Areia + Água (m2)	
1	492,70	500,00	645,90	971,20	2,82

Fonte: Autores (2017).

3.1.2.1.3 Determinação da absorção de água

Segundo a NBR NM 30 – Determinação da absorção de água (ABNT, 2000), a absorção de água é definida como sendo um processo pelo qual o líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido.

A amostragem do agregado miúdo foi realizada de acordo com as NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27 (ABNT, 2001), a quantidade de massa necessária para a realização do ensaio foi de 1.000 gramas (m) sendo obtida por meio do quarteamento. Foi colocada a amostra em uma bandeja e acondicionada dentro da estufa para secagem por um período de 24 horas a uma temperatura de 105 ± 5 °C, decorrido o período de secagem a amostra foi saturada de água por mais 24 horas.

Após esse período, foi retirada a amostra e estendida sobre uma superfície plana e submetida a uma leve corrente de ar quente, proveniente de um soprador térmico, sempre revolvendo-a com frequência a fim de garantir uma secagem uniforme. Foi prosseguido com esta secagem até que os grãos da amostra não estivessem aderidos de forma marcante.

Pegando a amostra e despejando em um molde tronco-cônico, aplicou-se suavemente 25 golpes com uma haste de compactação e então levantou o molde. Se a amostra mantiver-se na mesma forma do molde, deverá continuar com a secagem, revolvendo-a e realizar o teste em intervalos frequentes, até que o cone do agregado miúdo desmorone ao ser retirado o molde. Nesse momento o agregado chegou à condição de saturada superfície seca, então é determinado a sua massa (m_s).

A absorção de água do agregado miúdo foi calculada por meio da Equação (3):

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

A: é a absorção de água, em porcentagem;

m_s : massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

m: massa da amostra seca em estufa, em gramas.

Os valores obtidos após a realização do ensaio foram transferidos para uma tabela, na qual foram feitos os cálculos por meio da Equação(3), para se determinar a absorção do agregado miúdo, obtendo uma absorção de água de 2,39%, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Resultados para determinação da absorção de água do agregado miúdo.

Amostra	Massa (g) da amostra nas condições:		Absorção de água %
	Seca (m)	Saturada Superfície Seca (m_s)	
1	488,32	500,00	2,39

Fonte: Autores (2017).

3.1.2.1.4 Determinação do teor de umidade

Para a determinação do teor de umidade do agregado miúdo, foi seguido como referência a apostila para as aulas práticas de materiais de construção, elaborado pelo professor Aldo de Almeida Oliveira, da Universidade Federal do Ceará (UFC, 2007). O teor de umidade é definido como sendo o quociente percentual entre a massa total de água do agregado miúdo e sua massa seca (NBR 9939, ABNT 2011).

A amostragem do agregado será realizada de acordo com as NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27 (ABNT, 2001), como demonstrado anteriormente no ensaio de granulometria. Para a realização do ensaio, a massa mínima para a realização do ensaio é de 500 gramas de agregado miúdo (m_i). (ALMEIDA, 2007).

Após sua pesagem foi colocado a amostra para secar em estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C por 24 horas, depois, foi pesada a amostra e registrada sua massa final (m_f).

O teor de umidade total do agregado graúdo foi calculado por meio da Equação(4):

(4)

$$h = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100$$

Onde:

h: é o teor de umidade total, em porcentagem;

m_i: massa inicial da amostra, em gramas;

m_f: massa final da amostra seca, em gramas.

Os valores obtidos após a realização do ensaio foram transferidos para uma tabela, na qual foram feitos os cálculos por meio da Equação(4) para se determinar o teor de umidade do agregado graúdo, obtendo um teor máximo de umidade de 1,87%, conforme Tabela 6.

Tabela 4: Resultado do teor de umidade do agregado graúdo.

Amostra	Massa (g) da amostra:		Teor de Umidade %
	Inicial (mi)	Após secagem (mf)	
1	500,00	490,82	1,87

Fonte: Autores (2017).

3.1.2.2 Agregado graúdo

Para a produção dos concretos adotou-se a brita 1, adquirida no comércio de areia e pedra São José, situada na cidade de Cascavel, Paraná. A coleta do agregado graúdo foi por meio da extração direta no estoque da empresa, que estava acomodado em montes de acordo com cada tipo de agregado, inexistindo a presença de baias de divisão. As amostras foram coletadas e embaladas para, posteriormente, serem realizados os ensaios de caracterização física do agregado.

Para se determinar as características físicas do agregado graúdo foram seguidas as indicações de ensaios da NBR 7211 (ABNT, 2009), em que se faz necessário o ensaio da composição granulométrica. Além desse ensaio, a norma especifica o ensaio de teor de material pulverulento, NBR NM 46 – Agregados: Determinação do material fino que passa através da

peneira 75 μm , por lavagem (ABNT, 2003), da massa específica NBR NM 53 – Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009) e a umidade do agregado NBR 9939 – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio (ABNT, 2011).

3.1.2.2.1 Determinação da composição granulométrica

Para a realização do ensaio de determinação da composição granulométrica seguiu-se como referência a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A quantidade de material a ser coletado obedeceu aos requisitos da NBR NM 26 (ABNT, 2009), que regulamenta os procedimentos para a amostragem de agregados, desde a sua extração, redução e transporte das amostras.

Para a realização dos ensaios adotou-se a brita 1, que segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), o tamanho do grão varia entre 9,5 mm e 19,0 mm, conforme Figura 13. A NBR NM 26 (ABNT, 2009) estipula a quantidade total de agregado graúdo para o ensaio, que é de 25 kg ou 40dm³.

Figura 13:Quantidade de amostra a serem coletadas para ensaios físicos ou químicos.

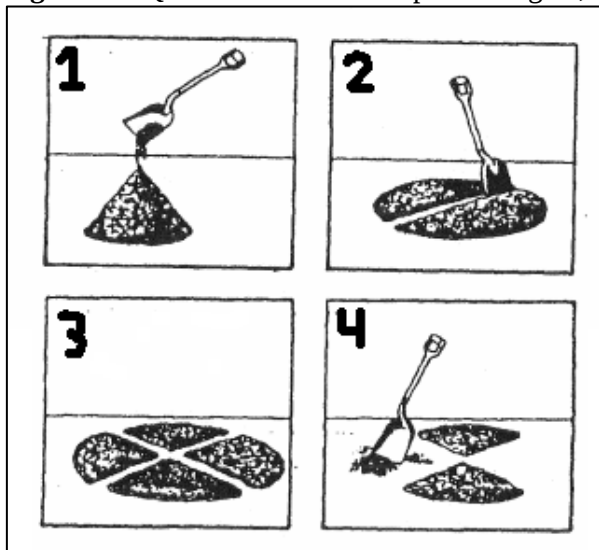
Tamaño nominal del agregado/ <i>Tamanho nominal do agregado</i>	Número mínimo de muestras parciales/ <i>Número mínimo de amostras parciais</i>	Cantidad total de muestra de campo (mínimo)/ <i>Quantidade total da amostra de campo (mínimo)</i>	
		En masa/ <i>Em massa</i> (kg)	En volumen/ <i>Em volume</i> (dm ³)
≤ 9,5 mm	3	25	40
> 9,5 mm ≤ 19 mm		25	40
> 19 mm ≤ 37,5 mm		50	75
> 37,5 mm ≤ 75 mm		100	150
> 75 mm ≤ 125 mm		150	225

Fonte: NBR NM 26 (ABNT, 2009).

Após a coleta realizou-se o quarteamento da amostra, ensaio que consiste em despejá-la sobre uma superfície lisa, limpa e plana para que não ocorra nenhuma perda de material. Fez-se necessária a homogeneização da amostra revolvendo-a no mínimo três vezes, após, juntou-se a amostra formando um cone, então com a utilização de uma colher de pedreiro foi achatado cuidadosamente o cone até formar um tronco de cone, cujo diâmetro ficasse de quatro a oito vezes a sua altura (NBR NM 27, ABNT 2001).

Após o achatamento do cone a amostra foi dividida em quatro partes iguais utilizando uma colher de pedreiro, eliminando duas partes no sentido diagonal, sempre cuidando para que não houvesse perdas de materiais da amostra, ilustrado na Figura 14.

Figura 14: Quarteamento sobre superfície rígida; limpa e plana.



Fonte: NBR NM 27 (ABNT, 2001).

Com o material remanescente repetiu-se as operações descritas acima, até chegar à quantidade necessária da amostra para execução dos ensaios, em que foram utilizadas apenas duas amostras (m_1 e m_2) do quarteamento. A massa mínima por amostra de ensaio é definida pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), que traz para agregados com dimensões máximas nominais de 19,0 mm a quantidade de 5000 gramas do agregado graúdo para cada amostra de acordo com a Figura 15.

Figura 15: Massa mínima por amostra de ensaio.

Dimensión máxima nominal del agregado / Dimensão máxima nominal do agregado mm	Masa mínima de la muestra de ensayo / Massa mínima da amostra de ensaio kg
< 4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300
(*) Después del secado. / Após secagem.	

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para a continuação do ensaio a amostra foi seca em estufa por vinte e quatro horas a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, deixando a amostra esfriar em temperatura ambiente e em seguida determinando as suas massas (m_1 e m_2). O conjunto de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria atendeu às exigências da NBR NM-ISO 3310-1 (ABNT, 2010) ou NBR NM-ISO 3310-2 (ABNT, 2010) e contou com as peneiras da série normal e intermediária, conforme Figura 16. Foi utilizada a NBR 7211 (ABNT, 2009) para determinar as peneiras que foram usadas no ensaio conforme Figura 17, para que no final pudesse comparar os valores obtidos nos ensaios com os que a norma apresenta como limites inferiores e superiores.

Figura 16: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Serie Normal / Série Normal	Serie Intermedia / Série Intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 17: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica $d/D^{(1)}$				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ²⁾	87 – 100	-
19 mm	-	2 - 15 ²⁾	65 ²⁾ - 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ²⁾ - 65 ²⁾	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 ²⁾	80 ²⁾ – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 ²⁾ – 65 ²⁾	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 ²⁾ – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

As peneiras foram previamente limpas a fim de formar um único conjunto com a ordem crescente das peneiras, iniciando com um fundo para reter o material que passasse pela última peneira. O conjunto foi formado por: fundo, peneira 150µm, 300µm, 600 µm, 1,18 mm, 2,36 mm, 4,75 mm, 6,30 mm e 9,5 mm. O conjunto de peneiras foi colocado no agitador

mecânico de peneiras, e adicionado à amostra X, que ficou ligado por um tempo de quinze minutos a fim de garantir a separação e classificação dos diferentes tamanhos de grãos da amostra.

