



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Câmpus Apucarana e Londrina



ALEXANDRE AMADO DE MOURA

**ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR
RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LONDRINA

2018

ALEXANDRE AMADO DE MOURA

**ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR
RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Alesandro Bail
Co-orientador: Prof. Dr. Murilo Moisés

LONDRINA

2018

TERMO DE LICENCIAMENTO

Esta Dissertação está licenciada sob uma Licença Creative Commons *atribuição uso não-comercial/compartilhamento sob a mesma licença 4.0 Brasil*. Para ver uma cópia desta licença, visite o endereço <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> ou envie uma carta para Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, Califórnia 94105, USA.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UTFPR - Câmpus Londrina

M929a Moura, Alexandre Amado de
Argamassa com substituição parcial do cimento por resíduos industriais /
Alexandre Amado de Moura. – Londrina: [s.n.], 2018.
107 f. : il.; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Alesandro Bail
Coorientador: Prof. Dr. Murilo Moisés
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Londrina, 2018.
Bibliografia: f. 97-106

1. Degradação Ambiental. 2. Resíduos Industriais. 3. Argamassa. I. Bail, Alesandro, orient. II. Moisés, Murilo, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. V. Título.

CDD: 628

Ficha catalográfica elaborada por Simone Cristina Menolli – CRB 9/1500



TERMO DE APROVAÇÃO
AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO POR RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Por

Alexandre Amado de Moura

Dissertação de mestrado apresentada no dia trinta de novembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Câmpus Apucarana e Londrina, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho Aprovado.

Prof. Dr. Alesandro Bail
(UTFPR)

Prof^a. Dr^a. Berenice Martins Toralles Carbonari
(UEL)

Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi
(UTFPR)

Prof^a. Dr^a Alessandra Furtado da Silva
Coordenadora do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

“O termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Programa de Mestrado de Engenharia Ambiental - PPGEA”.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que tens feito em minha vida: pelo dom da vida, discernimento, alegria de viver e por dar forças para os momentos que mais necessitei.

Agradeço a Virgem Maria, mãe de Deus e nossa mãe, intercessora e mediadora de todas as graças.

Agradeço a minha família, Evandro, Izamara, Leandro, Idene e Elisa, por estarem ao meu lado nessa jornada, auxiliando com intensas orações e apoio.

Gostaria de agradecer a minha noiva Camila, por estar ao meu lado compartilhando os bons e os maus momentos. Sendo uma prova que temos potencial para passarmos por muitas barreiras na vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alesandro Bail, que confiou no potencial e na pesquisa sugerida, expresso a grande satisfação de tê-lo conhecido, a amizade formada e o apoio dado a todo momento durante a pesquisa e a forma que conduziu a orientação.

À coordenadora, Prof^a. Dr^a. Alessandra Furtado e ao Diretor de Pesquisa e Pós-Graduação, Prof. Dr. Edson Fontes de Oliveira, por serem pessoas chave na minha trajetória, apoiando com compreensão e orientação.

Gostaria de agradecer a equipe da UNIPAR, especialmente o Prof. Dr. Everlei Câmara por apoiar a pesquisa disponibilizando o laboratório para o uso e os laboratoristas Lucas e Mateus para auxílio e acompanhamento durante a execução dos experimentos.

Aos amigos que estiveram presentes nessa jornada, auxiliando de alguma forma para que o trabalho fosse realizado com sucesso.

RESUMO

A degradação do meio ambiente e suas consequências resultam em regulamentações mais estritas por parte do poder público e as empresas de determinado setor produtivo devem rever suas políticas de mercado. A indústria do cimento é responsável pela emissão de, aproximadamente, 7 % do CO₂ gerado no mundo a partir de fontes antropogênicas. Com o intuito de encontrar possíveis substitutos ao cimento utilizado em argamassas e concretos, e contribuir para a redução das emissões de CO₂, avaliou-se o desempenho da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) e pó de vidro (PDV). A CBC é um subproduto gerado nas indústrias sucroalcooleiras após a queima do bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica. O PDV é um resíduo industrial subutilizado, descartado sistematicamente pelas indústrias de corte. Suas composições químicas são favoráveis devido ao elevado teor de silício e cálcio. Ambos os resíduos têm como principal destino os aterros, aterros sanitários ou lixões a céu aberto, uma prática inadequada e não sustentável. Uma maneira mais moderna de tratar esses materiais e contribuir para o desenvolvimento sustentável é sua incorporação na cadeia produtiva de outros produtos. As características químicas e físicas da CBC e do PDV foram monitoradas a partir de ensaios normatizados e técnicas analíticas, tais como, Difractometria de Raios X, Fluorescência de Raios X, Análise Termogravimétrica, Microscopia Eletrônica de Varredura e Adsorção-Dessorção de Nitrogênio. Os resultados obtidos indicaram que as principais propriedades físico-químicas e mecânicas das argamassas foram mantidas devido ao efeito pozolânico dessas adições. Os melhores resultados para ensaio de compressão simples foram obtidos com 20 % de PDV e com 5 % de PDV mais 5 % de CBC. As técnicas de caracterização indicaram que deve haver um efeito sinérgico entre a CBC e o PDV importante em termos de aspectos cinéticos e de resistência à compressão. Os resultados indicaram que o uso desses resíduos industriais é uma forma consistente de substituir parcialmente o cimento na composição de argamassas e concretos.

Palavras-chave: Cinza do bagaço da cana-de-açúcar; Pó de vidro; Argamassa; Resíduo industrial.

ABSTRACT

Degradation of the environment and its consequences result in stricter regulations imposed by the public authorities in certain productive sectors. The cement industry is responsible for the emission of approximately 7 wt. % of the CO₂ released into the atmosphere from anthropogenic sources. In order to find possible substitutes for mortar and concrete cement and to contribute to the reduction of CO₂ emissions, the performance of sugarcane bagasse ash (SCBA) and waste glass powder (WGP) were evaluated. SCBA is produced in the sugar and alcohol industries after the burning of sugarcane bagasse to generate electricity. The WGP is an underutilized industrial waste, systematically discarded by the cutting industries. Their chemical compositions are favorable due to the high content of silicon and calcium. Both residues have been discarded in landfills or open dumpsters, an unsuitable and unsustainable practice. A more modern way of dealing with these materials and contributing to sustainable development is their incorporation into the productive chain of other products. The chemical and physical characteristics of SCBA and WGP were monitored from standardized tests and analytical techniques such as X-ray diffraction, X-ray fluorescence, thermogravimetric analysis, scanning electron microscopy and nitrogen adsorption-desorption. The results indicated that the main physico-chemical and mechanical properties of the mortars were maintained due to the pozzolanic effect of these additions. The best results were obtained with 20 wt. % of WGP and a blend of 5 wt. % of WGP and 5 wt. % of SCBA. Its resistance to simple compression was equivalent to the reference mixture. The characterization techniques indicated that there should be a synergistic effect between SCBA and the WGP in terms of kinetic aspects and compressive strength. The results indicated that the use of these industrial residues is a consistent way of partially replacing the cement in the composition of mortars and concretes

Palavras-chave: Sugarcane bagasse ash; Waste glass powder; Mortar; Industrial waste.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
μm	Micrômetro
A/C	Relação Água/Cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVIDRO	Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Planos
Al₂O₃	Óxido de alumínio
ARI	Alta Resistência Inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATG	Análise Termogravimétrica
CaO	Óxido de cálcio
CBC	Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar
Cl	Cloro
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
cm	Centímetro
CP	Cimento Portland
Fe₂O₃	Óxido de ferro
FRX	Fluorescência de raios X
g	Gramas
h	Hora
kg	Quilograma
kN	Kilonewton
K₂O	Óxido de potássio
L	Litro
m	Metro
MCS	Materiais cimentícios suplementares
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MgO	Óxido de magnésio
MIN	Mínimo
mm	Milímetro
Mn₂O₃	Óxido de manganês

MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
NO	Óxido nitroso
PDV	Pó de Vidro
P₂O₅	Pentóxido de fósforo
PPGEA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
PR	Paraná
RAA	Reação Álcali-Agregado
RAS	Reação Álcali-Silicato
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SiO₂	Óxido de silício
SO₃	Óxido sulfúrico
t	Tonelada
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UNICA	União das Indústrias de Cana-de-Açúcar
UNIPAR	Universidade Paranaense
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmides Quéops, Quéfren e Miquerinos (a); Coliseu (b)	19
Figura 2 – Representação esquemática do processo produtivo do cimento Portland e as reações químicas envolvidas.....	21
Figura 3 – Resistência média dos principais tipos de cimento Portland	22
Figura 4 – Fases de hidratação de misturas cimentícias	24
Figura 5 – Processo de hidratação do cimento	25
Figura 6 – Circuitos de moagem, aberto (a), fechado (b).....	28
Figura 7 – Escala granulométrica segundo a ABNT	29
Figura 8 – Diferença entre os grãos	29
Figura 9 – Exemplo de plantação de cana-de-açúcar em fase de crescimento (a) e durante a colheita mecanizada (b)	31
Figura 10 – Mapa das usinas de cana-de-açúcar do estado do Paraná.	32
Figura 11 – Fluxograma do processo para geração da CBC.	34
Figura 12 – Modificação da coloração conforme o tempo de quima nas caldeiras. Bagaço de cana-de-açúcar (a), cinza escura alto teor de carbono (b), cinza com menor teor de carbono (c) e cinza gerada após combustão completa (d)	35
Figura 13 – Primeira indústria brasileira de vidros <i>float</i> , Cebrace, 1982 (a) e 2018 (b)	39
Figura 14 – Tamanho dos grãos do PDV	44
Figura 15 – Estrutura da sílica cristalina (a), estrutura da sílica amorfa (b)	48
Figura 16 – Usina sucroalcoeira de Umuarama-PR	49
Figura 17 – Lavador de gases (a) e esteira do lavador de gases (b), Usina sucroalcoeira de Umuarama - PR	50
Figura 18 – Aspecto da CBC seca	50
Figura 19 – Empresa de vidro, Apucarana - PR.....	51
Figura 20 – Coleta do resíduo de PDV na empresa de vidro, Apucarana - PR.....	52
Figura 21 – Aspecto do agregado miúdo	54
Figura 22 – Caracterização do agregado miúdo: massa unitária no estado solto (a); massa específica aparente (b); ensaio granulométrico (c).....	55
Figura 23 – Análise granulométrica por sedimentação para CBC (a,b) e PDV (c, d)	56

Figura 24 – Ensaio de massa específica utilizando o frasco de Le chatelier para a CBC (a) e PDV (b).....	57
Figura 25 – Estufa (a) e dessecador (b) para análise do teor de umidade.....	58
Figura 26 – Moinho de bolas.....	60
Figura 27 – Betoneira (a), tanque de armazenamento dos corpos de prova (b)	62
Figura 28 – Equipamento de fluorescência de raios X.....	63
Figura 29 – Equipamento de difração de raios X	64
Figura 30 – Equipamento de fisiossorção de nitrogênio.....	65
Figura 31 – Microscópio eletrônico utilizado para análise por MEV	66
Figura 32 – Equipamento de análise termogravimétrica (a); Material analisado na bandeja da microbalança (b).....	67
Figura 33 – Determinação da água requerida para o ensaio da NBR 5752:1992	68
Figura 34 – Determinação da água requerida para o ensaio da NBR 5751: 1992	69
Figura 35 – Material utilizado no ensaio de pozolanicidade com cal: CBC (a), PDV (B)	70
Figura 36 – Mesa de consistência (<i>flow table</i>)	71
Figura 37 –Imagem ilustrando penetrômetro de Proctor	71
Figura 38 – Ensaio pelo método Penetrômetro de Proctor	72
Figura 39 – Corpos de prova.....	73
Figura 40 – Prensa hidráulica utilizada para rompimento dos corpos de prova	73
Figura 41 – Curva granulométrica do agregado miúdo	74
Figura 42 – Análise termogravimétrica da CBC	77
Figura 43 – Distribuição granulométrica da CBC e do PDV	77
Figura 44 – Resistência à compressão aos 60 dias	79
Figura 44a – Evolução da resistência à compressão para o Grupo 1	80
Figura 44b – Evolução da resistência à compressão para o Grupo 2.....	80
Figura 44c – Evolução da resistência à compressão para o Grupo 3	81
Figura 45 – Difratoogramas de raios X dos principais materiais obtidos.....	86
Figura 46 – Imagens de MEV da CBC seca a 105 °C.....	88
Figura 47 – Imagens de MEV da CBC tratada termicamente	89
Figura 48 – Imagens de MEV do PDV seco a 105 °C	90
Figura 49 – Imagens de MEV das melhores misturas obtidas	91
Figura 50 – Isotermas de adsorção-dessorção de N ₂ e distribuição do tamanho dos poros (detalhe) de CBC fundo (a); PDV fundo (b).....	92

LISTA DE TABELAS / QUADROS

Tabela 1 – Principais componentes do cimento Portland.....	21
Tabela 2 – Tipos de cimento Portland comercializado no Brasil	22
Tabela 3 – Produção de cana-de-açúcar por região e período	31
Tabela 4 – Resíduos gerados no processamento da cana-de-açúcar	32
Tabela 5 – Composição do vidro e sua utilização	39
Tabela 6 – Consumo estimado de vidro plano e suas classes (t/ano)	40
Tabela 7 – Exigências físicas e químicas estabelecidas pela NBR 12653 (2012)	47
Tabela 8 – Composição do cimento Portland CPV - ARI	52
Tabela 9 – Característica do cimento CPV - ARI	53
Tabela 10 – Classificação do agregado de acordo com as frações granulométricas	53
Tabela 11 – Combinações de traços utilizados nas misturas de argamassa	61
Tabela 12 – Caracterização do agregado miúdo.....	74
Tabela 13 – Características da CBC e do PDV	75
Tabela 14 – Classificação granulométrica da CBC e do PDV segundo NBR 6502:1995.	78
Tabela 15 – Composição química das amostras na base de óxido	83
Tabela 16 – Relação mássicas dos componentes das misturas estudadas	84
Tabela 17 – Área específica e volume de poros	93
Tabela 18 – Resistência à compressão e índice de atividade pozolânica com cimento e cal aos 7 dias.....	94
Tabela 19 – Índice de consistência e início e fim de pega	95
Quadro 1 – Trabalhos que avaliaram a CBC como substituta parcial do cimento Portland.....	36
Quadro 2 – Tipos de vidros utilizados na engenharia	41
Quadro 3 – Trabalhos que utilizaram diferentes tipos de vidro com substituição parcial do cimento Portland.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1 RESÍDUO SÓLIDO	17
3.2 CIMENTO PORTLAND	18
3.3 REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO.....	23
3.4 ADIÇÕES DE MINERAIS.....	26
3.5 DIMENSÃO DOS GRÃOS	27
3.6 RESÍDUOS UTILIZADOS	30
3.7 CANA-DE-AÇÚCAR.....	31
3.8 CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	33
3.9 VIDRO.....	38
3.10 VIDRO TEMPERADO	42
3.11 PÓ DE VIDRO.....	42
3.12 POZOLANA.....	46
4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	49
4.1 MATERIAIS.....	49
4.1.1 Coleta da CBC e características da usina	49
4.1.2 Coleta do PDV e características da empresa	51
4.1.3 Aglomerante.....	52
4.1.4 Coleta do agregado miúdo.....	53
4.1.5 Coleta da água.....	54
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	54
4.2.1 Caracterização físico-química do agregado miúdo	54
4.2.2 Caracterização físico-química da CBC e do PDV	55
4.2.2.1 Análise granulométrica	55
4.2.2.2 Massa específica.....	56
4.2.2.3 Teor de umidade.....	57
4.2.2.4 Matéria orgânica e carbono orgânico	58