Após desligar o agitador de peneiras, retiraram-se cada uma das peneiras e foi pesado o conteúdo retido em cada uma delas, inclusive o fundo. Repetiu-se o mesmo procedimento para a amostra Y.

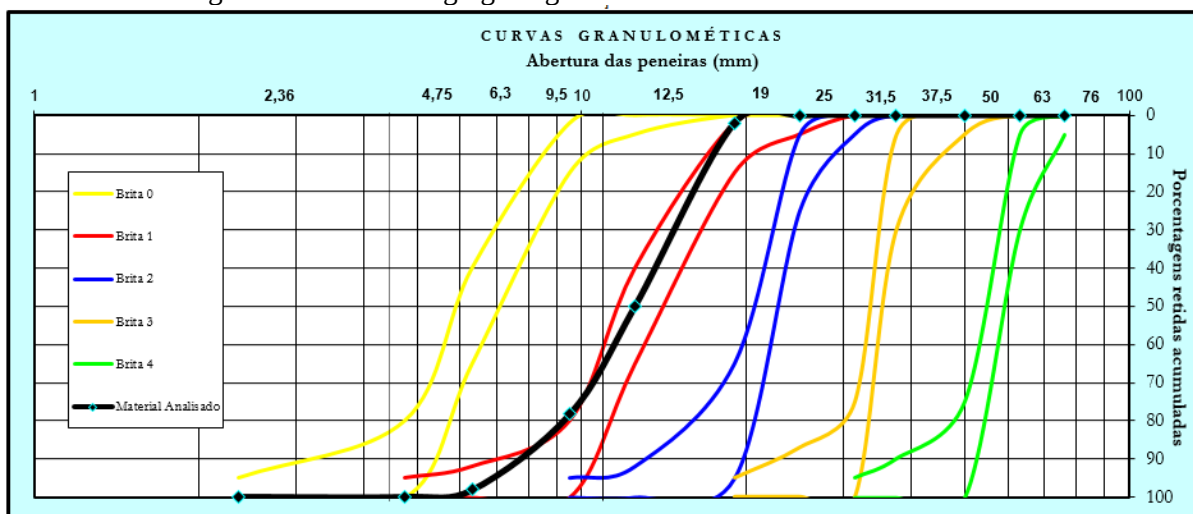
Após a realização dos ensaios, os valores obtidos foram inseridos em uma planilha fornecida pela UDESC – Joinville, para que pudesse ser gerada a curva granulométrica do agregado miúdo, conforme Gráfico 1. Os resultados obtidos no peneiramento para cada amostra estão representados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultado da granulometria do agregado graúdo.

Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (kg) =		5,00		(Mrm) Massa retida Média (%)	(Mra) Massa retida Acumulada (%)
	b) massa inicial seca (kg) =		5,00			
	(Mrg) Massa retida (kg)		Mr%) Massa retida (%)			
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b		
25	0,0	0,01	0,0%	0,2%	0,1%	0,1%
19	0,11	0,09	2,2%	1,8%	2,0%	2,1%
12,5	2,50	2,30	49,5%	46,2%	47,8%	49,9%
9,5	1,49	1,33	29,5%	26,7%	28,1%	78,0%
6,3	0,89	1,11	17,6%	22,3%	20,0%	98,0%
4,8	0,06	0,12	1,2%	2,4%	1,8%	99,8%
2,39	0,00	0,00	0,0%	0,0%	0,0%	99,8%
Fundo	0,00	0,02	0,0%	0,4%	0,2%	100,0%
(Mt) total S	5,05	4,98	Módulo de finura =		4,28	
			Diâmetro Máximo =		19 mm	
Mt = (S de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) *100 Mr = (S Mrm Massa retida media)						
Módulo finura = S % retidas acumuladas, nas peneiras da série normal / 100 D. máximo = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada < 5%						

Fonte: Autores (2017).

Gráfico2: Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: UDESC (2014).

Analisando a curva granulométrica do agregado graúdo, pode-se perceber que a amostra ensaiada está dentro dos limites estipulados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

3.1.2.2.2 Determinação da massa específica e absorção

Segundo a NBR NM 53 – Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009), massa específica é a relação entre a massa do agregado graúdo seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. A amostragem do agregado foi realizada de acordo com as NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27 (ABNT, 2001), como demonstrado anteriormente no ensaio de granulometria. Para determinar a quantidade de amostra para o ensaio, primeiramente foi eliminado todo material passante pela peneira 4,75 mm por via seca, em seguida o agregado graúdo foi lavado para remover o pó ou quaisquer outros materiais da sua superfície.

A amostra foi levada à estufa até obter massa constante a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, logo após foi resfriada à temperatura ambiente de 1 a 3 horas. Para determinar a quantidade de agregado para os ensaios considerou-se a dimensão máxima característica do agregado, sendo o agregado graúdo brita nº 1 (9,5 mm a 19,0 mm), fez-se necessária a quantidade de 3 kg, conforme Figura 18.

Figura 18: Massa mínima de amostra de ensaio.

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa (kg)
12,5	2
19,0	3
25,0	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
112	50
125	75
150	125

Fonte: NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Para o procedimento de ensaio, pesou-se a amostra como indicado na Figura 13, dessa forma determinando a sua massa seca (m), colocando-a dentro de um recipiente, que é constituído de um cesto de arame com abertura de malha igual ou inferior a 3,35 mm e capacidade para 4 dm³ a 7 dm³, imergindo o recipiente dentro de um tanque estanque com água, na qual permaneceu por um período de 24 horas, em temperatura ambiente.

A amostra foi retirada do tanque e seca superficialmente com o auxílio de um pano, para assim determinar a sua massa saturada com superfície seca (m_s), posteriormente foi colocado a amostra novamente no recipiente para que se pudesse determinar a sua massa submersa (m_a). A balança foi equipada com um dispositivo adequado para manter o recipiente que contém a amostra suspenso na água.

A massa específica aparente do agregado graúdo foi calculada pela Equação (5).

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (5)$$

Onde:

d: massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m: massa da amostra seca, em gramas;

m_s : massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

m_a : massa em água da amostra, em gramas.

A absorção de água do agregado gráúdo foi calculada por meio da Equação (6):

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

A: é a absorção de água, em porcentagem;

m_s : massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

m : massa da amostra seca, em gramas.

Os valores obtidos após a realização do ensaio foram transferidos para uma tabela, na qual foram feitos os cálculos por meio da Equação(5) e (6) para se determinar a massa específica e absorção de água do agregado gráúdo, obtendo uma massa específica de 2,65 gramas por centímetro cúbico e absorção de 7,47%, conforme Tabela 6.

Tabela 6: Resultado da massa específica e absorção de água do agregado gráúdo.

Amostra	Massa (g) da amostra nas condições:			Massa Especifica Aparente do Agregado seco g/cm ³	Absorção de água %
	Seca (m)	Saturada Superfície Seca (ms)	Submerso (ma)		
1	3000,00	3224,20	2090,00	2,65	7,47

Fonte: Autores (2017).

3.1.2.2.3 Determinação do teor de material pulverulento

Segundo a NBR NM 46 (ABNT, 2003) é o método que permite determinar por lavagem a quantidade de material fino que passa pela peneira de malha 0,075 mm, estando presente nos agregados miúdos ou gráúdos. Esse excesso de material pulverulento em concretos prejudica a aderência entre a pasta de cimento e a argamassa, fazendo assim aumentar o consumo de água devido a sua alta superfície específica, causando problemas como retração e diminuição da resistência.

A amostragem dos agregados foi realizada de acordo com as NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27, ABNT 2001), como demonstrado anteriormente no ensaio de granulometria para ser determinar a quantidade de amostra para o ensaio, a amostra definida

pela NBR NM 46 (ABNT, 2003), em que se levou em consideração a dimensão máxima do agregado, que no caso deste ensaio utilizou-se a brita nº 1 (diâmetro do grão variando entre 9,5 mm a 19 mm), que resultou em uma massa total de 2500 gramas de agregado graúdo, conforme Figura 19.

Figura 19: Massa mínima da amostra de ensaio.

Tamanho máximo nominal / Dimensão máxima nominal mm	Massa mínima / Massa mínima g
2,36	100
4,75	500
9,5	1 000
19,0	2 500
37,5 o maior / ou superior	5 000

Fonte: NBR NM 46 (ABNT, 2003).

A amostra foi colocada para secar em estufa, mantendo uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, por aproximadamente 24 horas, até que obtivesse massa constante e posteriormente registrada sua massa (m_i).

A amostra foi colocada em uma bandeja, adicionada água e agitada vigorosamente até que o material pulverulento ficasse em suspensão, despejou-se a água de lavagem sobre as peneiras de 1,18 mm e 0,075 mm, colocando-as em ordem crescente, em seguida, adicionado uma segunda quantidade de água, novamente agitado e vertido a água sobre as peneiras. Essa operação foi executada até que a água da lavagem ficasse visivelmente límpida.

Todo o material retido nas peneiras retornou junto com a amostra lavada e foi levado a uma estufa para secar a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até que se obtivesse massa constante e posteriormente, determinando a massa restante (m_f).

A quantidade de material que passou pela peneira 0,075 mm foi calculada pela Equação (7).

(7)

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

Onde:

M: porcentagem de material mais fino que a peneira 0,075 mm por lavagem;

m_i : massa original da amostra seca, em gramas;

m_f : massa da amostra seca após lavagem, em gramas;

Os valores obtidos após a realização do ensaio foram transferidos para uma tabela, na qual foram feitos os cálculos por meio da Equação (7), conforme Tabela 7. Segundo Petrucci (1998), os materiais pulverulentos têm uma grande superfície específica, a qual exige água em um caráter significativo aumentando a relação água/cimento, acarretando na perda de resistência do concreto e afetando sua trabalhabilidade.

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009) que estabelece a quantidade máxima do teor de material pulverulento em 1%, o que faz com que a amostra esteja dentro dos limites estabelecidos por norma, em que obteve 0,56% de material fino passante pela peneira 0,075 mm.

Tabela 7: Resultado do teor de material pulverulento.

Amostra	Massa (g) da amostra:		Teor de Material Pulverulento %
	Inicial (mi)	Após lavagem e secagem (mf)	
1	2500,00	2486,00	0,56

Fonte: Autores (2017).

3.1.2.2.4 Determinação do teor de umidade

Segundo a NBR 9939 – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio (ABNT, 2011) é definido que o teor de umidade total é o quociente percentual entre a massa total de água do agregado e sua massa seca.

A amostragem do agregado será realizada de acordo com as NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27 (ABNT, 2001), como demonstrado anteriormente no ensaio de granulometria. Para a realização do ensaio a massa mínima para a sua realização é determinada pela máxima dimensão característica do agregado conforme Figura 20, sendo a dimensão máxima característica do agregado gráudo de 19 mm, pesando-se 3000 gramas de material (m_i).

Figura 20: Massa mínima de amostra para ensaio.

Dimensão máxima característica do agregado mm	Massa mínima da amostra de ensaio g
9,5	1 500
12,5	2 000
19	3 000
25	4 000
38	6 000
50	8 000
76	13 000

Fonte: NBR 9939 (ABNT,2011).

Após sua pesagem foi colocado a amostra para secar em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 hora. Depois de decorrido esse período de tempo foi pesado a amostra e registrada sua massa final (m_f).

O teor de umidade total do agregado graúdo foi calculado por meio da Equação (8):

$$h = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

h : é o teor de umidade total, em porcentagem;

m_i : massa inicial da amostra, em gramas;

m_f : massa final da amostra seca, em gramas.

Os valores obtidos após a realização do ensaio foram transferidos para uma tabela, na qual foram feitos os cálculos por meio da Equação (8) para se determinar o teor de umidade do agregado graúdo, obtendo um teor máximo de umidade de 0,75%, conforme Tabela 6.

Tabela 8: Resultado do teor de umidade do agregado graúdo.

Amostra	Massa (g) da amostra:		Teor de Umidade %
	Inicial (mi)	Após secagem (mf)	
1	3000,0	2977,40	0,75

Fonte: Autores (2017).

3.1.2.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar CBC

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) utilizada nesta pesquisa foi obtida na Usina de Álcool e Açúcar Goioerê, localizada no município de Moreira Sales, PR, pertencente ao grupo Usina Santa Terezinha (USACUCAR).

O bagaço é obtido após a extração do caldo, o qual é reutilizado como fonte de geração de energia em sistemas de caldeiras na própria usina, tornando assim a usina autossustentável energeticamente. Após o bagaço ser queimado na caldeira é obtido a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).

Para a pesquisa foi constatado que a cinza se apresentava em estado de queima homogênea sem a presença de materiais orgânicos presentes no seu meio, não havendo a necessidade de realizar uma segunda queima do material.

A cinza não passou por um processo de moagem, a fim de se verificar o comportamento do material em sua forma primária.

Foram realizados os ensaios de composição granulométrica e massa específica. Os dados coletados de cada ensaio foram necessários para a determinação do traço do concreto.

3.1.2.3.1 Determinação da composição granulométrica

Para a realização do ensaio de determinação da composição granulométrica foi seguida como referência a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A quantidade de material a ser coletado obedeceu aos requisitos da NBR NM 26 (ABNT, 2009), que regulamenta os procedimentos para a amostragem de agregados, desde a sua extração, redução e transporte das amostras. Para a realização desse ensaio, como não se

conhece a granulometria da cinza, adotou-se que a cinza possuía tamanho nominal menor que 9,5 mm, utilizando a Figura 21, sendo que a quantidade total de massa da cinza do bagaço da cana-de-açúcar é de 25 kg ou 40 dm³.

Figura 21: Quantidade de amostra a serem coletadas para ensaios físicos ou químicos.

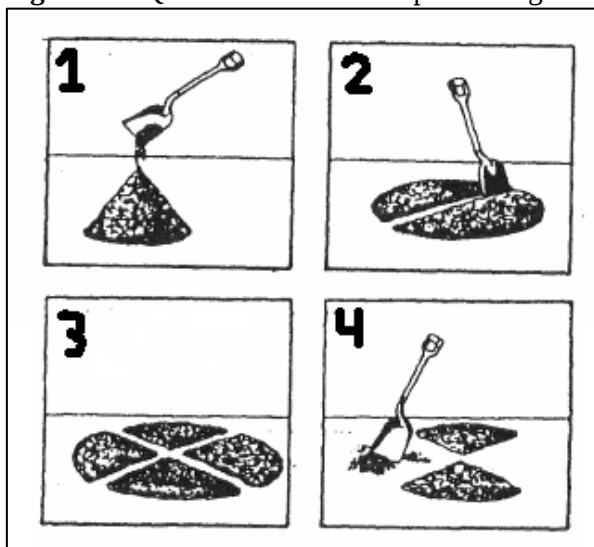
Tamaño nominal del agregado/ <i>Tamanho nominal do agregado</i>	Número mínimo de muestras parciales/ <i>Número mínimo de amostras parciais</i>	Cantidad total de muestra de campo (mínimo)/ <i>Quantidade total da amostra de campo (mínimo)</i>	
		En masa/ <i>Em massa</i> (kg)	En volumen/ <i>Em volume</i> (dm ³)
≤ 9,5 mm	3	25	40
> 9,5 mm ≤ 19 mm		25	40
> 19 mm ≤ 37,5 mm		50	75
> 37,5 mm ≤ 75 mm		100	150
> 75 mm ≤ 125 mm		150	225

Fonte: NBR NM 26 (ABNT, 2009).

Após a coleta realizou-se o quarteamento da amostra, segundo a NBR NM 27 (ABNT, 2001). O ensaio consistiu em despejar a amostra sobre uma superfície lisa, limpa e plana para que não ocorresse nenhuma perda de material e fez-se necessária a homogeneização da amostra revolvendo-a no mínimo de três vezes. Após a homogeneização juntou-se a amostra formando um cone, então, com a utilização de uma colher de pedreiro foi achatado cuidadosamente o cone até formar um tronco de cone, cujo diâmetro ficasse de quatro a oito vezes a sua altura.

Após o achatamento do cone, a amostra foi dividida em quatro partes iguais utilizando uma colher de pedreiro, eliminando duas partes no sentido diagonal, sempre cuidando para que não houvesse perda de material da amostra, ilustrado na Figura 22.

Figura 22: Quarteamento sobre superfície rígida limpa e plana.



Fonte: NBR NM 27 (ABNT, 2001).

Com o material remanescente repetiram-se os procedimentos descritos acima, até chegar à quantidade necessária da amostra para execução dos ensaios. Foram utilizadas apenas duas amostras (X e Y) do quarteamento. A massa mínima por amostra de ensaio foi definida pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Como não havia conhecimento da dimensão máxima nominal da cinza, adotou-se a quantidade de 300 gramas para a realização deste ensaio, conforme Figura 23.

Figura 23: Massa mínima por amostra de ensaio.

Dimensión máxima nominal del agregado / Dimensão máxima nominal do agregado mm	Masa mínima de la muestra de ensayo / Massa mínima da amostra de ensaio kg
< 4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

(*) Después del secado. / Após secagem.

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para a continuação do ensaio a amostra foi seca em estufa por vinte e quatro horas a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, deixando-a esfriar em temperatura ambiente e determinando as suas massas (X e Y). O conjunto de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria atendeu às exigências da NBR NM-ISO 3310-1 (ABNT, 2010) ou NBR NM-ISO 3310-2 (ABNT, 2010), na qual contou com as peneiras da série normal e intermediária, conforme Figura 24, e sendo utilizado a NBR 7211 (ABNT, 2009) para determinar as peneiras que foram usadas no ensaio, conforme Figura 25.

Figura 24: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Serie Normal / <i>Série Normal</i>	Serie Intermedia / <i>Série Intermediária</i>
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 μm	-
300 μm	-
150 μm	-

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 25: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 μm	15	35	55	70
300 μm	50	65	85	95
150 μm	85	90	95	100

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

As peneiras foram previamente limpas a fim de formar um único conjunto com a ordem crescente das peneiras, iniciando com um fundo para reter o material que passasse pela última peneira. O conjunto foi formado por: fundo, peneira 150µm, 300µm, 600 µm, 1,18 mm, 2,36 mm, 4,75 mm, 6,30 mm e 9,5 mm. Levou-se o conjunto de peneiras ao agitador mecânico de peneiras, e adicionado a amostra X, na qual ficou ligado por um período de quinze minutos a fim de garantir a separação e a classificação dos diferentes tamanhos de grãos da amostra.

Após desligar o agitador de peneira retiraram-se cada uma das peneiras e pesou-se o conteúdo retido em cada uma delas, inclusive o fundo. Repetiu-se o mesmo procedimento para a amostra Y.

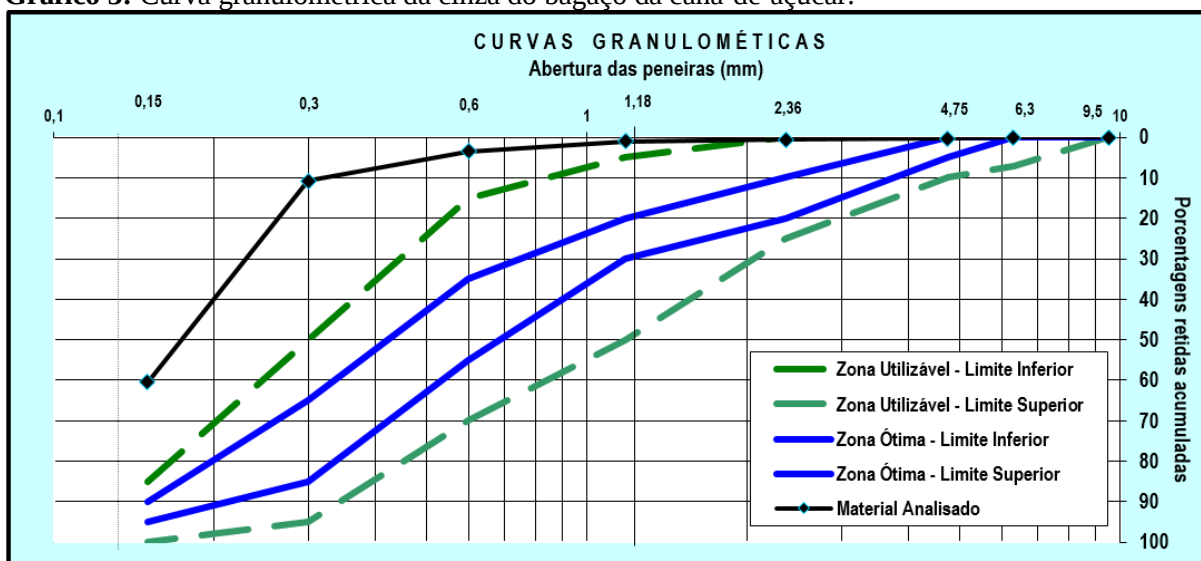
Após a realização dos ensaios os valores obtidos foram inseridos em uma planilha fornecida pela UDESC – Joinville, para que pudesse ser gerada a curva granulométrica do agregado miúdo, conforme Gráfico 3. Os resultados obtidos no peneiramento para cada amostra estão representados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultado da granulometria da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (gr) =		300,0		(Mrm) Massa retida Média (%)	(Mra) Massa retida Acumulada (%)
	b) massa inicial seca (gr) =		300,0			
	Mrg) Massa retida (gr)		Mr%) Massa retida (%)			
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b		
6,3	0,00	0,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4,75	0,23	1,87	0,1%	0,6%	0,4%	0,4%
2,36	0,74	0,48	0,2%	0,2%	0,2%	0,6%
1,18	1,29	1,18	0,4%	0,4%	0,4%	1,0%
0,6	6,84	7,97	2,3%	2,7%	2,5%	3,4%
0,3	20,60	23,00	6,9%	7,7%	7,3%	10,7%
0,15	151,87	146,88	50,6%	49,0%	49,8%	60,5%
Fundo	118,37	118,37	39,5%	39,5%	39,5%	100,0%
(Mt) total S	299,94	299,75	Módulo de finura =		0,77	
			Diâmetro Máximo =		0,6mm	
Mt = (S de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) *100 Mra = (S Mrm Massa retida media)						
Módulo finura = S % retidas acumuladas, nas peneiras da série normal / 100 D. máximo = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada < 5%						

Fonte: Autores (2017).