4.2.2.5 Perda ao fogo	59
4.2.3 Beneficiamento do material.....	60
4.2.4 Definição do traço e moldagens dos corpos de prova	60
4.2.5 Caracterização estrutural e composicional dos materiais utilizados	62
4.2.5.1 Fluorescência de raios X	62
4.2.5.2 Difração de raios X	63
4.2.5.3 Adsorção-dessorção de nitrogênio	64
4.2.5.4 Microscopia eletrônica de varregura	65
4.2.5.5 Análise termogravimétrica	66
4.2.6 Avaliação do desempenho da argamassa	67
4.2.6.1 Índice de atividade pozolânica com o cimento Portland	67
4.2.6.2 Índice de atividade pozolânica com cal	69
4.2.6.3 Consistência	70
4.2.6.4 Avaliação do início e fim de pega com penetrômetro de Proctor	71
4.2.6.5 Resistência à compressão.....	73
5 RESULTADOS e DISCUSSÃO	74
5.1 AGREGADO MIÚDO	74
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA CBC E DO PDV	75
5.3 TRATAMENTO TÉRMICO DA CBC E DO PDV	76
5.3.1 Análise granulométrica da CBC e do PDV.....	77
5.3.2 Resistência à compressão simples.....	78
5.3.3 Fluorescência de raios X	82
5.3.4 Difração de raios X	85
5.3.5 Microscopia eletrônica de varredura	87
5.3.6 Adsorção-dessorção de nitrogênio	92
5.3.7 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland e cal.....	94
5.3.8 Índice de consistência e Início e fim de pega.....	95
6 CONCLUSÃO	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

Assim como qualquer ser vivo, os seres humanos retiram recursos naturais do meio ambiente para utilizar as partes de interesse e devolver o que se pode chamar de sobras.

A indústria brasileira de cimento teve uma produção de 63,13 milhões de toneladas em 2016 (SNIC, 2017), sendo responsável pela emissão de 659 kg de CO₂ para cada tonelada de cimento fabricado e outros gases em menores proporções, tais como CO, CH₄, NO_x e SO₂ (CIMENTO.ORG, 2010). A indústria do cimento é responsável por emitir poluição atmosférica devido o processo de calcinação do calcário e da queima de combustíveis fósseis para a fabricação do clínquer.

O cimento Portland, de custo relativamente baixo, alta resistência mecânica, torna-se eficaz para diversas aplicações relacionadas às misturas cimentícias na construção civil. São diversos os tipos de cimentos produzidos, dependendo dos materiais empregados na sua composição, tais como, pozolanas, escória de alto forno, materiais carbonáticos, argilas calcinadas, entre outros (ABCP, 2002).

De acordo com a *American Society for Testing and Materials*, ASTM C618 (2012), materiais pozolânicos, são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que têm pouca ou nenhuma atividade cimentícia, contudo, se possuírem granulometria fina e na presença de umidade, são capazes de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentícias.

Existem estudos que avaliam o emprego de resíduos industriais como fonte de componentes do cimento, em substituição total ou parcial. Um exemplo interessante e de origem brasileira é o uso de cinza de bagaço da cana-de-açúcar (CBC) e o pó de vidro (PDV) em misturas cimentícias como material pozolânico (ALIABDO, 2016). A CBC e o PDV contêm grande quantidade de dióxido de silício (SiO₂) em sua composição que, dependendo das condições de tratamento, podem desenvolver aumento na resistência à compressão (PAULA, 2009; IDIR *et al.*, 2011; CORINALDESI *et al.*, 2005).

De acordo com Cordeiro (2006), a agroindústria gera resíduos que poluem o meio ambiente. Um dos setores que tem maior potencial de incorporação desses resíduos é a construção civil, com aplicações em vários segmentos. A produção mundial de cana-de-açúcar em 2016 foi de 684,77 milhões de toneladas, conforme

dados da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Cada tonelada processada gera, aproximadamente, 250 kg de bagaço da cana-de-açúcar, os quais usualmente são aproveitados para fins energéticos nas caldeiras. Para cada 250 kg de bagaço da cana-de-açúcar são produzidas aproximadamente 6 kg de CBC, o que corresponde a 2,4 % do peso de bagaço da cana-de-açúcar. Após o processo de geração de vapor, a cinza é destinada, na maioria dos casos, juntamente com a torta de filtro para adubação complementar nas próprias lavouras. No entanto, a aplicação no solo não é eficaz devido à composição rica em elementos minerais variados além de alguns metais em diferentes concentrações, podendo aumentar ou diminuir a decomposição da matéria orgânica pela microbiota, devido ao fornecimento de nutrientes aos microrganismos (UNICA, 2014; PANDEY *et al.*, 2010).

Com a substituição parcial do cimento por CBC, é possível reinserir um resíduo com baixa valoração na cadeia econômica como matéria prima para outro produto, podendo até mesmo alcançar viabilidade econômica, o que pode aumentar o período de exploração das jazidas de calcário e argila e, conseqüentemente, até mesmo a vida útil da fábrica de cimento. Com isso, há um aumento da capacidade de produção, sem necessidade permanente de novos investimentos, além da aplicabilidade ao resíduo gerado pela agroindústria sucroalcooleira (SANTOS, 2010).

A produção brasileira de vidro temperado está em torno de 548 mil toneladas por ano. O PDV, gerado como resíduo na manufatura de corte do vidro tem potencial para ser adicionado às misturas cimentícias (ABRAVIDRO, 2018).

O estudo realizado por Idir (2011) utilizou vidro de diferentes composições, obtendo atividade pozolânica quando adicionado em misturas cimentícias com partículas com diâmetro menor que 140 µm. Estudos em que se substituiu uma fração da areia por pó de vidro têm apresentado resultados satisfatórios e mostraram que as propriedades mecânicas da argamassa foram melhoradas (SCHNEIDER, 2018; SHAO *et al.*, 2000).

Apesar de algumas atividades humanas possuírem um importante potencial poluidor, aumentando com o nível de geração de resíduos e gravidade pela sua destinação final inadequada, há alternativas relativamente simples para mitigar esse problema (LEÃO, 1997).

Este trabalho busca caracterizar e analisar a resistência de corpos de prova através da substituição parcial do cimento Portland por CBC proveniente da queima

do bagaço da cana-de-açúcar, bem como pelo PDV gerado nas indústrias de manufatura de corte de vidro.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral substituir parcialmente o cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar e por pó de vidro, com intuito de avaliar a resistência mecânica à compressão simples de argamassas e a existência de efeito sinérgico entre as duas adições. Para isso, analisou-se as características físicas e químicas das misturas cimentícias produzidas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a quantidade ideal de substituição de CBC e PDV por cimento a partir da interpretação dos dados obtidos nos diferentes ensaios realizados;
- Identificar as características físico-químicas da CBC e do PDV e os possíveis efeitos fíler e/ou pozolânicos;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RESÍDUO SÓLIDO

Resíduos sólidos são gerados por diversas fontes antrópicas e quando descartadas em lugares inapropriados ou não tratados corretamente causam impactos significativos para o meio ambiente e sociedade.

Os resíduos de origem industrial são considerados os maiores causadores de problemas ambientais devido à sua composição variada, podendo conter produtos químicos, solventes, metais entre outros. Eles necessitam de condições específicas para coleta, transporte, tratamento e disposição final devido à sua natureza e periculosidade (SOUTO, 2013).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, conforme estabelecido na Lei nº 12305:2010, os resíduos sólidos são classificados de acordo com a sua origem e periculosidade. A ABNT NBR 10004:2004, classifica resíduos sólidos pela sua periculosidade podendo dividir em: (i) Classe 1 perigosos; (ii) Classe 2 não perigosos podendo ser subdivida em II-A, não inertes e II-B inertes.

Resíduos pertencentes a Classe I apresentam no mínimo uma das seguintes características: corrosividade, reatividade, toxicidade, inflamabilidade, patogenicidade e/ou constituintes do lixiviado em concentração superior ao estabelecido no anexo F da norma mencionada.

Os resíduos da Classe II-A podem apresentar propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Os resíduos da Classe II-B não têm nenhum dos seus constituintes solubilizados à concentração superior aos padrões de potabilidade de água, exceto quanto à cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G. Assim, para que se possa classificar um resíduo faz-se necessário a realização do ensaio de lixiviação conforme estabelecido na ABNT NR 10005:2004 e de solubilização ABNT NBR 10006:2004. Nesse contexto de geração de resíduos sólidos, é notável que o setor agroindustrial e indústrias de vidro estejam em expansão, através da produção crescente do etanol e açúcar e produtos que utilizam o vidro como: portas, janelas, escadas, frascos, embalagens etc. Os subprodutos gerados por essas empresas podem ter um fim mais viável se suas propriedades e características forem conhecidas para a utilização do mesmo como matéria-prima para a fabricação do cimento Portland.

3.2 CIMENTO PORTLAND

Alvenaria de pedra e materiais com propriedades cimentícias compõe um dos métodos mais antigos utilizados na construção pelo homem. Monumentos como as pirâmides do Egito e as ruínas no Império Romano, comprovam a utilização de aglomerantes em suas construções. Estudos relatam que o aglomerante utilizado era composto basicamente de areia e gesso calcinado, empregado para o assentamento de blocos rochosos (CARVALHO, 2008). A Figura 1 mostra as pirâmides Quéops, Quéfren e Miquerinos, localizadas próximo à capital do Egito,

Cairo (a) e ao Anfiteatro Flaviano, Coliseu, em Roma (b), comprovando a utilização de materiais com propriedades ligantes para a execução de obras.



Figura 1 - Pirâmides Quéops, Quéfren e Miquerinos (a); Coliseu (b).

Fonte: FILHO, 1989.

O inglês Joseph Aspdin foi um dos primeiros estudiosos a alavancar a produção de cimento em 1824, aperfeiçoando o processo de mistura para a fabricação do cimento, queimando e moendo argila juntamente com pó de pedra calcária retirada das ruas da cidade, produzindo assim uma pedra artificialmente tão dura quanto à utilizada na época. O nome dado à pasta foi cimento Portland, por sua semelhança com o calcário branco-prateado que se extraía na península de Portland, no Condado de Dorset - Reino Unido (ABCP, 2002; CARVALHO, 2008).

No Brasil, o desenvolvimento da indústria do cimento iniciou-se em 1888 com o empresário Antônio Probst Rodovalho, o qual instalou a primeira indústria de cimento em uma fazenda em Santo Antônio, no Estado de São Paulo. A partir de então, várias indústrias cimentícias foram sendo instaladas no país. Por volta da década de 70, ocorreu um aumento exponencial na produção de cimento, de aproximadamente 9 milhões de toneladas para 27 milhões de toneladas. No ano de 1999, houve um recorde na produção de aproximadamente, 40 milhões de toneladas de cimento devido ao início do Plano Real. Nos dias atuais, a produção de cimento está por volta de 68 milhões de toneladas por ano (SNIC, 2017; ABCP, 2018).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes ou ligantes, que endurece pela ação da água.

Quando misturado com água, agregados graúdos e miúdos o resultado é o chamado de concreto ou argamassa, ambos amplamente utilizados nos dias atuais.

As características e propriedades do cimento vão depender da qualidade e proporção dos materiais inseridos na sua composição.

O cimento Portland, apesar da possibilidade de uma série de misturas, é composto basicamente de materiais carbonáticos (CaCO_3) e materiais argilosos à base de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e hematita (Fe_2O_3). O processo de fabricação do cimento, de maneira geral, consiste na moagem da matéria prima e das adições de mistura em proporções adequadas. Posteriormente, o processo de calcinação ocorre em forno rotativo com temperatura aproximada de $1450\text{ }^\circ\text{C}$, onde a mistura de materiais sofre fusão, formando, finalmente, o clínquer.

Após a geração do clínquer, o mesmo passa por um processo de moagem para alcançar a granulometria adequada, menor que $75\text{ }\mu\text{m}$, e é adicionada uma pequena quantidade de gesso e materiais corretivos para suprir a falta de elementos não disponíveis nas matérias primas principais.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), as reações químicas que ocorrem para a formação do cimento podem ser representadas de acordo com a Figura 2.

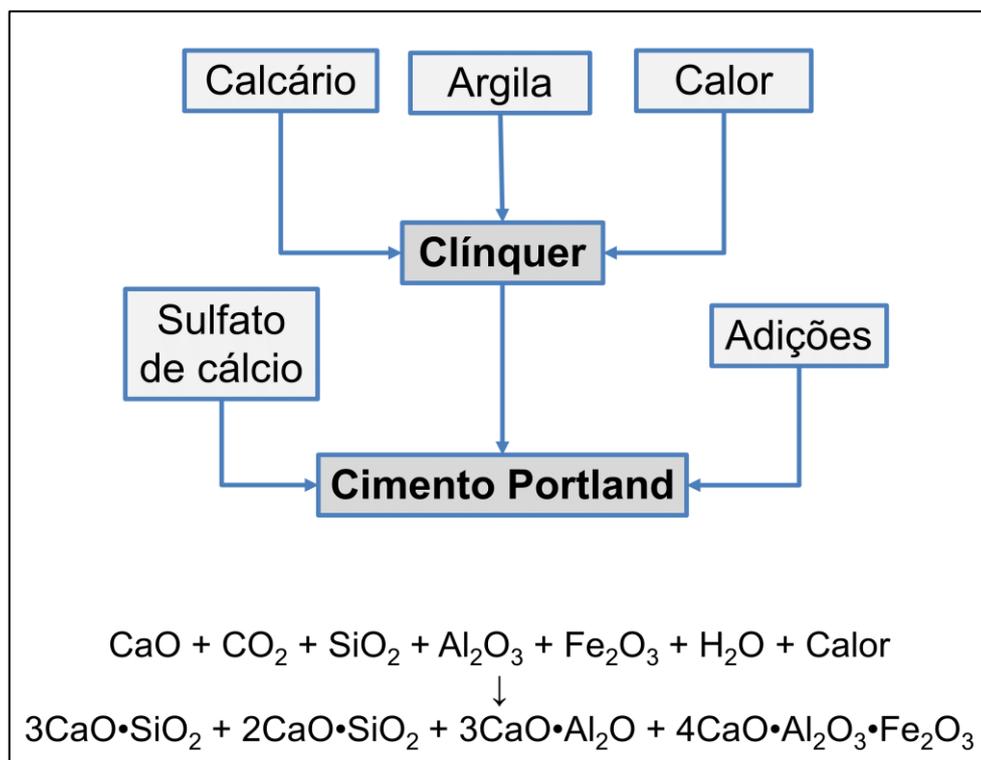


Figura 2 - Representação esquemática do processo produtivo do cimento Portland e as reações químicas envolvidas.

Fonte: Metha & Monteiro (1994).

O silicato tricálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e o silicato dicálcio ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) são os componentes mais importantes, pois eles são responsáveis pela resistência mecânica da pasta. O aluminato tricálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) hidrata-se rapidamente, no entanto, tem pouca influência sobre as propriedades mecânicas da pasta. Já o ferroaluminato tetracálcio ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) tem a função de equilibrar a composição química da pasta por apresentar boa estabilidade química (CORDEIRO, 2006; MEHTA e MONTEIRO, 2008). A Tabela 1 mostra os principais componentes do cimento Portland.

Tabela 1- Principais componentes do cimento Portland.

Nome do composto	Composição	Abreviação
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de CORDEIRO, 2006.

Nos dias atuais, existem materiais que são empregados em substituição ao cimento, tais como a escória de alto-forno, proveniente do produto secundário da produção de ferro-gusa, cinzas volantes, as quais são resultantes da combustão do carvão, e outros materiais. Esses materiais podem proporcionar efeitos distintos, tais como, o efeito de empacotamento granulométrico e/ou efeito de reatividade com a mistura, fíler e/ou pozolânico, melhorando as propriedades do cimento e possibilitando a reutilização resíduos industriais (DAL MOLIN, 2011; LOTHENBACH *et al.*, 2011).

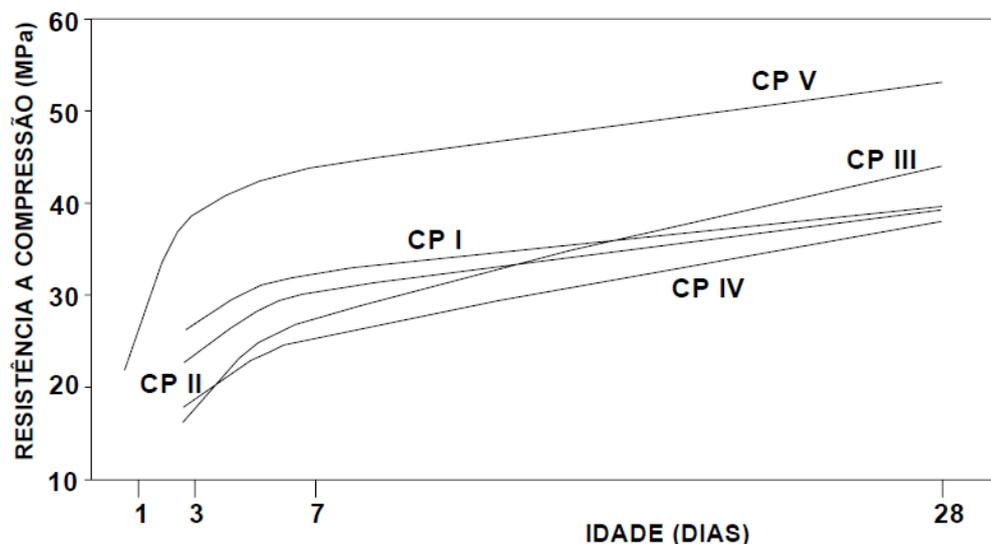
Existem diversos tipos de cimentos, devido às necessidades específicas de seus consumidores. A Tabela 2 mostra os tipos de cimentos comercializados com suas diferentes nomenclaturas.

Tabela 2 – Tipos de cimento Portland comercializado no Brasil.

Tipo de cimento	Siglas
Cimento Portland comum	CP I
Cimento Portland comum com adição	CP I-S
Cimento Portland com escória	CP II – E
Cimento Portland composto com pozolana	CP II -Z
Cimento Portland composto com fíler	CP III-F
Cimento Portland de alto-forno	CP III
Cimento Portland pozolânico	CP IV
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V
Cimento Portland Branco estrutural	CPB
Cimento Portland Branco não estrutural	CPB
Cimento Portland resistente aos sulfatos	Siglas e classe dos tipos originais I, acrescidos do sufixo RS

Fonte: Adaptado ABCP (2002).

Devido à grande variedade de tipos de cimentos e suas distintas aplicações na construção civil, tem-se variações em sua resistência à compressão simples. A Figura 3 mostra a resistência média em relação ao tempo dos principais tipos de cimento Portland comercializado no Brasil.

**Figura 3** – Resistência média dos principais tipos de cimento Portland.

Fonte: Adaptado, ABCP (2002).

Frente ao elevado gasto energético na cadeia de produção do cimento, cerca de 68,1 milhões de toneladas por ano, faz-se necessário a tomada de medidas visando à substituição de parte do cimento por novos materiais ou resíduos industriais, no sentido de reduzir a utilização de matéria prima para sua fabricação e, conseqüentemente, o impacto ambiental oriundo da sua produção. Com o uso de tais medidas, reduz-se a emissão de poluentes para a atmosfera e aumenta-se a vida útil da jazida de calcário.

3.3 REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO

Os processos de hidratação e de formação da microestrutura influenciam diretamente as características físicas, mecânicas e funcionais de argamassas e concretos. À medida que se adiciona água ocorrem quase instantaneamente reações químicas entre os silicatos e aluminatos, denominadas reações de hidratação do cimento Portland (CÂMARA, 2015).

O processo de hidratação consiste na ocorrência de reações simultâneas dos compostos anidros com a água. O silicato tricálcio (C_3S) apresenta rápida hidratação e desprende uma quantidade média de calor, $\Delta H_{hid} \sim 500 \text{ (J/g}^{-1}\text{)}$. A hidratação do C_3S resulta em um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, sendo responsável pela resistência inicial e aumento da resistência final da pasta. Já o silicato dicálcio (C_2S) possui hidratação lenta e desprende menor quantidade de calor $\Delta H_{hid} \sim 250 \text{ (J/g}^{-1}\text{)}$, no entanto, é responsável pelo aumento da resistência nas idades avançadas da argamassa. A sua hidratação produz $Ca(OH)_2$ e C-S-H em menor volume quando comparado ao C_3S . O aluminato tricálcio (C_3A) reage rapidamente com a água, liberando maior quantidade de calor ($\Delta H_{hid} \sim -1350 \text{ J/g}$), pois não há precipitação dos compostos hidratados sobre a superfície das partículas chegando à fase cristalina estável após formar composições intermediárias.

Faz-se necessário a adição de componentes a base de sulfato, como a gipsita, que formam sulfoaluminato de cálcio e, ao reagirem com o aluminato tricálcio (C_3A), retardam as reações proporcionando um maior tempo de início e fim de pega (MEHTA e MONTEIRO, 1994; SINGH, 2000).

Segundo Young *et al.*, (1998), todas as reações de hidratação são exotérmicas, sendo divididas em estágios conforme o seu grau de hidratação em

relação ao tempo. A Figura 4 relaciona a taxa de evolução de calor por tempo, nas cinco fases de hidratação que acontecem nas misturas cimentícias.

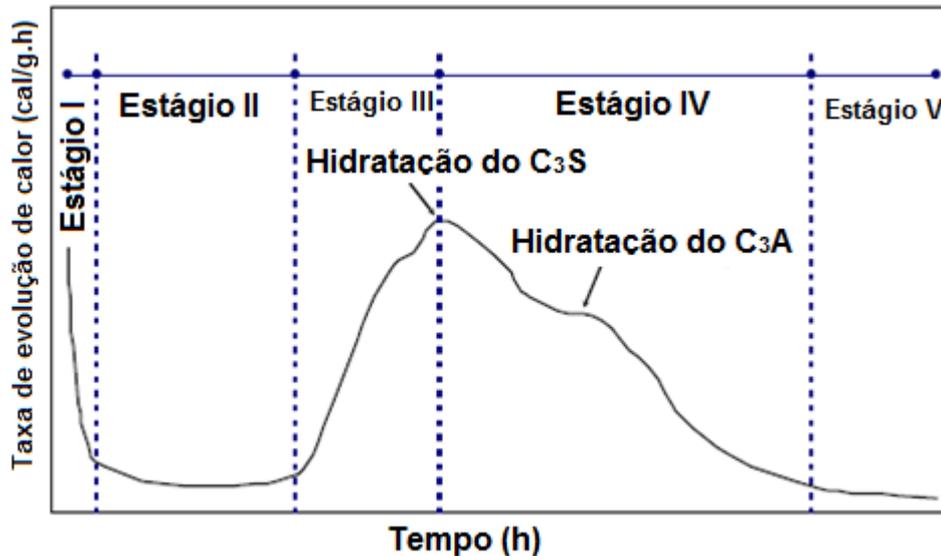


Figura 4 - Fase de hidratação de misturas cimentícias.

Fonte: YOUNG *et al.*, 1998.

No primeiro estágio acontece a maior parte das reações químicas do cimento, dissolução de espécies iônicas e formação de fases hidratadas, devido à rápida dispersão de calor quando a água é introduzida. Sulfatos alcalinos são completamente dissolvidos em poucos segundos liberando íons como K^+ , SO_4^{2-} e Na^+ para o meio. A hidratação do composto C_3S está vinculada ao aumento da concentração de íons Ca^{2+} e OH^- na fase líquida, embora a relação C:S do produto hidratado seja menor.

Ao mesmo tempo, a etringita, uma saturação de Ca^{2+} , seguida da precipitação de $Ca(OH)_2$, ocasionando uma rápida hidratação dos grãos de cimento gerando gel de C-S-H, é formada pela dissolução do C_3A e reação com os íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} , presentes na fase líquida. O segundo estágio é caracterizado como estágio de dormência, pois as taxas de reações são reduzidas, a concentração de hidróxido de cálcio na fase líquida alcança seu limite máximo de reação e começa a diminuir a quantidade de reações. O aumento das taxas de hidratação do C_3S e do β - C_2S é considerado o terceiro estágio.

A concentração de SO_4^{2-} diminui devido à dissolução do sulfato de cálcio, logo a resistência mecânica e a diminuição da porosidade ocorrem devido à rápida formação de compostos hidratados. No quarto estágio, a fase C-S-H continua a ser

formada, porém as taxas de reações reduzem gradativamente. A indicação da hidratação do C_3A representa o momento em que o sulfato de cálcio se esgota e a etringita formada pela hidratação nas primeiras idades reage com o C_3A adicional e $C_2(A,F)$ para formar monossulfoaluminato de cálcio, caracterizando o estágio IV. No quinto e último estágio acontece a densificação da microestrutura, gerada pelo preenchimento dos poros existentes entre as partículas. A Figura 5 representa as diferentes fases de hidratação (YOUNG *et al.*, 1998; CORDEIRO, 2017).

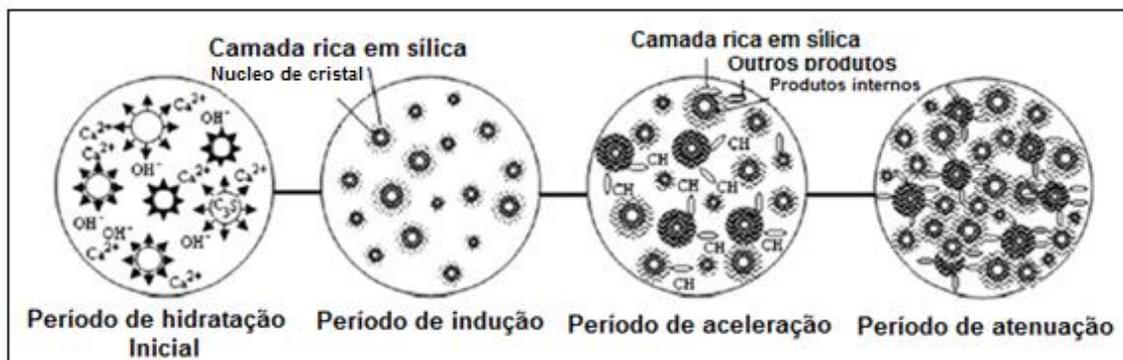


Figura 5 - Processo de hidratação do cimento.

Fonte: DONGYU, 2012.

O grau de hidratação, quantidade de água e evolução do calor de hidratação podem variar com diferentes tipos de adições no cimento. Três efeitos físicos podem ser observados na hidratação do cimento com adições minerais em sua composição: o efeito de diluição do cimento Portland, equivalente ao aumento da relação água/cimento, inversamente proporcional à taxa de substituição do cimento; o efeito da distribuição granulométrica, ou efeito fíler, que depende da granulometria e da quantidade de adição mineral, relacionado à porosidade da mistura; e o efeito de nucleação, que é um processo físico/químico proporcionado pela ativação da hidratação do cimento, o que catalisa a nucleação dos hidratos, reduzindo a barreira de energia (LAWRENCE *et al.*, 2003).

No entanto, alguns materiais quando inseridos em argamassas na fase de hidratação podem acarretar reações químicas que ocorrem entre os íons alcalinos liberados durante a hidratação do cimento e determinados minerais. Essa reação pode causar expansão do concreto e argamassas reduzindo a resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade resultando na diminuição da vida útil do concreto, entre elas pode-se citar as reações álcali-agregado (HELMUTH, 1992).