Gráfico 3: Curva granulométrica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte: UDESC (2014).

3.1.2.3.2 Determinação da massa específica

Para a realização do ensaio de determinação da massa específica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) seguiu-se como referência a NBR NM 23 – Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação de massa específica (ABNT, 2001).

Foram separadas duas amostras de CBC, a qual foi previamente seca em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, cada amostra com massa total de 60 gramas (NBR NM 23, ABNT 2001).

Para realização do ensaio utilizou-se o frasco Le Chatelier com graduação de 0 a 24 ml, no qual foi colocado um líquido que não reagisse quimicamente com a amostra, o líquido utilizado foi a querosene, no qual foi colocado a quantidade de querosene entre as graduações de 0 e 1 ml, depois, colocado o frasco em banho termo regulado à 60°C efetuando movimentos giratórios suaves por um período de 30 minutos, fazendo assim a primeira leitura do nível superior do líquido (V_1).

Retirou-se o frasco do banho e foi adicionado, em pequenas porções, a amostra em seu interior, em seguida foi fechado o frasco com a rolha. Elevou-se o frasco a uma posição inclinada aplicando movimentos giratórios a fim de expulsar o ar contido no material. Depois de não haver mais bolhas de ar subindo à superfície do líquido, registra-se a leitura final (V_2).

A NBR NM 23 (ABNT, 2001) apresenta a Equação (9) para determinar a massa específica do material.

(9)

$$\mu = \frac{m}{V_f}$$

Onde:

μ : massa específica do material ensaiado, em gramas por centímetro cúbico;

m : massa do material ensaiado, em gramas;

V_f : volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2 - V_1$), em centímetros cúbicos.

Os valores obtidos após a realização do ensaio foram transferidos para uma tabela, na qual foram feitos os cálculos por meio da Equação (9) para se determinar a massa específica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, obtendo uma massa específica média de 2,20 g/cm³, conforme Tabela 10.

Tabela 10: Resultado da massa específica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Amostra	Dados:			Massa Específica da Cinza do Bagaço da cana-de-açúcar g/cm ³	Massa Específica média da Cinza do Bagaço da cana-de-açúcar g/cm ³
	Massa do ensaio (m) g	Volume inicial de querosene (V1) ml	Volume final (V2) ml		
1	50,00	1,00	23,30	2,24	2,20
2	50,00	0,30	23,40	2,16	

Fonte: Autores (2017).

3.1.2.4 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado para a produção dos concretos foram adquiridos no comércio local da cidade de Cascavel, PR. A marca utilizada foi Itambé, do tipo CP II Z 32 por ser um cimento muito utilizado para produção de concretos e argamassas em geral. O cimento CP II-Z é geralmente utilizado em obras marítimas, industriais e subterrâneas por conter de 6% a 14% de Pozolana, possui baixo teor de adição o que garante ao cimento resistência inicial superior, tem sua coloração escura e pega rápida, garantindo assim uma maior

impermeabilidade e durabilidade do concreto produzido com esse tipo de cimento. Possui três classes de resistência à compressão de 25, 32 e 40 MPa e obtida após 28 dias.

Segundo dados técnicos da empresa, o cimento atende à norma NBR 11578 – Cimento Portland Composto (ABNT, 1991), a qual traz na sua especificação a composição de 6 a 14 % de material pozzolânico. O cimento Portland da Itambé possui massa específica média de 2,98 g/cm³ e um blaine de 3.603 cm²/g.

3.1.2.5 Água

A água utilizada na confecção dos concretos é fornecida pela SANEPAR, por meio da sua rede de distribuição pública do município de Cascavel.

3.1.3 Características do concreto

3.1.3.1 Definição da resistência característica à compressão do concreto - Fck

A determinação do fck estabeleceu-se de forma empírica. Em consulta realizada com a empresa de concreto usinado Concreto Super, levantou-se quais as resistências características dos concretos mais consumidos nas obras correntes na região de Cascavel, no ano de 2015 e 2016. A empresa afirma que os produtos mais comercializados são os concretos de fck 25Mpa e 30Mpa. Dessa forma, optou-se por um dos dois produtos, sendo fixado o fck de 30Mpa. A consulta com a empresa tem como objetivo contemplar o cenário atual da construção civil cascavelense.

3.1.3.2 Determinação do traço do concreto

O projeto do traço considerado para a pesquisa seguiu os parâmetros e definições da Tese de Doutorado da universidade Federal do Rio Grande do Sul, desenvolvido pela Doutora, engenheira Civil Maria Vania Nogueira do Nascimento Peres (PERES, 2013).

3.1.3.3 Determinação dos teores de adição da CBC

Para a pesquisa foram determinadas as proporções de 10, 20 e 30% de adição de CBC em substituição do cimento. Teores definidos de forma empírica, porém utilizados em trabalhos como de Cordeiro (2006) e Carlos Humberto (2007), entre outros.

3.1.3.4 Moldagem dos corpos de prova

A NBR 5738 – Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015) é a norma que prescreve os procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos, utilizados em ensaio de compressão e de tração por compressão diametral ou prismático utilizados no ensaio de tração por flexão.

Os moldes são cilíndricos, que segundo as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2015) devem ter diâmetro de 10cm, 15cm, 20 cm, 25cm, 30cm ou 45cm, com altura igual ao dobro do diâmetro. Adotou-se para a pesquisa o molde de diâmetro de 10cm e altura de 20cm.

O material dos moldes utilizados é metálico com abertura no extremo superior, chapa metálica para fechamento e estanqueidade da extremidade inferior e sistema que permita a fácil desmoldagem a fim de não danificar os corpos de prova.

A preparação dos moldes para receber o concreto iniciou-se com a aplicação de um fino revestimento interno do molde com óleo mineral que não reagisse com o concreto. Após, foi introduzido o concreto em camadas homogêneas, cada camada sendo adensada de forma manual com o auxílio de uma haste de adensamento com superfície lisa de (16 ± 2) mm de diâmetro e de 600mm a 800mm de comprimento (NBR 5738, ABNT, 2015). A quantidade de camadas e de golpes segue na Figura 26.

Figura 26: Número de camadas para moldagem dos corpos de prova.

Tipo de corpo de prova	Dimensão básica (d) mm	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	–	–
Prismático	100	1	1	75
	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450 ^b	3	–	–
^b Para concretos com abatimento superior a 160 mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida à metade da estabelecida nesta Tabela. Caso o número de camadas resulte fracionário, arredondar para o inteiro superior mais próximo. ^c No caso de dimensão básica de 450 mm, somente é permitido adensamento mecânico.				

Fonte: NBR 5738 (ABNT, 2015).

Como os corpos de prova são de 100mm de dimensão básica, o número de camadas em função do tipo de adensamento é de 2 camadas, cada uma com 12 golpes para o adensamento manual. O adensamento ocorreu com golpes uniformes em toda seção transversal da camada. Na camada seguinte foram realizados os golpes fazendo com que a haste penetrasse 20mm na camada anterior. Em seguida foi batido nas laterais dos moldes a fim de retirar os vazios que ficaram presentes.

Após a moldagem os corpos de prova foram alocados em superfície horizontal rígida, sem a presença de vibrações ou quaisquer outras perturbações ao concreto. Transcorrendo um período de 24 horas, os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de 95%. Após 28 dias os corpos de prova foram submetidos aos ensaios.

3.1.4 Ensaio de resistência à compressão

Segundo a NBR 5739 – Concreto: Ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2007). O ensaio de resistência à compressão é um método no qual devem

ser ensaiados os corpos de prova cilíndricos de concreto, para que se determine a sua resistência à compressão.

O equipamento utilizado para executar o ensaio é chamado de prensa hidráulica, na qual um pistão aplica uma força de compressão axial, gradualmente no corpo de prova até que ocorre o rompimento do mesmo.

Os corpos de prova foram moldados conforme especificações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Para cada concreto analisado foram moldados 06 (seis) corpos de prova, totalizando 24 (vinte e quatro) para o ensaio de compressão. Antes da realização do ensaio prepararam-se as bases dos corpos de prova, as quais passaram por uma retífica, que efetuou um nivelamento das superfícies para que encaixasse perfeitamente na prensa hidráulica, também conhecida como capeamento.

Antes de se iniciar o ensaio, as faces do corpo de prova e as faces dos pratos foram limpas e secas, após, os corpos de prova foram cuidadosamente centralizados nos pratos. O carregamento do ensaio se deu com aplicação contínua e sem choque, com uma velocidade constante de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s (NBR 5739, ABNT 2007). Essa velocidade de carregamento foi mantida constante até o final do ensaio, o carregamento só parou quando houve uma queda da força, indicando sua ruptura.

A NBR 5739 (ABNT, 2007) estabelece a fórmula para que se possa calcular a resistência à compressão, dada pela seguinte expressão:

A resistência à compressão é calculada pela Equação (10).

(10)

$$f_c = \frac{4F}{\pi x D^2}$$

Onde:

f_c : resistência à compressão, em megapascals;

F: força máxima alcançada, em newtons;

D: diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros.

Após a ruptura do corpo de prova realizou-se uma análise visual para se determinar o tipo de ruptura que transcorreu no corpo de prova, possuindo como referência a NBR 5739 (ABNT, 2007) que traz como exemplo: Tipo A (Cônica afastada 25 mm do capeamento), Tipo D (Cônica e cisalhada), Tipo E (Cisalhada), entre outras.