3.4 ADIÇÕES DE MINERAIS

De acordo com a ABNT NBR 11.172 (1990), existe diferença entre aditivos e adições, onde aditivos são componentes químicos adicionados à mistura em pequenos teores com o intuito de alterar as características no estado fresco e/ou no endurecimento das misturas cimentícias. As adições são produtos de origem mineral, adicionados à mistura de concreto e argamassa, com capacidade de alterar suas características físicas.

Frequentemente, as adições utilizadas em misturas cimentícias são resíduos provenientes de outras indústrias. O intuito da reutilização de materiais que seriam simplesmente descartados caracteriza uma prática sustentável, uma vez que a demanda por matéria prima tende a diminuir.

As adições de minerais, em geral, resultam em materiais cimentícios com melhores características técnicas; quando quimicamente ativas podem aumentar a resistência ao ataque de sulfatos e diminuir as expansões decorrentes das reações álcali-agregado. No entanto, muitas variáveis influenciam o êxito das adições, tais como, área específica, tamanho de partícula, composição química, relação água/aglomerante entre outros (DAL MOLIN, 2011).

Nos dias atuais, utilizam-se adições com finalidade de diminuir o consumo da matéria prima do cimento, reduzindo o valor final do produto e diminuindo a emissão de poluentes para a atmosfera. A emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzido, por país, em nível mundial, em média, é de 800 kg. O Brasil emite cerca de 660 kg/t, estando abaixo da média, devido a materiais inovadores inserido no cimento, sendo uma situação satisfatória perante os outros países. A maior parte da emissão de CO₂ é na etapa da formulação do clínquer, devido à grande participação do calcário no processo de calcinação (CIMENTO.ORG, 2010).

. As adições podem ocasionar efeitos distintos nas misturas, sendo o efeito fíler e o efeito pozolana os dois mais relevantes.

O efeito fíler é obtido pela adição de minerais finamente divididos e sem atividade química, responsável apenas por preenchimento de vazios estruturais (ELYAMANY *et al.*, 2014). Já o efeito pozolânico, de acordo com a ASTM C618 (2012), é originado por materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si só têm pouco ou nenhum valor cimentício, no entanto, quando finamente pulverizados e na presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura

ambiente, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como, os silicatos e os aluminatos de cálcio hidratado.

3.5 DIMENSÃO DOS GRÃOS

A dimensão das partículas quando adicionado às misturas cimentícias influenciam diretamente na reatividade da mistura, pois as reações são proporcionais à superfície específica do material, que por sua vez, é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Outra vantagem das partículas com pequena dimensão é o fato de possibilitarem maior compacidade entre os agregados (LOTHENBACH *et al.*, 2011).

Wellenkamp, (1999), em seu trabalho de revisão sobre moagem, classifica materiais industrializados, como finos e ultrafinos aqueles com 100 μm de dimensão e menores que 10 μm , respectivamente. A moagem para a fabricação do cimento representa uma das principais etapas e é responsável por consumir cerca de 40 % de energia total empregada na fabricação do cimento Portland.

Existem diversos tipos de corpos moedores de fragmentos, dentre os mais comuns estão o moinho de bolas, de barras, vibratórios, de cone entre outros. Geralmente, os corpos moedores ocupam em torno de 20 a 80 % de volume interno do moinho.

A escolha do material dos corpos moedores e da carcaça do moinho deve ser realizada de forma a se evitar o desgaste do mesmo e a contaminação da amostra. A moagem pode ser realizada de duas formas, a seco e a úmido dependendo do tipo de material e como irá trabalhar após a moagem. Os materiais cimentícios devem ser moídos a seco devido às reações que acontecem em meio aquoso (CORDEIRO, 2006).

Além da escolha do moinho deve-se considerar o circuito de moagem empregado. Os circuitos são divididos em dois modelos, aberto e fechado. O circuito fechado refere-se ao retorno da fração grossa do material ao moinho como material circulante. O fluxo de material passante pelo moinho é igual ao fluxo de alimentação, readicionando o material que não foi classificado. Em contrapartida, a moagem de circuito aberto é realizada pela alimentação constante e o material alcança a granulometria adequada sem a opção de retorno da fração que ficar fora da especificação. A velocidade do ciclo aberto é controlada pela inserção do material

que deverá ser moído, a Figura 6 mostra o esquema de circuitos de moagem (WELLENKAMP, 1999).

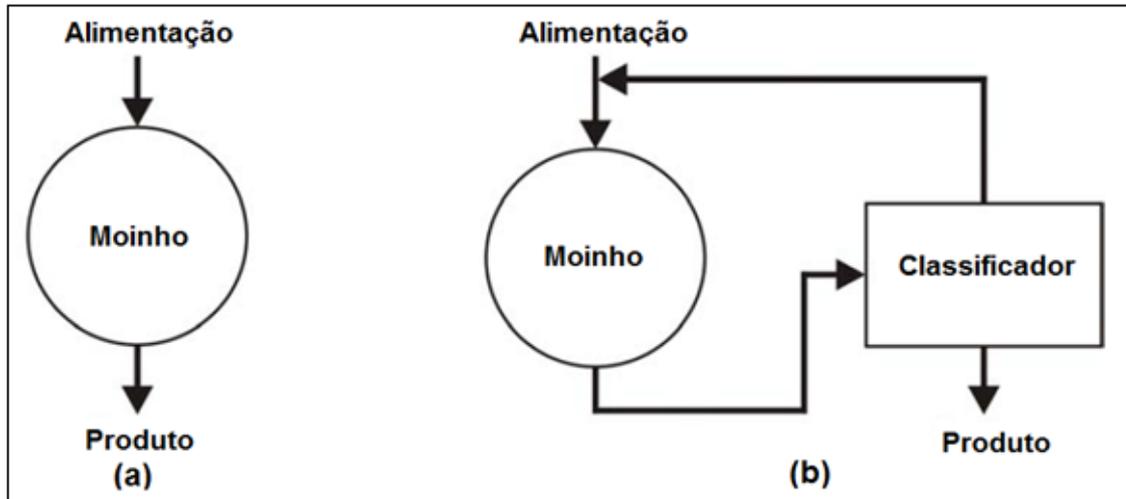


Figura 6 – Circuitos de moagem, aberto (a), fechado (b).

Fonte: Adaptado, CORDEIRO, 2006.

Segundo Stolz *et al.* (2018), as características granulométricas dos materiais possuem um papel importante, pois deve apresentar resistência suficiente e não deve sofrer alterações quando submetidas à cargas e à estabilização da composição, onde deve haver o melhor arranjo das partículas, aprimorando a distribuição dos esforços.

Quando a reatividade química dos materiais é relacionada com as suas características granulométricas, a estrutura torna-se mais densa, preenchendo os vazios existentes e aumentando a superfície de contato, facilitando a reação com o hidróxido de cálcio, o que é determinante para a obtenção de uma alta velocidade de reação.

De acordo com a ABNT NBR 6502, as frações constituintes e solos podem ser classificadas conforme a seguinte escala granulométrica: pedregulhos, cujo diâmetro das partículas está entre 76 e 4,8 mm; areia, entre 4,8 e 0,05 mm; silte, entre 0,05 e 0,005 mm; argila, inferior a 0,005 mm. A Figura 7 representa a análise granulométrica onde é traçada por pontos em um diagrama semi-logarítmico, no qual os eixos das abscissas representam os logaritmos das dimensões das partículas e os eixos das ordenadas as porcentagens, em peso de material.

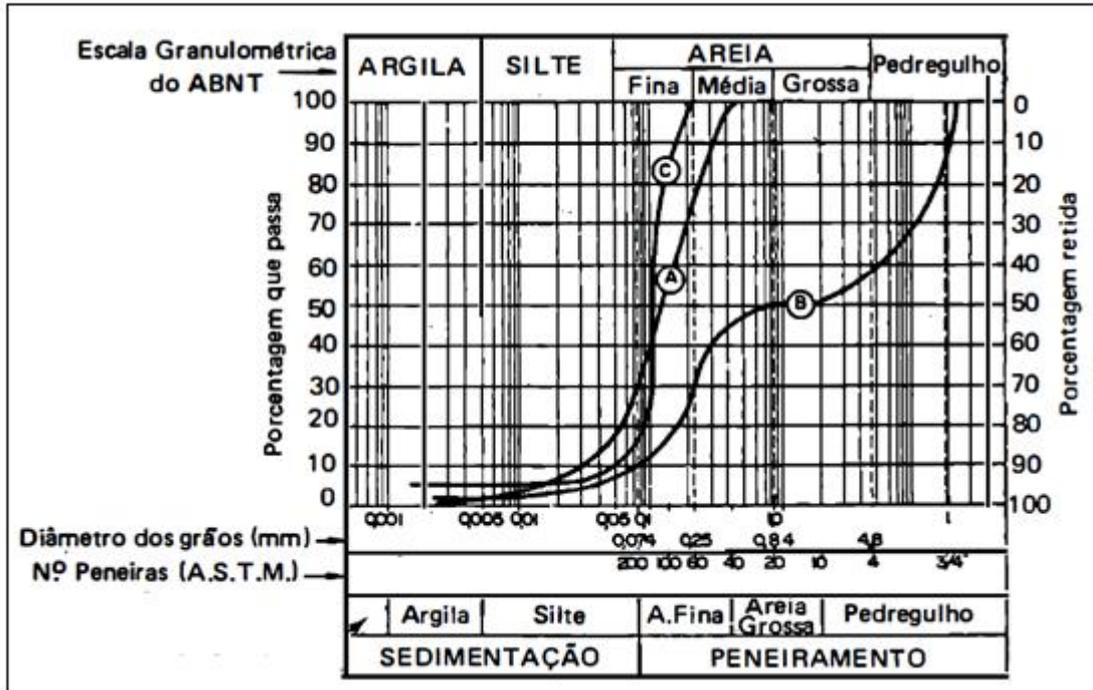


Figura 7 - Escala granulométrica segundo a ABNT.
Fonte: CAPUTO, 1988.

De acordo com a granulometria, pode-se observar diferentes tipos de curvas onde são classificadas de acordo com a distribuição dos grãos entre as peneiras, sendo: contínua (curva, a), descontínua (curva, b), uniforme (curva, c), bem graduada ou mal graduada. A Figura 8 mostra o esquema de como são essas diferenças.



Figura 8 – Diferença entre os grãos.
Fonte: CAPUTO, 1988.

Com as curvas granulométricas pode-se definir e classificar o agregado conforme o seu diâmetro efetivo e seu grau de uniformidade. O coeficiente de uniformidade é definido pela razão entre os diâmetros correspondentes a 60 % e 10 %, tomados da curva granulométrica, conforme ilustra a Equação 1.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{Equação 1})$$

Esta relação indica a falta de uniformidade, podendo ser classificada como muito uniforme quando $C_u < 5$, uniformidade média $5 < C_u < 15$ e desuniforme quando $C_u > 15$.

3.6 RESÍDUOS UTILZADOS

Empregar resíduos como fonte de matéria-prima promove o bem para a sociedade e para o meio ambiente. O uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), tais como escória de alto-forno (produto secundário da produção de ferro-gusa), sílica ativa (subproduto da fabricação de silício elementar), liga ferro-silício ou cinzas volantes (resultantes da combustão de carvão), representa uma solução viável para substituir parcialmente o cimento Portland. O emprego de qualquer um desses materiais resulta na redução de emissão de CO_2 por tonelada de cimento fabricado e a exploração das jazidas de calcário, possibilitando muitas vezes a melhoria nas misturas cimentícias (LOTHENBACH *et al*, 2011; CORDEIRO, 2006).

Atualmente, novos materiais estão sendo estudados para proporcionar melhorias nas misturas cimentícias, sendo alguns deles a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a cinza da casca de arroz, o pó de vidro e muitos outros materiais.

3.7 CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar chegou ao Brasil em meados do século XVI com a vinda dos portugueses e tornou-se uma das culturas agrícolas de maior participação no cenário econômico do país. A cana-de-açúcar é classificada como planta alogênia da família gramínea, pertencente à classe das monocotiledôneas e é típica de clima tropical e subtropical, adaptando-se com facilidade a diferentes tipos de solos (UNICA, 2012). A Figura 9 mostra uma plantação de cana-de-açúcar na fase de crescimento (a) e colheita mecanizada (b).



Figura 9 – Exemplo de plantação de cana-de-açúcar em fase de crescimento (a) e durante a colheita mecanizada (b).

Fonte: FAEP, 2018; SOCICANA, 2018.

O Proálcool, parte da Política Nacional de Biocombustível, incentivou o aumento de plantações de cana-de-açúcar no Brasil visando a maior diversidade na matriz energética e aumentando a participação de fontes renováveis na produção de biocombustíveis.

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção estimada de cana-de-açúcar para a safra do ano de 2017/2018 é de 635.595,7 mil toneladas. Essa produção, corresponde a uma área a ser colhida de 8.738,6 mil hectare. A Tabela 3 mostra a produção de cana-de-açúcar por região e período.

Tabela 3 – Produção da cana-de-açúcar por região e período.

Regiões	Cana-de-açúcar (mil toneladas)	
	2016 / 2017	2017 / 2018
Norte-Nordeste	44.704,0	46.847,1
Centro-Sul	612.480,0	588.748,6
Brasil	657.184,0	635.595,7

Fonte: CONAB, 2018.

A queda está relacionada à colheita mecanizada, onde terras de difícil mecanização estão sendo dispensadas para plantio pelas usinas sucroalcooleiras.

O Paraná possui 30 usinas de cana-de-açúcar, sendo que as regiões de Jacarezinho, Maringá, Paranavaí e Umuarama concentram a grande maioria delas. O Estado encontra-se na quinta posição nacional de maiores produtores de cana-de-açúcar, com produção estimada para a safra de 2017/2018 de 37 milhões de

toneladas. A concentração das usinas na região norte, noroeste e oeste do Paraná está relacionada ao clima favorável para a lavoura, pois o clima tropical com menor altitude apresenta menores ocorrências de geadas com estimativa de uma a cada dez anos, tornando-se uma região apta para o plantio de cana-de-açúcar (CONAB, 2018). A Figura 10 mostra as usinas de cana-de-açúcar e destilarias do Estado do Paraná.

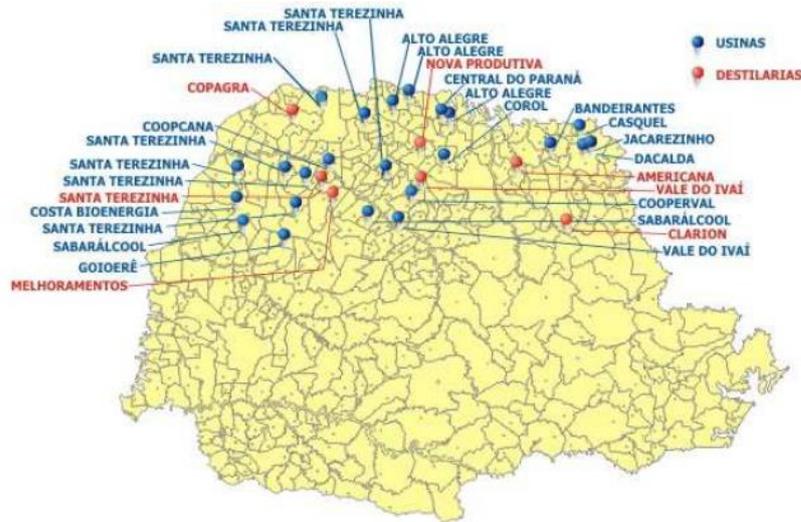


Figura 10 – Mapa das usinas de cana-de-açúcar do Estado do Paraná.
Fonte: ALCOPAR (2015).

Os principais produtos fabricados na indústria sucroalcooleira são o açúcar e o álcool onde o processo de fabricação difere na extração do caldo da cana, que é tratado para produzir açúcar ou fermentado para a produção de álcool.

No entanto, a indústria sucroalcooleira antes, durante e após o processo de fabricação do açúcar e do álcool gera diversos tipos de resíduos, subprodutos que podem ser utilizados para diversos fins. A Tabela 4 mostra os resíduos gerados pela cana-de-açúcar, sua origem e destino.

Tabela 4 – Resíduos gerados no processamento da cana-de-açúcar.

Resíduo	Origem	Destino
Bagaço	Moagem da cana-de-açúcar e extração do caldo.	Cogeração de energia Elétrica. Produção de ração animal. Uso como adubo.
Vinhodo	Resíduo da destilação do melaço fermentado para obtenção do álcool.	Uso como fertilizante.

Continuação

Melaço	Fabricação do açúcar.	Produção do álcool.
Palha	Folhas secas provenientes do corte da cana.	Uso como adubo do solo.
Torta de filtração	Filtração do logo gerado na clarificação.	Uso como adubo do solo.
Cinza do bagaço da Cana-de-açúcar	Queima do bagaço nas caldeiras.	Uso como adubo do solo.

Fonte: Adaptado, Freitas, 2005; NUNES, 2009.

A aplicação de cada subproduto vem sendo estudado para que seja dado o melhor tratamento possível. Dentre os subprodutos vale destacar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, pois são gerados grandes volumes devido a grandes montantes de cana-de-açúcar processados dentro do setor sucroalcooleiro.

3.8 CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cinza do bagaço da cana de açúcar (CBC) é gerada pela queima do bagaço da cana-de-açúcar nas caldeiras nas usinas de álcool para a geração de energia na forma de vapor, o que muitas vezes torna a indústria sucroalcooleira autossuficiente energeticamente. Cada tonelada processada de cana-de-açúcar gera 250 kg de bagaço, que são aproveitados para fins energéticos nas caldeiras, e para cada 250 kg de bagaço são produzidos aproximadamente 6 kg (2,4 %) de CBC (UNICA, 2014). A cinza, geralmente, é jogada nas lavouras para servir de adubação orgânica e, caso despejada indevidamente, pode causar impactos ambientais e trazer danos à natureza e à população local.

A CBC é constituída basicamente de sílica (SiO_2), possibilitando sua utilização na construção civil em misturas com o cimento para a formulação de concreto (SINGH, 2000). A CBC, quando adicionada em misturas cimentícias, pode proporcionar efeito fíler e/ou pozolânico. A Figura 11 representa um fluxograma com as etapas para geração da CBC.

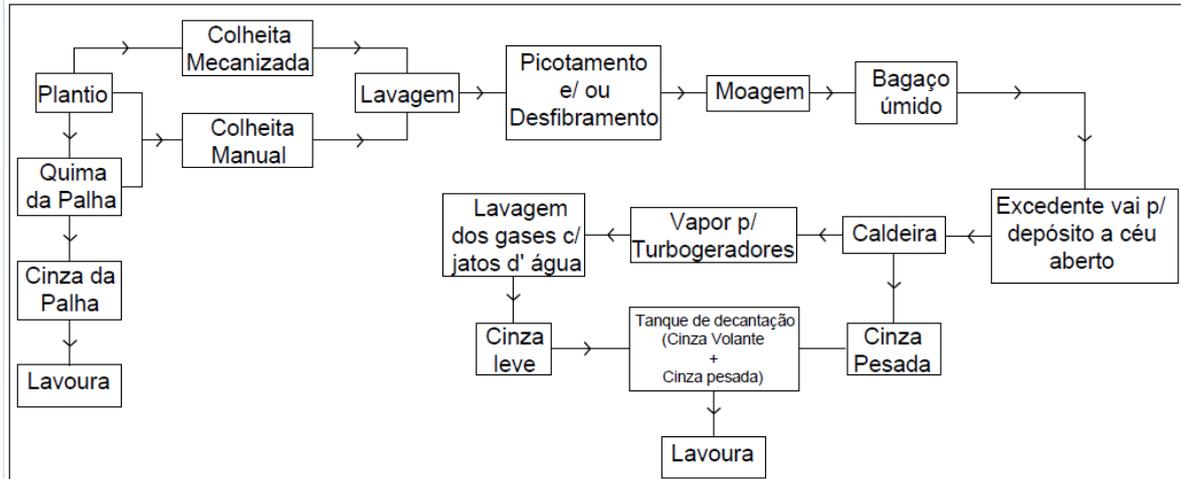


Figura 11 – Fluxograma do processo para geração da CBC.

Fonte: adaptado de NUNES, 2009.

Estudo realizado por CORDEIRO (2006) comprova que quando existe beneficiamento como moagem e tratamento térmico da CBC, melhoram-se as atividades físicas e químicas do material. Diversos tempos de moagem foram avaliados, variando de 8 min a 240 min, obtendo melhor eficiência de atividade pozolânica com tempo de moagem de 120 min. A requeima também foi avaliada com diferentes temperaturas, variando de 400 °C a 900 °C, onde definiu-se como melhor temperatura 500 °C. Os ensaios de variação de condições experimentais de moagem e temperatura foram avaliados posteriormente pelo método de reatividade pozolânica (método Chapelle modificado).

A cinza proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar pode sofrer duas classificações, cinza pesada e cinza leve. A cinza pesada é proveniente do fundo de caldeira, onde suas propriedades tornam-se semelhantes às da areia natural, ou seja, elevada concentração de quartzo, baixo nível de pozolanicidade devido à queima não controlada e a exposição à alta temperatura (aproximadamente 700 °C). Já a cinza leve é arrastada pelo sistema de exaustão de gases e retirada pelo lavador de gases, desse modo, não ocorre a combustão completa, tendo maior teor de matéria orgânica e apresenta-se no estado amorfo, aumentando assim a probabilidade do efeito pozolânico (HERNÁNDEZ *et al.*, 1998).

A Figura 12 mostra CBC com diferentes tempos de queima e/ou tempo de exposição ao calor, onde pode-se observar a diferença de cor.



Figura 12 – Modificação da coloração conforme o tempo de queima nas caldeiras. Bagaço de cana-de-açúcar (a), cinza escura alto teor de carbono (b), cinza com menor teor de carbono (c) e cinza gerada após combustão completa (d).

Fonte: CORDEIRO, 2006.

Nos últimos anos, tem aumentado muito o número de estudos visando à redução da produção de clínquer pela indústria cimentícias, ou mesmo da substituição parcial do cimento por materiais cimentícios (SALES, 2010).

A CBC apresenta grande potencial para ser aplicada na construção civil como aditivo mineral, pois apresenta composição química rica em silício e outros elementos químicos. O Quadro 1 aborda alguns trabalhos que avaliaram a CBC em misturas cimentícias.

Quadro 1 – Trabalhos que avaliaram a CBC como substituta parcial do cimento Portland.

Referência	Objetivo	Resultados
Singh et al., (2000)	Estudaram a hidratação do cimento Portland e a resistência à compressão utilizando a CBC com diferentes valores de substituição 10, 20 e 30 %.	A CBC apresentou redução de permeabilidade e a mistura com 10 % de substituição atingiu resistência de 250 kN/cm ² , 30 % maior que a referência (175kN/cm ²), aos 28 dias.
Cordeiro, (2006)	Analisou a substituição parcial do cimento convencional e alto desempenho em até 20 % da massa de cimento Portland por aditivos minerais, CBC e cinza da casca de arroz.	Foi observado que a utilização de CBC feito em concreto convencional aos 28 dias não apresentou resultados satisfatório quando comparado com a referência, ou seja, todas as resistências das substituições foram abaixo da mesma. Quando o autor utilizou concreto de alto desempenho, teve destaque a mistura de 10 % de CBC com resistência de 61,56 Mpa aos 28 dias quando comparada com a referência (60,86 MPa). Viabilidade de substituição de até 20 % para a casca de arroz, tendo o valor de 32,64 MPa aos 28 dias contra 23,99 MPa da referência para concreto convencional. Para concreto de alto desempenho obteve 69,99 MPa aos 28 dias (casca de arroz 20 %) e 60,86 MPa de referência.
Paula et al., (2009)	Avaliaram o potencial da CBC em misturas cimentícias com substituições de até 30 % pelo cimento Portland.	O resultado indica a possibilidade de substituir até 20 % (47,8 MPa) sem perdas na resistência à compressão simples, referência (48,0 MPa). No entanto foi observado que as argamassas com maiores teores de cinza foram mais porosas e com maior absorção de água apresentou maior índice de porosidade.

Continuação

Sales et al., (2010)	Realizaram o estudo substituindo a CBC por diferentes tipos de cimento (CPV-ARI, CP III 40 RS e CP-II E32) e porcentagens de areia, 10, 15, 20, 30, 50 e 100 %.	O resultado do estudo indicou melhorias na resistência à compressão de 20 % (56 MPa) quando combinou-se a substituição do cimento CP-II E 32 com 50 % de substituição do agregado miúdo onde a mistura de referência apresentou (48 MPa).
Rukzon, S.; Chindapasirt, P. (2012)	Examinaram o uso da CBC como material pozolânico para produção de cimento de alta resistência inicial, onde substituíram 10%, 20% e 30% de CBC.	Obtiveram como resultado a substituição de 10 % de CBC com resistência à compressão simples superior a referência.
Câmara, (2015)	Avaliou misturas de concreto e argamassa com adição de CBC em diferentes proporções e tratamentos sendo moagem curta, moagem longa, e requeima da CBC em substituição do agregado miúdo.	Um dos resultados satisfatório para substituição de CBC (7,5 %) requeimada por agregado miúdo com aumento de 20% quando comparado com a referência.
Soares et al., (2016)	Estudaram o comportamento pozolânico da CBC, comparada com sílica amorfa e cristalina.	Obtiveram resultado satisfatório de substituição de 20% de CBC por constituintes de cimento. O hidróxido de cálcio hidratado foi formado em solução de cal. Sendo uma reação lenta e não consumiu todo o material.
Kazmi, et al., (2017)	Exploraram a possibilidade de substituir parcialmente o cimento por CBC em diferentes quantidades, 10%, 20%, 30% e 40%.	Chegaram à conclusão que a substituição por até 10 % de CBC aos 56 dias foi capaz de manter a resistência à compressão simples de 48,6 MPa, sendo equivalente à mistura de referência (48,8 MPa).
Jagadesh et al., (2018)	O estudo consiste em analisar a evolução das propriedades mecânicas do concreto em substituição parcial do cimento em até 30 % por CBC. Realizar processos de beneficiamento como moagem em moinho de bolas e requeima em forno tipo mufla para obter-se maior potencial de ativação do material.	O resultado que apresentou melhor desempenho foi com 10 % de substituição obtendo 27,8 % de aumento na resistência à compressão simples (23,24 MPa) comparado com a referência (18,19 MPa).

Pelo fato da construção civil consumir muitos tipos de matérias primas naturais, tais como, o agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedras, britas entre outros) e também produtos industrializados formados basicamente por misturas de matérias primas naturais, tal como o cimento, ele tem um grande potencial para diminuir os problemas de destinação final de resíduos de CBC. Isso pode ser feito substituindo-se parte do agregado miúdo ou parte do cimento, dando assim uma boa finalidade para o descarte do material residual (SALES, 2010; CÂMARA, 2015).

Para a utilização da CBC em estudos de misturas cimentícias, faz-se necessário padronizar as características através de processos de peneiramento, requieima, moagem entre outros métodos para que ambos os efeitos, fíler e/ou pozolano, possam ser avaliados em misturas cimentícias.

3.9 VIDRO

O vidro é um material utilizado há muito tempo. Há relatos que no antigo Egito, 5000 A.C., era utilizado como forma de espelho. O vidro pode ser fabricado pela fusão de uma mistura de sílica (óxido de silício, SiO_2), barrilha (carbonato de sódio, Na_2CO_3), dolomita (carbonato de cálcio e magnésio, $(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e carbonato de cálcio (CaCO_3) em alta temperatura ($1600\text{ }^\circ\text{C}$), para que ocorra a fusão dos componentes (ARAUJO, 1997).

O primeiro registro com produtos de vidro no Brasil foi em 1624, em Olímpia e Recife (PE), onde confeccionavam artefatos de vidro. Em 1812 na Bahia foi instalada uma fábrica onde se produzia vidros lisos, frascos, entre outros produtos. Foi a partir do século XX que a indústria de vidro desenvolveu-se com a utilização de fornos contínuos onde a capacidade calorífica era de melhor qualidade, conseguindo então uma produção em maior escala para a fabricação de vidro. No ano de 1974, foi instalada uma empresa francesa no Estado de São Paulo, chamada Cebrace, tornando-se a primeira indústria brasileira a produzir vidros *float* em grande escala. A Figura 13 ilustra a empresa (CEBRACE, 2018).



Figura 13 – Primeira indústria brasileira de vidros *float*, Cebrace, 1982 (a) e 2018 (b).
Fonte: CEBRACE, 2018.

De acordo com a *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 1349 “O vidro pode ser definido como um produto inorgânico sólido não cristalino que exhibe o fenômeno da transição vítrea”, esse fenômeno é observado no processo de preparação do vidro, onde a temperatura é um parâmetro importante a ser considerado.