3.1.5 Ensaio de módulo de elasticidade

A NBR 8522 Concreto: Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão (ABNT, 2008), especifica um método para a determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão do concreto endurecido em corpo de prova cilíndricos, que podem ser moldados ou extraídos da estrutura.

Os medidores de deformação são comparadores fixos utilizados nos corpos de provas e submetidos ao esforço de compressão axial de curta duração, esses dispositivos são fixados por meio de garras, anéis ou pinos, cujas pontas penetram na superfície do corpo de prova. Para o ensaio foi utilizado um compressômetro com bases independentes constituído por dois anéis, ambos rigidamente fixados nos corpo de provas, conforme Figura 27, e sendo utilizados dois relógios comparadores, fixados diametralmente opostos.

Figura 27: Compressômetro com bases independentes, com dois anéis fixados no corpo de prova.



Fonte: Autores (2017).

Os corpos de prova foram moldados conforme especificações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Para cada concreto analisado foram moldados 03 (três) corpos de prova, totalizando 12 (doze) para o ensaio de módulo de elasticidade. Antes da realização do ensaio prepararam-se as bases dos corpos de prova, a qual passou por uma retífica, que efetuou um nivelamento das superfícies para que encaixasse perfeitamente na prensa hidráulica, também conhecida como capeamento.

Para se determinar a resistência à compressão foi tomado como base a resistência média obtida no ensaio de compressão axial, conforme Tabela 11, realizado anteriormente. Os carregamentos e descarregamentos obedeceram à velocidade de $0,45 \pm 0,15$ Mpa/s, e foi tomado como base a metodologia A da NBR 8522 (ABNT, 2008).

Tabela 11: Valores da resistência à compressão.

AMOSTRA	RESISTÊNCIA MÉDIA (F_c) (Mpa)	TENSÃO DO LIMITE SUPERIOR (σ_b) (Mpa)
TESTEMUNHO	27,7	8,3
ADIÇÃO DE 10% DE CBC	19,6	5,9
ADIÇÃO DE 20% DE CBC	18,3	5,5
ADIÇÃO DE 30% DE CBC	7,3	2,2

Fonte: Autores (2017).

A metodologia A, segundo a NBR 8522 (ABNT, 2008) é dividida em quatro etapas.

A etapa 1 consiste em carregar o corpo de prova até a força correspondente à tensão limite superior (σ_b), na qual a tensão σ_b corresponde a 30% da tensão de ruptura conforme indicado na Tabela 11 e manter essa tensão por sessenta segundos, em seguida descarregar o corpo de prova até a força próxima de 0.

Na etapa 2 deve se carregar o corpo de prova com uma tensão de 0,5 Mpa (σ_a) e mantê-la nesse nível por 60 segundos, em seguida, carregar o corpo de prova até a força correspondente ao limite superior (σ_b) e manter esta força nesse nível por 60 segundos, após esse período, deve-se descarregar o corpo de prova até que sua força seja próxima de 0.

A etapa 3 deve ser conduzida conforme prescrição para a etapa 2.

Na etapa 4 deve-se carregar o corpo de prova com uma tensão de 0,5 Mpa (σ_a) e mantê-la nesse nível por 60 segundos, deve-se registrar as deformações lidas (ϵ_a), tomadas em no máximo 30 segundos, em seguida, carregar o corpo de prova até a força correspondente ao limite superior (σ_b) e manter essa força nesse nível por 60 segundos, deve-se registrar as deformações lidas (ϵ_b), tomadas em no máximo 30 segundos.

Após as leituras de deformação deve-se carregar o corpo de prova na mesma taxa de velocidade utilizada durante as etapas até que haja sua ruptura, obtendo assim a sua resistência efetiva ($f_{c.ef}$), sendo que $f_{c.ef}$ deferir em mais de 20% de f_c , os resultados do corpo de prova devem ser descartados.

Para o cálculo da deformação em cada estágio de carregamento a NBT 8522 (ABNT, 2008) define como sendo a deformação específica uma grandeza adimensional que expressa a variação de comprimento da base de medida de um corpo de prova em relação a seu comprimento inicial, por meio da Equação (11). O ΔL é um valor obtido por meio dos relógios comparadores fixados nos anéis, e o comprimento inicial considerado para o cálculo e a altura entre os anéis sendo de 100mm.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (11)$$

Onde:

ε : Deformação específica;

ΔL : é a variação do comprimento do corpo de prova, em mm;

L : é o comprimento inicial do corpo de prova, em mm.

O módulo de elasticidade é calculado por meio da Equação (12).

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (12)$$

Onde:

σ_b : é a tensão limite superior ($\sigma_b = 0,3 \times f_c$), em megapascals;

0,5: é a tensão básica, em megapascals;

ε_a : é a deformação específica média dos corpos de prova, sob a tensão limite superior;

ε_b : é a deformação específica média dos corpos de prova, sob a tensão básica.

3.1.6 Determinação de absorção de água por imersão

A norma que especifica os métodos para o ensaio de determinação da absorção de água por imersão é a NBR 9778 – Argamassas e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT, 2005). A absorção de água por imersão é o processo no qual a água é conduzida até ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido.

Para o ensaio utilizou-se três amostras para cada traço com a quantidade de 1.500cm³ de material, uma balança hidrostática, recipiente que permitiu a imersão e fervura das amostras, bem como a estufa para secagem com temperatura de $(100 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

As amostras foram divididas de acordo com seu traço: testemunho sem adição de CBC (T), com adição de 10% (A10%), adição de 20% (A20%) e adição de 30% (A30) de CBC e dentro de cada traço os corpos de prova foram enumerados de 1 a 3 para um melhor controle na hora de realizar a pesagem.

Iniciando o ensaio, as amostras foram mantidas em estufa para secagem por um período de 72h, após, medida e registrada a massa das amostras (M_s). Em seguida, as amostras foram imersas em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, e mantidas por 72h nessa condição.

Após, completada a etapa de imersão na água de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, as amostras foram imersas em recipiente com água, que progressivamente foi levada à ebulição, a qual começou depois de 15 min e antes de 30 min. A ebulição manteve-se por um período de 5h. Passado o tempo de imersão, as amostras foram deixadas à temperatura ambiente de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ para que pudessem esfriar. Então, retiraram-se as amostras da água, foram enxugadas com um pano úmido, determinando assim a massa das amostras (M_{sat}).

O Índice de absorção de água é calculado pela equação (13).

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

A: índice de absorção de água, em porcentagem;

M_{sat} : é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

M_s : é a massa da amostra seca.

3.1.7 Índice de atividade pozzolânica

Segundo a NBR 5752 – Materiais pozzolânicos: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ABNT, 2014) o índice de atividade pozzolânica é um método para determinação do índice de desempenho de matérias pozzolânicos com cimento Portland, aos 28 dias.

Para a realização do ensaio foi utilizado o cimento CP II-F-32 que apresenta resistência à compressão aos sete dias de (33 ± 3) MPa, além da areia normal, aditivo superplastificante e o material pozzolânico, nesse caso foi utilizado a cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

A amostra de material pozzolânico foi preparada para a realização do ensaio e seca previamente em estufa a (105 ± 5) °C por um período de vinte e quatro horas, em seguida foi moída até que a massa retida na peneira de abertura de malha de 45 µm fosse inferior a 20 % (NBR 5752, ABNT 2014).

Para a execução do ensaio foram preparadas duas amostras de argamassa, na qual a argamassa A, consistia numa mistura de cimento CP II-F-32, areia normal e água. Já a argamassa B, continha 25 % em massa da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, em substituição à igual porcentagem de cimento CP II-F-32, além da areia normal e água.

As quantidades de materiais utilizados para a moldagem de quatro corpos de prova para cada argamassa A e B constam na Figura 28, corpos de prova cilíndricos de (50 x 100) mm (NBR 5752, ABNT 2014).

Figura 28: Quantidade de material, em massa, para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos.

Material	Massa g	
	Argamassa A	Argamassa B ^a
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Material pozzolânico	–	156 ± 0,2
Areia normal ^b	1872,0	1872,0
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo superplastificante	–	^c

^a O material pozzolânico e o cimento CP II-F-32 devem ser previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 min, aproximadamente.

^b Quatro frações de $(468,0 \pm 0,3)$ g.

^c Quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter o índice de consistência normal da Argamassa B em ± 10 mm do obtido com a argamassa A, determinado conforme ABNT NBR 7215:1997, Anexo B. O aditivo deve ser adicionado na água de amassamento diretamente na cuba. O uso de aditivo é dispensável quando o índice de consistência da argamassa B for igual (± 10 mm) ou maior que o da argamassa A.

Fonte: NBR 5752 (ABNT, 2014).

Para executar a mistura da argamassa utilizou-se um misturador mecânico, a qual foi colocada na cuba, toda a quantidade de água e a quantidade de cimento. Ligou-se o misturador na velocidade baixa, por um período de trinta segundos, sendo registrada a hora em que o cimento foi colocado em contato com a água. Após o término da mistura da água e do cimento, foi adicionado gradualmente a areia durante trinta segundos, imediatamente após o término da colocação foi alterada a velocidade do misturador para a posição alta por mais trinta segundos.

A seguir, o misturador foi desligado por um período de um minuto e trinta segundos deixando a argamassa em repouso dentro da cuba, coberta com um pano limpo e úmido. Após esse tempo ligou-se o misturador novamente por mais um minuto.

Logo após o término do amassamento foi realizado a moldagem dos corpos de prova, com o auxílio de uma espátula, preenchido o molde com quatro camadas com alturas aproximadamente iguais, após, deferiram-se trinta golpes com um soquete normal em cada camada. Depois de preenchido o molde, foi utilizando uma régua metálica que fez o rasamento do topo dos corpos de prova.

A realização da cura dos corpos de prova ocorreu de duas formas: inicialmente os corpos de prova passaram por uma cura ao ar e no final por uma cura em água saturada de cal.

Logo após a moldagem os corpos de prova foram colocados em uma câmara úmida, ainda dentro do molde durante 24 horas, com a face superior protegida por uma placa de vidro plano. Terminado o período inicial de cura, os corpos de prova foram retirados do molde e imersos em um tanque de água saturada de cal, na câmara úmida, onde permaneceram até o momento do ensaio. Os corpos de prova foram capeados utilizando uma máquina de corte, assim, prontos para o ensaio de resistência à compressão.

Para a execução do ensaio de resistência à compressão, colocou-se o corpo de prova sobre o prato inferior da prensa, de maneira que ficasse rigorosamente centrado em relação ao eixo de carregamento. A velocidade de carregamento definida pela NBR 7215 – Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1996) é de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa, que ocorreu de forma gradual.

O índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias é calculado pela Equação (14).

$$I_{cimento} = \frac{f_{CB}}{f_{CA}} \times 100$$

(14)

Onde:

I_{cimento} : índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em porcentagem (%);

f_{cB} : resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25% de material pozolânico (argamassa B), em megapascals (MPa);

f_{cA} : resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa A), em megapascals (MPa).

3.1.8 Análise dos dados

Os dados da pesquisa foram coletados por meio de anotações em papel sulfite para posteriormente serem organizados em quadros e tabelas no Excel. A análise deu-se por meio da comparação dos resultados obtidos das amostras com e sem adição de CBC, também em comparação com a bibliografia.

4 CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e da absorção de água, para os diferentes teores de substituição do cimento pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar na confecção dos concretos. Foram realizadas, ainda, análises quanto à atividade pozzolânica da cinza.

4.1.1 Análise das propriedades do concreto fresco

Durante o preparo das amostras pôde ser observado visualmente, a interferência causada pela cinza do bagaço da cana no abatimento do concreto nos teores de adições mais elevados. Não foi realizada correção do abatimento em virtude de a condição de trabalhabilidade estar em conformidade com o desejado, sendo assim, manteve-se o fator água/cimento estipulado no projeto de dosagem.

Foram realizadas observações nas amostras e constatado que não houve nenhum fenômeno como o de exsudação e segregação do concreto.

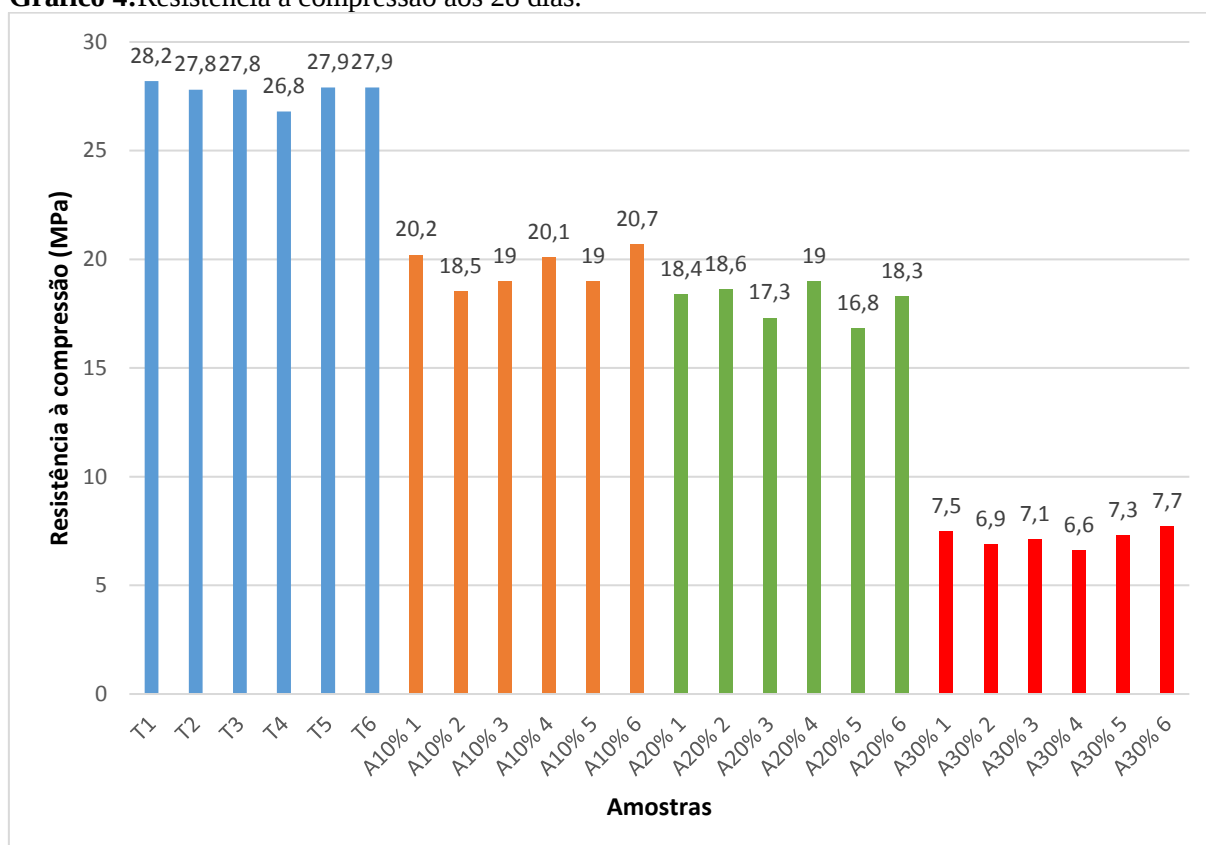
4.1.2 Resistência à compressão

Foram realizados os ensaios de resistência à compressão com os corpos de prova sem adição e dos corpos de prova com os variados teores de adição de CBC. Os resultados podem ser observados no Apêndice A, Tabela 12 e no Gráfico 4.

Tabela 12: Resistência à compressão média aos 28 dias.

AMOSTRA	RESISTÊNCIA MÉDIA À COPRESSÃO (MPa)
TESTEMUNHO	27,70
ADIÇÃO 10% CBC	19,60
ADIÇÃO 20% CBC	18,30
ADIÇÃO 30% CBC	7,30

Fonte: Autores (2017).

Gráfico 4: Resistência a compressão aos 28 dias.

Fonte: Autores (2017).

Como pôde ser observado as amostras denominadas testemunhos que não foram realizadas substituição do cimento pela CBC, apresentaram uma resistência média de 27,7MPa. As amostras com substituição do cimento na proporção de 10% de CBC apresentaram uma resistência média de 19,6MPa. As amostras com substituição do cimento na proporção de 20% CBC apresentaram uma resistência média de 18,3MPa, A amostra 5 foi desconsiderada da amostragem em virtude do desvio relativo máximo, caracterizada pela discrepância no valor de sua resistência à compressão das demais amostras. O mesmo ocorreu com a amostra 4 da amostragem com substituição do cimento pela CBC na proporção de 30%, apresentando uma resistência média de 7,3MPa.

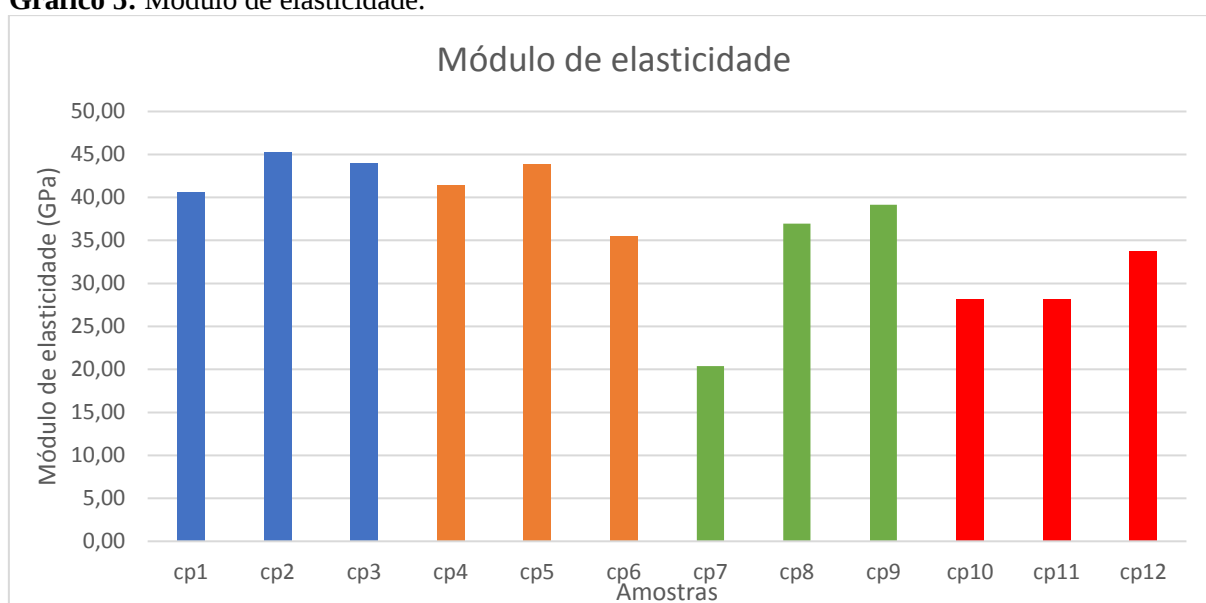
Verificou-se que houve queda considerável de resistência nas amostras que se substituiu o cimento pela CBC, manteve uma pequena queda de resistência das amostras com 10% de CBC em relação às amostras com 20%, porém quando se observa as amostras com 30% de CBC nota-se novamente uma queda considerável na resistência à compressão. O que acarretou na perda de resistência a compressão do concreto provavelmente foi a falta da realização da moagem da cinza, verificando-se assim que para o emprego da CBC como

material de substituição do cimento Portland é necessário realização de moagem, para que a adição se apresente com atividade pozolânica mais elevada e tenha resultados positivos.

4.1.3 Módulo de elasticidade

Foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade nos corpos de prova sem adição e dos corpos de prova com os variados teores de adição de CBC, os resultados podem ser observados nos Apêndice B, Apêndice C, Apêndice D e no Gráfico 5.

Gráfico 5: Módulo de elasticidade.



Fonte: Autores (2017).

Pôde-se observar que houve queda no módulo de elasticidade das amostras em relação ao testemunho, a variação que ocorreu com adição de 10% de CBC foi apenas de 6,95%, já com a adição de 20% de CBC a variação foi mais significativa, sendo de 25,69% e por fim, com adição de 30% de CBC apresentaram resultados que diferiram 30,59% do testemunho. Verifica-se novamente que a falta de moagem e tratamento da cinza influenciaram nos resultados esperados.

Segundo NBR 8522 (2008) o módulo de elasticidade é um dos parâmetros considerados nos cálculos estruturais, com o objetivo de relacionar a tensão aplicada à deformação instantânea. Com o valor do módulo é possível ter uma melhor noção do comportamento das estruturas de concreto com relação à desforma e condições de uso e serviço.

4.1.4 Índice de atividade pozolânica

Com o período de cura concluído, os corpos de prova que foram moldados para a realização do ensaio do índice de atividade pozolânica foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, os resultados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resistência à compressão para a atividade Pozolânica.

Amostra	Massa (g) da amostra:	
	Argamassa A	Argamassa B
	fcA (MPa)	fcB (MPa)
1	20,90	8,20
2	21,60	5,00
3	22,30	7,80
4	21,60	6,80

Fonte: Autores (2017).