Uma vez que o material no estado líquido decresce gradativamente a temperatura, chega-se ao estado sólido. Nesse momento, dois fenômenos podem acontecer, a cristalização do material, passando por uma descontinuidade no volume específico que geralmente está associada a uma contração, ou passa a um estado líquido super-resfriado onde mantém a mesma taxa de contração no volume do líquido inicial.

Atualmente diferentes tipos de vidro são produzidos, dependendo da composição química e dos aditivos utilizados. A Tabela 5 mostra os tipos de vidro e sua utilização.

Tabela 5 – Composição do vidro e sua utilização.

Vidro	Utilização
Soda – Cal	Copos, pratos, chapas, lâmpadas, fornos temperados;
Borosilicato	Aparelhos químicos, vedação farmacêutica e tungstênio;
Chumbo	Funis de TV a cores, tubos de neon, peças eletrônicas e lentes óticas densas;
Bário	Painel de TV a cores;
Aluminossilicato	Tubos de combustão, substratos de fibra de vidro e resistência.

Fonte: JANI E HOGGLAND, 2014.

O vidro, além de servir como recipiente para objetos e materiais, vem ganhando destaque cada vez mais em construções e decorações em consequência do emprego da alta tecnologia no seu processo de fabricação. O material auxilia no conforto térmico e acústico nas edificações, permitindo a passagem da luz natural para o ambiente e a barreira sólida para ondas sonoras (JANI e HOGGLAND, 2014).

Os vidros planos são fabricados em chapas, consumidos principalmente pela indústria automobilística, seguida pela construção civil, de acordo com a Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (ABRAVIDRO). A Abravidro realizou uma estimativa de consumo de vidros planos no ano de 2016 e obteve o valor estimado de 1,577 milhão de toneladas de vidro entre todas as suas classes. A Tabela 6 mostra as classes de vidros planos fabricados no Brasil.

Tabela 6 – Consumo estimado de vidro plano e suas classes (t/ano).

Ano	Temperado	Laminado	Tampo, Curvo etc	Espelhado	Insulado	Automotivo, comum e outros	Total
2016	547,79	145,53	69,49	122,84	6,51	685,60	1.577,7
%	34,70	9,20	4,40	7,80	0,4	43,50	100

Fonte: ABRAVIDRO, 2018.

Na engenharia, os vidros estão presentes em fachadas, coberturas, muros, vitrines, portas, guardas-corpos, janelas entre outros lugares, correspondendo ao consumo de aproximadamente 2/3 do mercado brasileiro, chamando a atenção das indústrias e dos órgãos representantes da indústria de vidro.

Dentre os tipos de vidro comercializados, vale destacar os vidros utilizados na engenharia com requisito de segurança onde respeitam tanto na fabricação quanto na execução estabelecido pela ABNT NBR 7199 “Projeto, execução e aplicação de vidros na construção civil, 1989”. O Quadro 2 mostra os tipos de vidros de segurança, suas características e aplicações.

Quadro 2 – Tipos de vidro utilizados na engenharia.

Vidro	Definição	Característica	Aplicação
Temperado	Processo de tratamento térmico a 700°C, caracterizando a têmpera.	<ul style="list-style-type: none"> • 5x mais resistente do que o vidro comum; • Suporta diferença de temperatura até 200°C; • Em caso de quebra, fragmenta-se em pequenos pedaços; • Pode ser utilizada como material estrutura. 	Guarda-corpos; Salas de banhos; Vitrines; Portas; Janelas; Coberturas; Muros; Divisórias.
Laminados	Composto por duas ou mais chapas de vidro, intercaladas com <i>Polivinil butiral (PVB)</i> para fazer a aderência entre as placas.	<ul style="list-style-type: none"> • Maior resistência a impacto; • Quando quebrados os fragmentos ficam presos na película de PVB; • Maior redução de ruídos devido ao PVB; • Maior filtração solar devido a película. 	Fachada; Guarda-Corpo; Coberturas; Portas; Janelas; Fachadas.
Blindado	Formado por diversas chapas de vidro, interligada com películas especiais.	<ul style="list-style-type: none"> • Produtos aplicados em blindagens opacas e transparentes; • Protege aos impactos produzidos por projéteis de armamento 	Guarita; Edificação; Comercial; Automotivo.

Fonte: ABRAVIDRO, 2018.

3.10 VIDRO TEMPERADO

Dentre os diversos segmentos de vidros industrializados, tem-se o vidro temperado, conhecido como vidro de segurança, devido à sua alta resistência mecânica a impactos e choques térmicos. O vidro temperado é produzido por um processo de têmpera térmica.

Esse processo é proveniente a alta taxa de aquecimento do vidro comum (650 °C) por determinado tempo, após o aquecimento é resfriado bruscamente fazendo então a caracterização da têmpera.

O processo de beneficiamento do vidro, de modo a torná-lo de fato um vidro temperado, inicia na etapa de corte, onde o vidro é cortado, passando para a etapa de lapidação, onde a peça terá os seus quatro lados desbastados, dando origem a um resíduo de pó de vidro disperso em água em água. A última etapa é a têmpera, onde todas as peças passam para serem enfim temperadas (FAN *et al.*, 2016; ABRAVIDRO, 2018).

No temperamento químico as chapas de vidro ganham resistência por meio do “choque” entre o óxido de sódio do vidro e o nitrato de potássio fundido no qual ele é imerso. Em ambos os processo de beneficiamento o vidro ganha várias vantagens quando comparado com o vidro comum, sendo aumento na resistência a choques mecânicos, elevada resistência a choques térmicos, melhora na resistência à torção, flexão e flambagem, e quando ocorre à quebra do vidro, são formados pequenos pedaços de estilhaços, diminuindo o risco de acidente.

3.11 PÓ DE VIDRO

O uso de materiais reciclados na construção civil está entre as opções mais atraentes nos dias atuais, devido à grande geração de resíduos desse tipo, os pesquisadores têm sido convidados a desenvolverem ideias para reutilizá-los e agregar valor a eles, evitando o simples descarte (SHI e ZHENH, 2007).

Muitos subprodutos industriais, por exemplo, cinza volante, sílica ativa e escória granulada de alto forno, foram padronizados como materiais complementares do cimento. Esses subprodutos incorporados ao cimento tradicionais nem sempre estão disponíveis em todas as regiões e custariam caro

transportá-los. Sendo assim, o desenvolvimento de produtos alternativos locais é de grande importância (ORMAN e HAMOU, 2016).

A aplicação do PDV vem sendo estudada em diferentes produtos, uma vez que o vidro torna-se resíduo descartado em aterros sanitários, o que é insustentável, pois ele não se decompõe no meio ambiente. O vidro é composto basicamente por sílica, barrilha e calcário e devido à sua composição existe a possibilidade de reação com o cimento, fazendo que o uso de resíduos de vidro moído no concreto como substituto parcial do cimento seja uma possibilidade para o seu destino, sendo um passo importante para o desenvolvimento de sistemas de infraestrutura sustentáveis (ISLAM *et al.*, 2017).

Uma maneira de conseguir PDV sem grandes processos de moagem é no processo de corte de vidros planos, lapidação e furos, devido ao atrito entre a peça de vidro e a máquina de corte gerando grandes quantidades de resíduo de vidro.

Atualmente, o PDV gerado a partir do processo de lapidação, furos etc, tem sido descartado pelas empresas após um pequeno processo de tratamento, para dar a destinação atualmente considerada a mais adequada. Esse tratamento ocorre da seguinte forma: a água utilizada na lapidação e furação misturada com o PDV é destinada a tanques decantadores, onde aplicam-se coagulantes e floculantes para acelerar o processo de decantação, após a decantação inicia-se a retirada do PDV enquanto a água é filtrada para ser reutilizada no processamento de corte e polimento do vidro. Por fim, a massa de PDV deve secar antes de ser embalada para o descarte (ABRAVIDRO, 2018).

O processo de moagem para obtenção de PDV de materiais reciclados é uma operação muito comum realizada pelos pesquisadores, na qual utiliza-se, na maioria das vezes, moinhos de bolas, para alcançar a granulometria adequada (Liu *et al.*, 2016; ISLAM *et al.*, 2016). A Figura 14 mostra o tamanho das partículas geradas a partir do processo de moagem de vidros residuais, obtendo granulometria inferior a 75 µm para ser utilizada em mistura cimentícia substituindo o cimento.

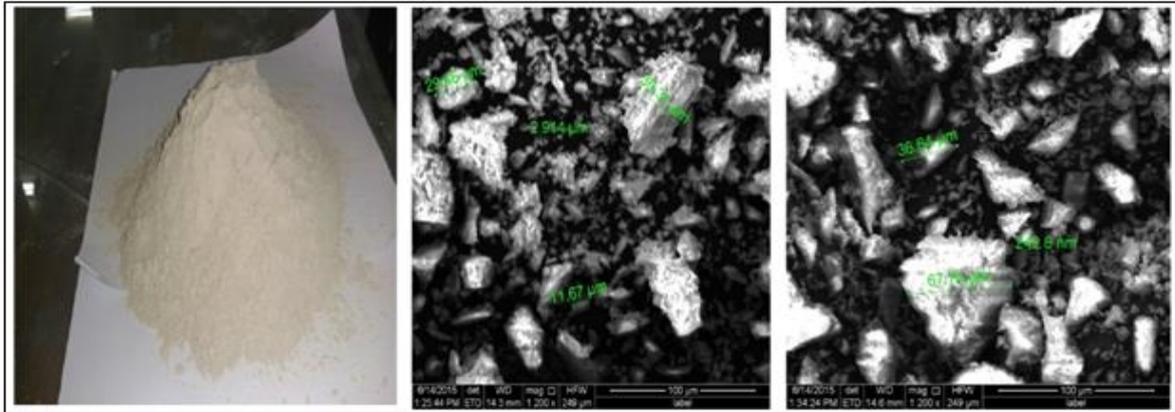


Figura 14 – Tamanho dos grãos do PDV.
Fonte: ALIABDO *et al.*, 2016.

A utilização de diferentes tipos de vidro tem grande potencial para ser aplicado com misturas cimentícias, devido à sua composição química rica em silício e cálcio. O Quadro 3 mostra trabalhos que abordaram vidros com diferentes composições químicas e granulometrias sendo utilizado em misturas cimentícias.

Quadro 3 – Trabalhos que utilizaram diferentes tipos de vidro como substituição parcial do cimento Portland.

Referência	Objetivo	Resultados
Shao et al., (2000)	Estudaram a possibilidade de utilizar resíduo de vidro finamente moídos em substituição parcial do cimento.	Partículas com diâmetro inferior a 38 µm, possibilitando efeito pozolânico (108 %) e aumento da resistência à compressão em 20 % (25,2 MPa) quando comparada com a referência (23 MPa).
Simões et al., (2013)	Reciclar vidros de para-brisa automotivos em mistura cimentícias, caracterizando o resíduo de vidro em granulometria inferior a 75 µm, e fazendo análises químicas como FRX, DRX.	Foram obtidos valores excedentes para perda ao fogo e álcalis disponível em Na ₂ O seguindo a NBR 12653. Isso pode ocasionar expansão no concreto, porém, o consumo do álcali na formação do C-S-H durante a reação pozolânica antecede a reação conhecida como álcali-sílica.
Aliabdo et al., (2016)	Substituir 5, 10, 15, 20 e 25 % de PDV em misturas cimentícias com intuito de melhorar a resistência a compressão.	O resultado mostrou melhoria na resistência à compressão simples aos 28 dias (46,45 MPa), substituindo até 10 % de cimento, quando comparado com a mistura de referência (44,32 MPa).
Islam e kazi, (2017)	Avaliaram a substituição parcial do cimento por PDV em diferentes teores, 10, 15, 20 e 25 %.	Nenhuma das misturas foi superior ao traço de referência aos 28 dias. Aos 90 dias a substituição por PDV 10, 15 e 20 % obteve resistência superior a mistura de referência (47 MPa), tendo valores próximos de 54, 51, 48 MPa.
Siad et al., (2016)	Investigaram os efeitos da incorporação do PDV com substituto do cimento na resistência da argamassa contra o ataque a ácido sulfúrico.	O estudo avaliou diferentes teores de substituição, 15, 30 e 45 % nos quais a resistência à compressão simples aos 28 dias para as misturas não foi superior à referência.
Liu et al, (2016)	Estudaram o efeito do tempo de moagem em garrafas de vidro, com auxílio da equação cinética Divas-Aliavden e modelo de distribuição Swrebec.	Após 120 min de moagem obteve-se 26,31% de material de granulometria < 3 µm, o qual alcançou, após 90 dias de concretagem, 41,3 MPa de resistência à compressão simples, inferior à referência (61,43 MPa).

Apesar do grande número de trabalhos científicos, há dúvidas relativas aos efeitos da incorporação de resíduos de vidro em misturas cimentícias. Quando ocorre a reação alcalina-sílica, geralmente associada a partículas grosseiras (150 μm a 1 mm), pode ocasionar a expansão do concreto implicando em perda da resistência à compressão. No entanto, quando utilizadas partículas de vidro menores que 150 μm , aumenta-se a probabilidade do material apresentar atividade pozolânica (IDIR *et al.*, 2011; BIGNOZZI *et al.*, 2015).

3.12 POZOLANA

De acordo com a ABNT NBR 12653 (2012), materiais pozolânicos (ou pozolana) são aqueles que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, no entanto quando estão na forma de partículas finas e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, formando assim compostos com propriedades cimentícias. Os materiais pozolânicos podem ter origem natural, artificial, argila calcinada, cinzas volantes e outros materiais. A Tabela 7 apresenta as propriedades químicas e físicas necessárias para a classificação dos tipos de pozolanas, sendo elas: Classe N, pozolanas naturais e artificiais; Classe C, cinzas volantes e materiais resultantes da queima do carvão e Classe E, aquelas que não pertencem nem a classe N e C.

Tabela 7 - Exigências físicas e químicas estabelecida pela ABNT NBR 12653 (2012).

Exigências Físicas	Classe de material		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 µm (% , máx)	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
Com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle (% , mín)	75	75	75
Com cal aos 7 dias (MPa, mín)	6,0	6,0	6,0
Água requerida (% , máx)	115	110	110
Exigências Químicas			
SiO ₂ + Al ₃ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , (% , mín)	70	50	50
SO ₃ , (% , máx)	4	5	5
Teor de umidade, (% , máx)	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, (% , máx)	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, (% , máx)	1,5	1,5	1,5

Fonte: Adaptado NBR 12653 (2012).

As principais fases ativas das pozolanas são a sílica (SiO₂) e a alumina (Al₂O₃), ambas na forma amorfa, ou seja, estruturas formadas por átomos com orientação somente à curta distância. As sílicas são formadas por cátions Si⁺⁴ ligados a ânions de O²⁻. Seus grupos são tetraédricos conectados pelos vértices, sendo que a diferença entre estruturas cristalinas e amorfas não está nas unidades poliédricas, mas na sua orientação. A Figura 15 representa a diferença entre as estruturas cristalinas formadas por átomos a longa distância e amorfas onde os átomos ocorrem a curta distância (SOARES *et al.*, 2016).

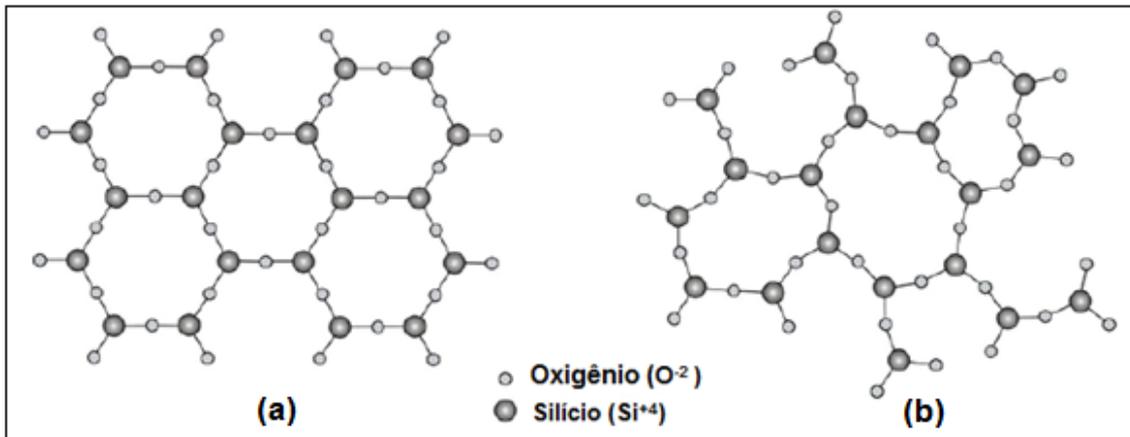


Figura 15 - Estrutura da sílica cristalina (a), estrutura da sílica amorfa (b).

Fonte: Adaptado, VAN VLACK, 1984.

De acordo com a definição de Massazza (1998), a atividade pozolânica assimila as reações que envolvem os elementos ativos das pozolana, hidróxido de cálcio e água.

A atividade pozolânica abrange dois parâmetros principais: a quantidade máxima de hidróxido de cálcio que pode reagir com a pozolana e a taxa com que tal combinação se processa. Ambos os fatores dependem da natureza da pozolana e mais precisamente, da qualidade e quantidade de fases ativas presentes. A combinação Ca(OH)_2 – pozolana em presença de água varia com os seguintes fatores:

- Natureza das fases ativas da pozolana;
- Conteúdo de pozolana na mistura;
- Teor de SiO_2 ;
- Razão Ca(OH)_2 / pozolana na mistura.

Da mesma forma, a velocidade de reação é função da:

- Superfície específica da pozolana;
- Relação sólido-água na mistura;
- Temperatura.

O efeito pozolânico começa a acontecer entre 7^o e 15^o dia de mistura, quando a hidratação do cimento está em estado avançado. As reações do clínquer e da pozolana após essa idade pode ser investigada separadamente, sendo consideradas as influências mútuas dos dois processos. Os produtos de hidratação

de um sistema cal / adição são bastante similares à hidratação do cimento Portland, tendo pequenas variações nas quantidades do que na natureza das fases (MASSAZZA, 1998).

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Coleta da CBC e características da usina

A usina sucroalcooleira escolhida para a coleta dos materiais está localizada na região Noroeste do Paraná, município de Umuarama-PR, sendo bastante representativa, por figurar entre as maiores usinas sucroalcooleiras do Estado, Figura 16.



Figura 16 – Usina sucroalcooleira de Umuarama-PR.

Fonte: Google Maps, 2017.

A usina tem uma produção anual de 720.000 toneladas de cana-de-açúcar, gerando aproximadamente 201.600 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar anualmente, tendo uma capacidade real de queima de 54 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar por hora. Isso é suficiente para gerar, aproximadamente, 90 toneladas de cinza por dia. As amostras de CBC foram gentilmente cedidas pela empresa e coletadas diretamente da esteira do lavador de gases, conforme indicado na Figura 17.



Figura 17 – Lavador de gases (a) e esteira do lavador de gases (b), Usina sucroalcooleira Umuarama – PR.

Fonte: Autoria própria.

A CBC foi coletada manualmente e acondicionada em baldes plásticos (polipropileno) de 50 L, levada para o laboratório e submetida aos ensaios. O aspecto da CBC seca é mostrado na Figura 18.



Figura 18 – Aspecto da CBC seca.

Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Coleta do PDV e características da empresa

O resíduo de pó de vidro, PDV, utilizado neste trabalho foi fornecido pela empresa de Vidros Temperados, localizada no setor industrial da cidade de Apucarana-PR, a Figura 19 fornece imagens da empresa.



Figura 19 – Empresa de vidro Apucarana - PR.
Fonte: Google Maps, 2017.

O resíduo gerado é proveniente do corte de placas de vidro temperado, que são dimensionadas de acordo com o solicitado pelo cliente. O PDV proveniente do corte é conduzido por uma canaleta, com o auxílio de fluxo de água, até o setor de tratamento de efluentes da empresa onde recebe a adição de um polímero catiônico para densificação e decantação (Figura 20). A seguir, o resíduo é enviado para uma empresa especializada em destinação de resíduos químicos. A coleta foi realizada antes da etapa de adição do polímero para manter suas características originais.



Figura 20 – Coleta do resíduo de PDV na empresta de vidro, Apucarana –PR.
Fonte: Autoria própria.

A empresa de vidro processa aproximadamente 1000 m² de vidro por mês, gerando aproximadamente 15 toneladas de resíduo de PDV mensalmente. As amostras foram acondicionadas em frascos plásticos com tampa e encaminhadas para o laboratório.

4.1.3 Aglomerante

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI da marca Cauê, sem adições, exceto o gesso, para melhor explorar os efeitos da adição de CBC e PDV nas misturas cimentícias. A Tabela 8 mostra a composição do cimento utilizado.

Tabela 8 – Composição do cimento Portland CPV-ARI.

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% massa)		Norma Brasileira
Alta resistência Inicial	CPV-ARI	Clínquer + Gesso	Material Carbonático	-
		100-95	0-5	NBR 5733

Fonte: ABCP (2002).

O cimento empregado possui características específicas, diferenciando-o de outros tipos de cimento. A Tabela 9 mostra as propriedades do aglomerante. O cimento foi adquirido no varejo e armazenado em condições adequadas.

Tabela 9 – Características do cimento CPV-ARI.

Itens de controle	Unidade	Dados do Fabricante	NBR 573
Início de pega	Min	231	≥ 60
Fim de pega	Min	296	≤ 600
Resistência compressão 24 h	MPa	22	≥ 14
Resistência compressão 3 dias	MPa	36	≥ 24
Resistência compressão 7 dias	MPa	45	≥ 34
Blaine	cm ² /g	4.743	≥ 3000

Fonte: InterCement, 2017.

4.1.4 Coleta do agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural quartzosa. A areia foi submetida a análise de composição granulométrica, conforme ABNT NBR NM 248:2003, massa específica ABNT NBR NM 52:2009 e massa unitária ABNT NBR NM 45:2006, tendo sua granulometria classificada de acordo com a ABNT NBR 7211:2005, Tabela 10. A Figura 21 apresenta o aspecto do agregado.

Tabela 10 – Classificação do agregado de acordo com as frações granulométricas.

Material retido entre as peneiras de abertura nominal de	Denominação
2,4 mm e 1,2 mm	Areia Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	Média grossa
0,6 mm e 0,3 mm	Média fina
0,3 mm e 0,15 mm	Fina

Fonte: NBR 7211:2005.



Figura 21 – Aspecto do agregado miúdo.
Fonte: Autoria própria.

4.1.5 Coleta da água

Toda a água utilizada para a confecção dos corpos de prova nesse trabalho é proveniente da companhia de abastecimento hídrico da cidade de Umuarama-PR, SANEPAR.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios de caracterização descritos a seguir foram realizados sobre as matérias-primas, bem como sobre os materiais obtidos a partir da proposta do projeto. Foram realizados ensaios físico-químicos e mecânicos integralmente na Universidade Paranaense - UNIPAR, a qual gentilmente cedeu o espaço e a supervisão do técnico de laboratório. A caracterização estrutural e composicional foi realizada em universidades com grupos de pesquisa parceiros, os quais serão citados de acordo com a técnica utilizada.

4.2.1 Caracterização físico-química do agregado miúdo

A areia utilizada para a confecção dos corpos de prova foi caracterizada de acordo com os ensaios descritos nas seguintes normas:

ABNT NBR NM 45:2006 “Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios”;

ABNT NBR NM 52:2009 “Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente”;

ABNT NBR NM 248:2003 “Agregados – Determinação da composição granulométrica”.

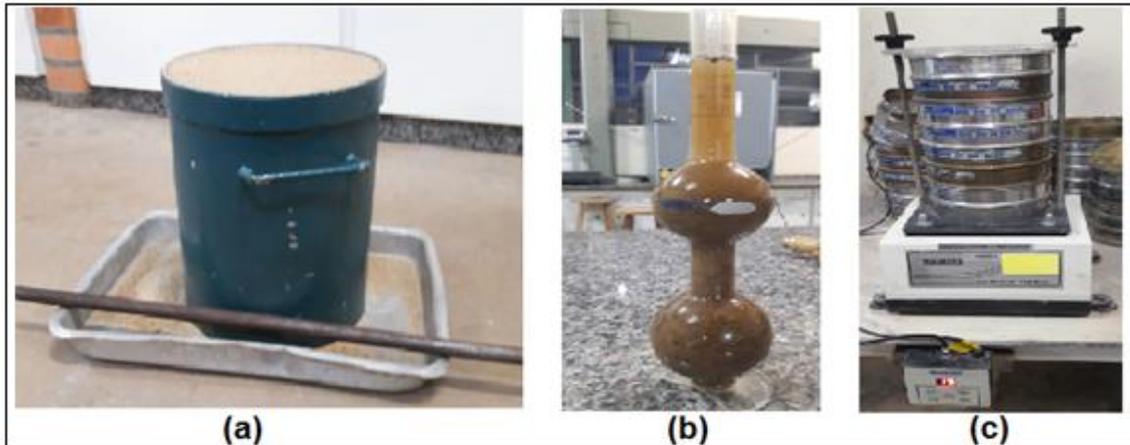


Figura 22 - Caracterização do agregado miúdo: massa unitária no estado solto (a); massa específica aparente (b); ensaio granulométrico (c).

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.2 Caracterização físico-química da CBC e do PDV

Neste tópico serão apresentadas as metodologias dos ensaios utilizados para caracterização da cinza leve do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) e do resíduo de pó de vidro (PDV).

4.2.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica da CBC foi realizada de acordo com a ABNT NBR 7181:1988, “Solo - Análise granulométrica”, por meio de sedimentação e peneiramento (Figura 23).

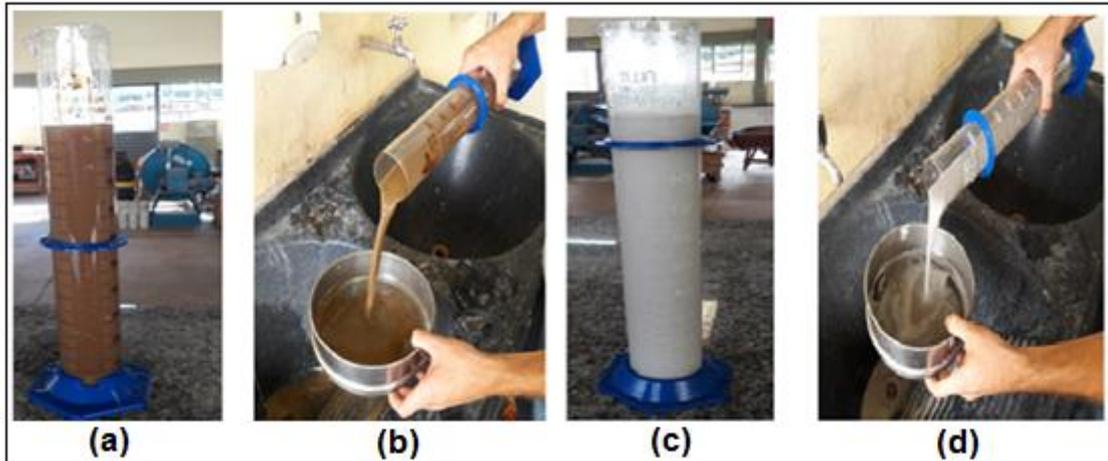


Figura 23 - Análise granulométrica por sedimentação para CBC (a, b) e PDV (c, d).
Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.2.2 Massa específica

O ensaio de massa específica da CBC e do PDV foi realizado conforme ABNT NBR NM 23:2001, “Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica”. Os resultados foram obtidos por meio da Equação 4.

$$p = \frac{M}{V} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

M: Massa do material (g)

V: Volume deslocado pela massa do material (cm³)

Os itens utilizados para o ensaio foram: frasco volumétrico Le Chatelier, balança, funil de gargalo longo e querosene. A Figura 24 ilustra os ensaios para determinação da massa específica através do frasco volumétrico de Le Chatelier.