A NBR 5752 (ABNT, 2014) estipula que devem ser realizados o cálculo da resistência média de cada argamassa e o desvio relativo máximo, para que se possa calcular o índice de atividade pozolânica. Para a realização do cálculo da média, foi necessária a retirada de dois valores da resistência à compressão da argamassa B, na qual os valores apresentavam um desvio relativo máximo acima de 6%, que estão indicados na Tabela 14 com um asterisco.

Tabela 14: Índice de atividade pozolânica.

Amostra	Resistência à compressão axial		Resistência média fcA (MPa)	Resistência média fcB (MPa)	Índice de atividade pozolânica (%)
	Argamassa A	Argamassa B			
	fcA (MPa)	fcB (MPa)			
1	20,90	8,20	21,6	8,00	37%
2	21,60	5,00*			
3	22,30	7,80			
4	21,60	6,80*			

Fonte: Autores (2017).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2012) a cinza do bagaço da cana-de-açúcar se classifica na classe E, como qualquer pozolana, tal norma estipula a porcentagem que esta cinza deve possuir para que se atenda o valor mínimo de índice de atividade pozolânica que é de 75%.

A cinza utilizada nesse ensaio atingiu o valor de 37% no índice de atividade pozolânica, a possível causa desse valor baixo pode estar relacionada a não realização de um processo de moagem na CBC.

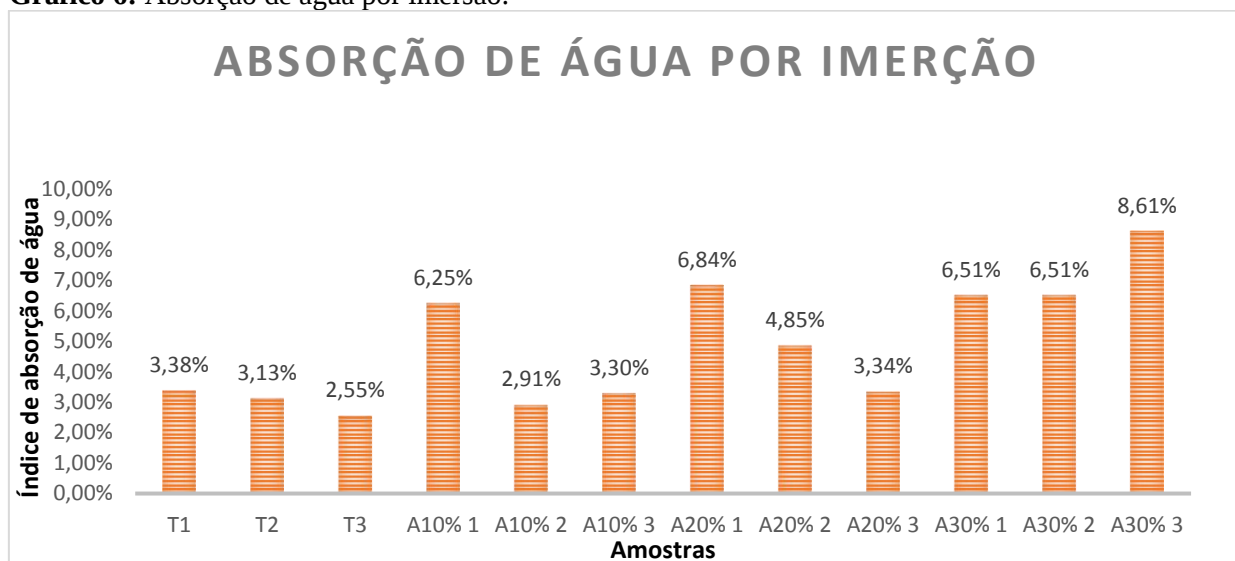
4.1.5 Determinação da absorção de água por imersão

Com a realização do ensaio de absorção de água por imersão no concreto, obteve-se valores relacionados à porcentagem de água que permeou nos moldes de corpo de prova, conforme Tabela 15, Gráfico 6 e Gráfico 7.

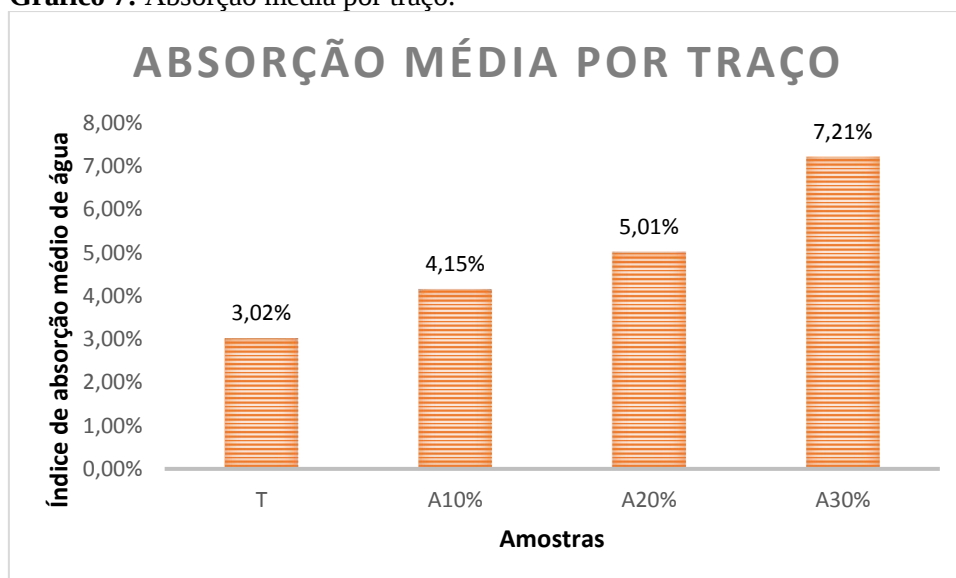
Tabela 15: Permeabilidade do concreto.

Amostra	Massa (g) da amostra:		Absorção de água %	Absorção média de cada amostra
	Massa seca (Ms)	Massa saturada em água após imersão e fervura (Msat)		
T1	3.763,80	3.895,30	3,38%	3,02%
T2	3.799,50	3.922,10	3,13%	
T3	3.827,10	3.927,10	2,55%	
A10% 1	3.575,10	3.813,50	6,25%	4,15%
A10% 2	3.741,30	3.853,30	2,91%	
A10% 3	3.703,60	3.829,90	3,30%	
A20% 1	3.524,80	3.783,50	6,84%	5,01%
A20% 2	3.578,10	3.760,60	4,85%	
A20% 3	3.669,00	3.795,80	3,34%	
A30% 1	3.423,20	3.661,70	6,51%	7,21%
A30% 2	3.434,00	3.673,20	6,51%	
A30% 3	3.371,10	3.688,80	8,61%	

Fonte: Autores (2017).

Gráfico 6: Absorção de água por imersão.

Fonte: Autores (2017).

Gráfico 7: Absorção média por traço.

Fonte: Autores (2017).

Pôde ser observado que a adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em suas diferentes porcentagens tornou o concreto mais permeável, como pode ser observado nos gráficos, na qual há o aumento da absorção média, quanto maior a porcentagem de CBC presente. O resultado esperado com a adição do CBC era obter um concreto com uma menor absorção de água, tornando o assim o concreto mais impermeável, podendo ser utilizado com mais eficácia e qualidade nas obras correntes.

O aumento de absorção de água do concreto pode acarretar em patologias futuras, pois a possibilidade de penetração de água com elementos agressivos (O_2 , cloretos, sulfatos) ocasionam o surgimento de corrosão das armaduras, ou seja, quanto mais permeável o concreto, maior será a condição potencial de ocorrência da corrosão (HAMASSAKI, 2009).

5 CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSÃO

A pesquisa buscou viabilizar a utilização de cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição mineral para a substituição do cimento Portland na produção de concreto, por meio da aplicação da CBC sem a realização de moagem objetivando pouca ou nenhuma influência da adição nas propriedades dos concretos.

A partir dos resultados e discussões já apresentados foi possível concatenar que a utilização da CBC influenciou significativamente nas propriedades do concreto, houve queda de resistência à compressão já nas primeiras amostras quando comparadas com o testemunho, amostras com teores de 10% de CBC. Um fator importante a ser observado é que houve pequena queda de resistência quando comparada as amostras com teores de 20% de CBC com as de 10% de CBC, porém, quando se analisou as amostras com 30% de CBC a perda de resistência fora considerável. Os índices de absorção de água também não foram satisfatórios em decorrência dos concretos aumentarem a permeabilidade em função da quantidade de adição de CBC. No que tange ao módulo de elasticidade as amostras com 10% CBC se apresentaram com baixa variação do módulo em relação ao testemunho, mas nas demais porcentagens novamente pôde-se perceber queda dos resultados.

Pode-se concluir que a influência da CBC no concreto apresentadas provavelmente foram decorrentes da falta de moagem a ser realizada na cinza, fator que pode ser verificado nos resultados de atividade pozolânica baixos, que em média se apresentaram somente com 37% de índice de atividade pozolânica. A pesquisa demonstrou que a utilização da cinza sem realização de moagem é inviável e enfatizou a importância desse processo para a utilização da CBC como adição mineral em concretos.

6 CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, algumas situações são sugeridas para aprofundamento e exploração da pesquisa em concretos com adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar:

- ✓ Comparação das propriedades dos concretos com adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e cinza da casca de arroz na substituição parcial de cimento;
- ✓ Adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial do agregado miúdo sem a realização de moagem da cinza;
- ✓ Comparação das propriedades dos concretos com substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar com realização de moagem e sem moagem.

REFERÊNCIAS

AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Cana-de-açúcar**. Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html>. Acesso em 27 de maio de 2017.

ALBUQUERQUE, O. T. R; LIMA, A. L. N. **Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade**. Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, 2014.

ALMEIDA, A. O. **Apostila para as aulas práticas de materiais de construção**. UFC – Universidade Federal do Ceará. Centro de tecnologia - Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Ceará, 2007.

ALMEIDA, L. C. **Concreto armado**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo. 2002.

AMARAL, F. C. F. **Materiais e Processo Construtivo**. ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, São Paulo. 2005.

Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acessado em: 28 de maio de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578 – Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768 -Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: 2011.

_____. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos - Requisito**. Rio de Janeiro: 2012.

_____. **NBR 12655 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação.** Rio de Janeiro: 2015.

_____. **NBR 5738 – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: 2015.

_____. **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: 2007.

_____. **NBR 5752 – Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro: 2014.

_____. **NBR 6118 -Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro: 2014.

_____. **NBR 6502 -Rochas e Solos.** Rio de Janeiro: 1995.

_____. **NBR 7211 -Agregado para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro: 2009.

_____. **NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro: 1996.

_____. **NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro: 2008.

_____. **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: 2005.

_____. **NBR 9939 – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMATIZAÇÃO. **NBR NM 23 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro: 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMATIZAÇÃO. **NBR NM 26 - Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro: 2009.

_____. **NBR NM 27 - Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro: 2001.

_____. **NBR NM 30 - Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro: 2001.

_____. **NBR NM 46 - Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de Janeiro: 2003.

_____. **NBR NM 52 - Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: 2003.

_____. **NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco e cone**. Rio de Janeiro: 1998.

_____. **NBR NM 248 - Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: 2003.

_____. **NBR NM-ISSO 3310-1 - Peneiras de ensaio – Requisito técnico e verificação parte 1 – Peneira de ensaio com tela de tecido metálico**. Rio de Janeiro: 2010.

_____. **NBR NM-ISSO 3310-2 - Peneiras de ensaio – Requisito técnico e verificação parte 2 - Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada**. Rio de Janeiro: 2010.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. Safra 2017/2018**. Brasília, 2017.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. Dissertação (Tese de doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão** – Volume I, 3 ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997.

Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral DNPM/PE**, 2014. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/cimento-sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 27 de maio de 2017.

DERAL – Departamento de Economia Rural, Governo do Paraná. **Estimativa safra 2016/17**. Disponível em < http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/2016/Sucroalcooleiro_2015_16.pdf>. Acesso em 27 de maio de 2017.

EFFTING, C. **Apostila da disciplina de materiais da construção II: Aditivos**. UDESC, Departamento de Engenharia Civil, Joinville, Santa Catarina, 2014.

FARIAS FILHO, J.; ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D. **Potencialidade da metacaolinita e do tijolo queimado moído com substitutivo parcial do cimento Portland**. Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, Pb. V.4 n.3 UFPB, 2000.p. 437-444.

FREITAS JR., J. A. **Aditivos para concreto**. Departamento de Construção Civil UFPR. Curitiba, Paraná, 2013.

HAMASSAKI, Luiz T. **Permeabilidade do concreto**. Disponível em <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/142/artigo286563-2.aspx>>. Acesso em 23 de outubro de 2017.

MANHÃES, M. S., “Adubação, correção do solo e uso de resíduos da agroindústria”. In: **Tecnologia canavieira nas Regiões Norte Fluminense e Sul do Espírito Santo**. 1999. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro: UFRRJ, Boletim Técnico n. 12, pp. 24-31.

MASSAZZA, F. Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: **Hewlett, P. C. (ed.), Lea’s Chemistry of Cement and Concrete**. 4th edition. Arnold Publishers. London, 1998.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Microestrutura, Propriedade e Materiais. 2ª Edição.** Ed.: IBRACON. Português. 2014. p. 751.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Construção Sustentável.** Disponível em <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/construção-sustentável>>. Acesso em 30 de março de 2017.

MORAES, M. **Apostila da disciplina de materiais da construção II:Adições Minerais ao concreto.** Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiás, 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.

NITA, C.; JOHN, V. M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa.** Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2007.

NOVACANA. **A cana-de-açúcar como fonte de energia elétrica.** Disponível em <<https://www.novacana.com/estudos/a-cana-de-acucar-como-fonte-de-energia-eletrica>>. Acesso em 27 de maio de 2017.

NOVACANA. **Vantagens da bioeletricidade do bagaço de cana para o Brasil.** Disponível em <<https://www.novacana.com/estudos/vantagens-da-bioeletricidade-do-bagaco-de-cana-para-o-brasil>>. Acesso em 27 de maio de 2017.

OLIVEIRA, I. D. **Apostila: Maco I agregados e aglomerante.** Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Departamento de Engenharia, Goiás, 2015.

PERES, M. V. N. N. **Comportamento do concreto com adição de fibras de aço de pneu para aplicação em pisos industriais.** Tese de Doutorado – Exame de qualificação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2013.

PETRUCCI, Eladio G.R. **Concreto de Cimento Portland**, Vol. Único. 14º Edição. Editora Globo, Porto Alegre, 1998.

SCREMIN, L. A. L., ISAIA, C. G., GASTALDINI, G.L.A., CERVO, C. T., DIESEL, B. F. Influência da cinza de casca de arroz residual e natural, sem beneficiamento, na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto. **Anais do 50º Congresso Brasileiro de Concreto**, Salvador: 2008.

TÉCHNE, São Paulo, edição 81, dez. 2003.

UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina. **Departamento de Engenharia Civil – Curva granulométrica.** Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiVteLvirrWAhWJDpAKHaijDKkQFggnMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.joinville.udesc.br%2Fportal%2Fdepartamentos%2Fdec%2Flabmcc%2Fmateriais%2Fensaios_areia.xls&usg=AFQjCNFSY0CCagbFh04Xyw0JDq_izGV0zw>. Acesso em 21 de agosto de 2017.

UFC – Universidade Federal do Ceará. **Apostila Para As Aulas Práticas De Materiais De Construção.** Disponível em: <http://www.deecc.ufc.br/Download/TB788_Materiais_de_Construcao_Civil_I/Apostilha%20materiais%20I.pdf>. Acesso em 06 de outubro de 2017.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Moagem de 2008/09 ultrapassa em 16% a da safra anterior.** Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/1836752692036979688/unica-por-cento3A-moagem-de-2008-por-cento2F09-ultrapassa-em-16-por-cento-a-da-safra-anterior>>. Acesso em 27 de maio de 2017.

APÊNDICE A – Resistência à compressão aos 28 dias

AMOSTRA	Nº AMOSTRA	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)	DESVIO RELATIVO MÁXIMO (%)
TESTEMUNHO	T1	28,2	27,7	3,4
	T2	27,8		
	T3	27,8		
	T4	26,8		
	T5	27,9		
	T6	27,9		
ADIÇÃO DE 10% DE CBC	A10% 1	20,2	19,6	5,5
	A10% 2	18,5		
	A10% 3	19		
	A10% 4	20,1		
	A10% 5	19		
	A10% 6	20,7		
ADIÇÃO DE 20% DE CBC	A20% 1	18,4	18,3	5,6
	A20% 2	18,6		
	A20% 3	17,3		
	A20% 4	19		
	A20%5*	16,8		
	A20% 6	18,3		
ADIÇÃO DE 30% DE CBC	A30% 1	7,5	7,3	5,5
	A30% 2	6,9		
	A30% 3	7,1		
	A30%4*	6,6		
	A30% 5	7,3		
	A30% 6	7,7		

APÊNDICE B – Deformação A e B do concreto.

ALTURA ENTRE ANÉIS: 100 mm (L)		DEFORMAÇÃO A (ϵ_a)				
		RELÓGIO 1 (mm)	$\Delta L / L$	RELÓGIO 2 (mm)	$\Delta L / L$	MÉDIA RELÓGIO 1 E 2 (ϵ_a)
TESTEMUNHO	cp1	0,00450	0,0000450	0,00600	0,0000600	0,00005250
	cp2	-0,00700	-0,0000700	-0,00100	-0,0000100	-0,00004000
	cp3	0,00850	0,0000850	-0,00400	-0,0000400	0,00002250
A10%	cp4	-0,00400	-0,0000400	-0,00250	-0,0000250	-0,00003250
	cp5	0,00600	0,0000600	0,00100	0,0000100	0,00003500
	cp6	0,00000	0,0000000	0,01150	0,0001150	0,00005750
A20%	cp7	0,00550	0,0000550	0,00000	0,0000000	0,00002750
	cp8	-0,01000	-0,0001000	0,00850	0,0000850	-0,00000750
	cp9	-0,00500	-0,0000500	0,00950	0,0000950	0,00002250
A30%	cp10	0,02000	0,0002000	-0,01000	-0,0001000	0,00005000
	cp11	0,00500	0,0000500	-0,00650	-0,0000650	-0,00000750
	cp12	0,00000	0,0000000	-0,00100	-0,0000100	-0,00000500

ALTURA ENTRE ANÉIS: 100 mm (L)		DEFORMAÇÃO B (ϵ_b)				
		RELÓGIO 1 (mm)	$\Delta L / L$	RELÓGIO 2 (mm)	$\Delta L / L$	MÉDIA RELÓGIO 1 E 2 (ϵ_b)
TESTEMUNHO	cp1	0,0200	0,0002000	0,0290	0,0002900	0,00024500
	cp2	0,0010	0,0000100	0,0255	0,0002550	0,00013250
	cp3	0,0140	0,0001400	0,0260	0,0002600	0,00020000
A10%	cp4	0,0110	0,0001100	0,0085	0,0000850	0,00009750
	cp5	0,0300	0,0003000	0,0015	0,0000150	0,00015750
	cp6	0,0015	0,0000150	0,0403	0,0004030	0,00020900
A20%	cp7	0,0450	0,0004500	0,0095	0,0000950	0,00027250
	cp8	-0,0040	-0,0000400	0,0295	0,0002950	0,00012750
	cp9	-0,0010	-0,0000100	0,0310	0,0003100	0,00015000
A30%	cp10	0,0300	0,0003000	-0,0080	-0,0000800	0,00011000
	cp11	0,0080	0,0000800	0,0025	0,0000250	0,00005250
	cp12	0,0000	0,0000000	0,0090	0,0000900	0,00004500

APÊNDICE C – Tensão efetiva do ensaio de módulo de elasticidade.

AMOSTRA		RESISTÊNCIA EFETIVA (MPa)	DIFERE	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO (MPa)	TENSÃO DO LIMITE SUPERIOR (MPa)
TESTEMUNHO	cp1	30,3	9%	27,7	8,31
	cp2	28,6	3%	27,7	8,31
	cp3	25,9	6%	27,7	8,31
A10%	cp4	20,6	5%	19,6	5,88
	cp5	22,9	17%	19,6	5,88
	cp6	22,7	16%	19,6	5,88
A20%	cp7	20,6	13%	18,3	5,49
	cp8	19,1	4%	18,3	5,49
	cp9	20,3	11%	18,3	5,49
A30%	cp10	8,7	19%	7,3	2,19
	cp11	8,3	14%	7,3	2,19
	cp12	8,8	20%	7,3	2,19

APÊNDICE D – Módulo de elasticidade do concreto.

AMOSTRAS		MODÚLO DE ELASTICIDADE (GPa)	MODÚLO DE ELASTICIDADE MÉDIO (GPa)
TESTEMUNHO	cp1	40,57	43,28
	cp2	45,28	
	cp3	44,00	
A10%	cp4	41,38	40,27
	cp5	43,92	
	cp6	35,51	
A20%	cp7	20,37	32,16
	cp8	36,96	
	cp9	39,14	
A30%	cp10	28,17	30,04
	cp11	28,17	
	cp12	33,80	