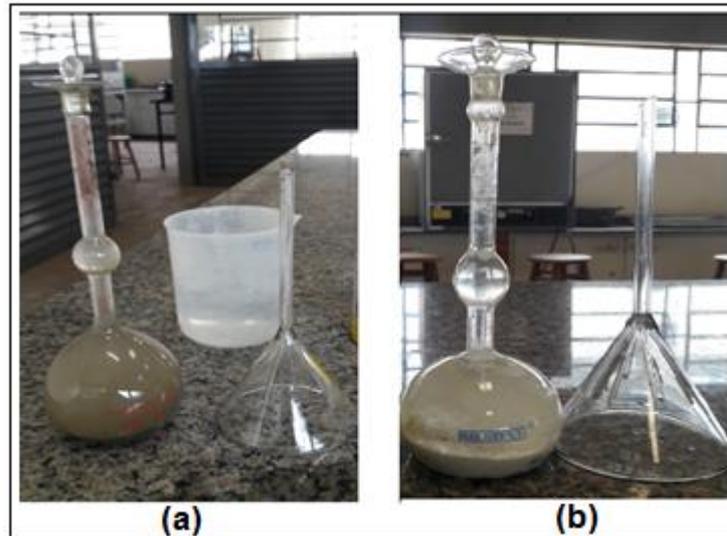


Figura 24 – Ensaio de massa específica utilizando o frasco de Le Chatelier para a CBC (a) e PDV (b).

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.2.3 Teor de umidade

Para determinar o teor de umidade da CBC e do PDV foi utilizado a NBR NM 24:2002, “Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade”, e os seguintes procedimentos foram empregados:

- Pesou-se, aproximadamente, 1 g de amostra *in natura* em um cadinho previamente tarado, em seguida, colocou-se o cadinho com a amostra na estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por, no mínimo, 30 min. Resfriou-se à temperatura ambiente no dessecador e, ao final, pesou-se o conjunto.

O teor de umidade foi obtido pela Equação 5.

$$U = \left(\frac{M1 - M2}{M1} \right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

M1: massa da amostra úmida (g)

M2: massa da amostra seca (g)

Sendo que a média dos resultados variou em mais do que 0,20 %, como determinada a norma.

Para a determinação do teor de umidade utilizou-se estufa com capacidade para manter a temperatura constante em $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. O dessecador foi utilizado para o resfriamento da amostra sem absorção de umidade. A Figura 25 mostra a estufa e o dessecador.

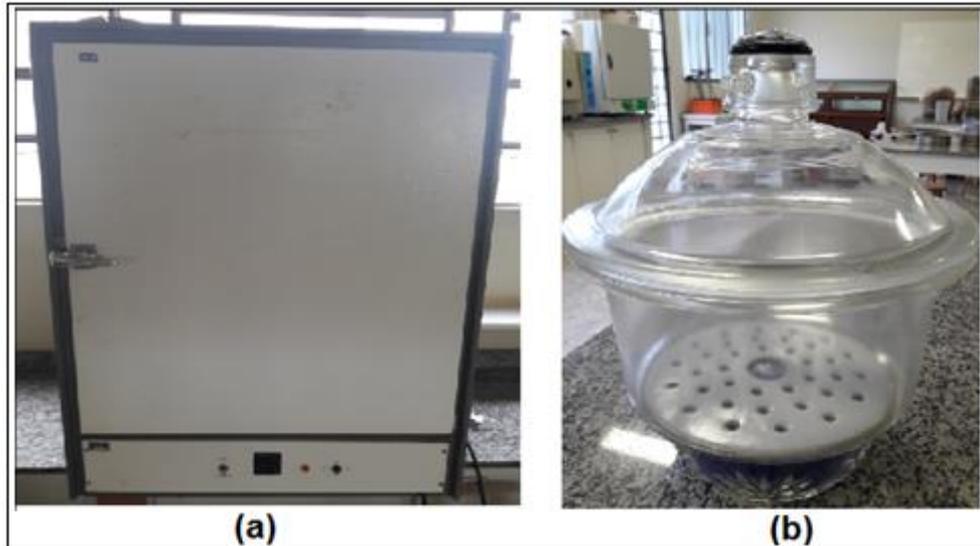


Figura 25 - Estufa (a) e dessecador (b) para análise de teor de umidade.
Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.2.4 Matéria orgânica e carbono orgânico

Para a determinação do teor de matéria orgânica e carbono orgânico realiza-se o ensaio conforme a ABNT NBR 13600:1996, “Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C ” seguindo os procedimentos:

- Transferiu-se, aproximadamente, 50 g da amostra *in natura* para um cadinho previamente tarado e, em seguida, secou-se em estufa à temperatura de $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 h. Então, resfriou-se à temperatura ambiente no dessecador, tratou-se na mufla por 12 h com temperatura controlada de $440 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Após resfriamento em cadinho, pesou-se o conjunto.

O resultado do cálculo realizado conforme a Equação 6 corresponde ao teor de matéria orgânica. A determinação do teor de carbono é obtido pela Equação 7.

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

A: massa da amostra seca em estufa (g);

B: massa da amostra queimada em mufla (g).

$$C (\%) = \frac{MO(\%)}{1,8} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

C: carbono orgânico (%);

MO: matéria orgânica total (%).

4.2.2.5 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo foi realizado de acordo com a ABNT NM 18:2012, “Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo” que estabelece os seguintes procedimentos, após a amostra seca:

- Transferiu-se $1 \pm 0,001$ g de amostra seca para um cadinho previamente tarado, em seguida calcinou-se em forno tipo mufla à temperatura de 950 ± 50 °C com tempo mínimo de 50 min. Resfriou-se à temperatura ambiente no dessecador e, ao final, pesou-se o conjunto.

A perda ao fogo pode ser medida por meio da Equação 8, sendo que a média não deve variar mais que 0,23 %.

$$PF = \left(\frac{M1-M2}{M} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

M1: a soma da tara do cadinho com a massa da amostra ensaiada (g);

M2: a soma da tara do cadinho com a massa da amostra após a calcinação (g);

M: massa da amostra utilizada no ensaio (g).

4.2.3 Beneficiamento do material

Os resíduos industriais, CBC e PDV, passaram pelos processos de beneficiamento de queima e moagem.

O processo de moagem foi realizado em moinho de bolas de própria fabricação, com intuito de reduzir a granulometria do material, facilitando a seletividade das amostras ($\geq 75 \mu\text{m}$). O moinho utilizado consistiu em um motor estacionário com capacidade de rotação de 3500 rpm com capacidade de carga de 500 g. Foi realizado pré-teste para identificar o tempo necessário para alcançar a granulometria desejada. Vale destacar que a capacidade de moagem do moinho torna-se inferior aos moinhos convencionais devido à proporcionalidade de tamanho e potencial das bolas moedoras. A Figura 26 ilustra o moinho de bolas.



Figura 26 – Moinho de bolas.

Fonte: Autoria própria, 2017.

Foi realizado queima do material no forno mufla, em dois patamares, o primeiro com temperatura de 350 °C por 3 h, mais a 600 °C por 3h, com intuito de eliminar compostos orgânicos e melhorar a atividade pozolânica do material.

4.2.4 Definição do traço e moldagens dos corpos de prova

Nessa etapa do estudo experimental, a CBC e o PDV foram testados em misturas de argamassa. Uma mistura denominada “referência” foi produzida, sem adição de CBC e PDV. A partir dessa mistura, foram produzidas argamassas em

substituição parcial do cimento Portland. Todos os corpos de prova foram produzidos na proporção de 1:3 em massa (1 parte de cimento e 3 de areia) com fator água cimento (A/C) de 0,52 (0,52 kg de água para cada 1 kg de cimento), seguindo a mesma proporção do traço para as demais misturas.

Vale destacar que a relação de água por corpos de prova permaneceu constante em prol da plasticidade no estado fresco. Portanto, a relação água e cimento mais substituições manteve-se constante em relação à quantidade de cimento puro e cimento com adições. Nas combinações contendo CBC e/ou PDV, o cimento foi substituído parcialmente pelos resíduos em diferentes proporções, incluindo (i) o uso de uma referência, (ii) apenas um dos resíduos ou (iii) combinações com os dois resíduos ao mesmo tempo. A Tabela 11 representa as combinações realizadas neste estudo.

Tabela 11 – Combinações de traços utilizados nas misturas de argamassa (kg).

Traço							
Material utilizado (kg)							
Traço	Combinação	Cimento	Cinza	Vidro	Areia [*]	Água [†]	A/C [‡]
1	Referência	2,547	-	-			0,52
2	Cinza 10%	2,292	0,255	-			0,57
3	Cinza 20%	2,038	0,509	-			0,64
4	Vidro 10%	2,292	-	0,255	7,641	1,324	0,57
5	Vidro 20%	2,038	-	0,509			0,64
6	Vidro 30%	1,783	-	0,764			0,74
7	Vidro 5% / Cinza 5%	2,292	0,127	0,127			0,57
8	Vidro 10% / Cinza 10%	2,038	0,254	0,254			0,64

^{*}, [†] Proporções fixas de areia e água; [‡] A/C proporção água/cimento.

A confecção dos corpos de prova foi realizada em uma betoneira de capacidade para 120 L, a forma da inserção dos materiais foi mantida como a ABNT NBR 5738:2015 – “Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova”, recomenda. Foram confeccionados dois tipos de corpos de prova cilíndricos, um com dimensões de 5x10 cm para avaliar a resistência à compressão, e outro de 10x20 cm para realizar o ensaio de início e fim de pega para misturas que apresentaram o melhor desempenho em relação à resistência à compressão

simples. Foram elaborados no total 160 corpos de prova 5x10 cm com rompimento nas idades de 1, 3, 7, 28 e 60 dias, sendo 4 corpos de prova por idade e mais 5 corpos de prova para o teste de início e fim de pega.

Os corpos de prova que foram confeccionados para a realização do teste de resistência à compressão simples, foram desmoldados depois de aproximadamente 24 h e colocados para cura submersos em água saturada em hidróxido de cálcio, conforme especificações da ABNT NBR 5738:2015, até o dia do rompimento. A Figura 27 ilustra a betoneira que foi utilizada para realização da argamassa, e o tanque de armazenamento para realizar a cura.

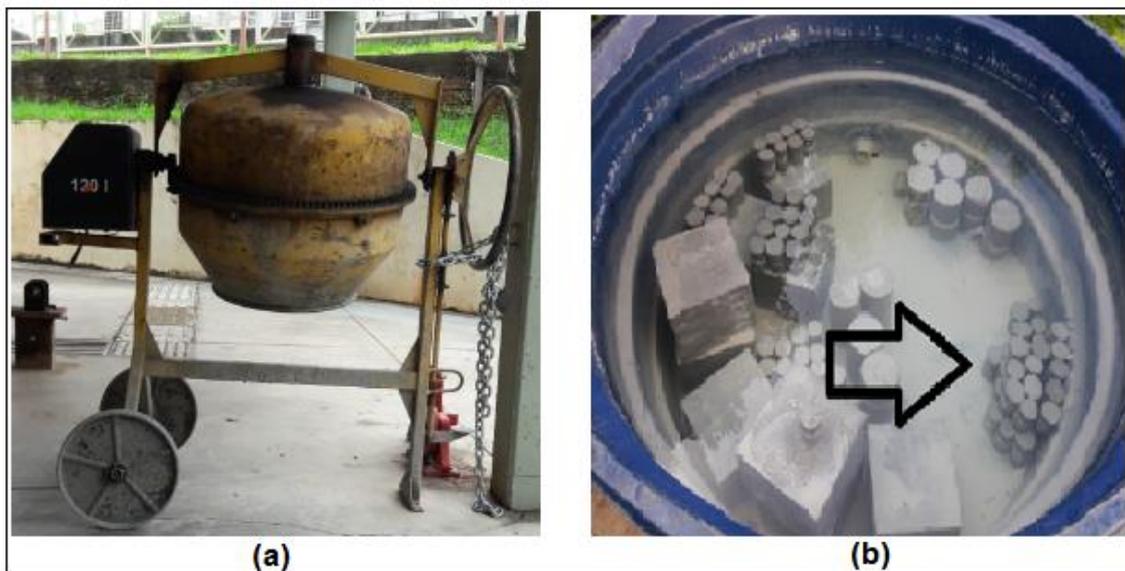


Figura 27 – Betoneira (a), tanque de armazenamento dos corpos de prova (b).
Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.5 Caracterização estrutural e composicional dos materiais utilizados

4.2.5.1 Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica que permite conhecer a composição química qualitativa e semi-quantitativa de uma determinada amostra. Com o uso da FRX foi possível identificar os elementos presentes nas amostras dos materiais estudados e determinar suas respectivas proporções. Os resultados foram expressos na base óxido, ou seja, considerou-se os óxidos mais estáveis dos elementos presentes na amostra. A FRX da CBC e do PDV foi realizada no Laboratório de Raios X, localizado no Departamento de Física da

Universidade Federal do Ceará, utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X modelo ZSXMini II, da marca Rigaku. Vale destacar que as amostras enviadas para análise foram secas em estufas a 105 °C. A Figura 28 mostra o equipamento utilizado para a análise.

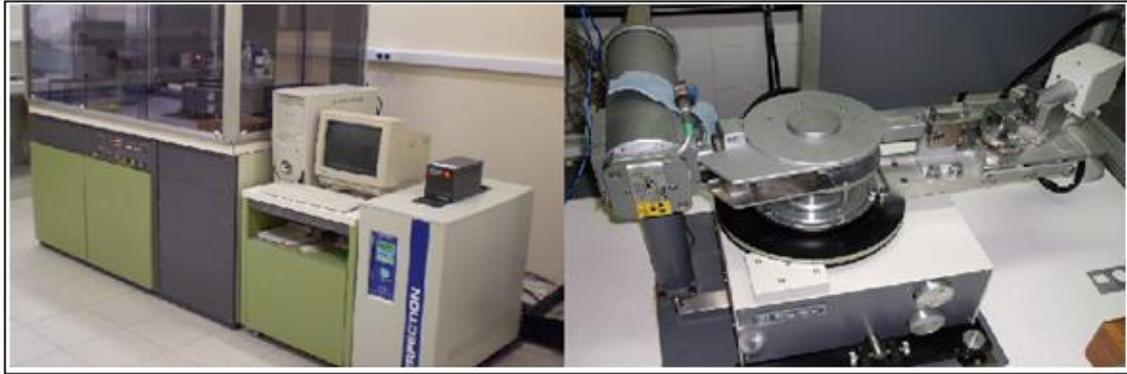


Figura 28 - Equipamento de fluorescência de raios X.
Fonte: www.raiosx.ufc.br, 2017.

4.2.5.2 Difração de raios X

O ensaio de difração de raios X analisa o nível de cristalinidade da amostra, permitindo a identificação de fases quanto ao seu arranjo atômico, classificando quando amorfa ou cristalina e, pode até ser utilizada para quantificar elementos de constituição desde que em faixa adequada de concentração. Os dados gerados podem ser comparados com um banco de dados específico, o que contribui para a caracterização da amostra. Isso é possível devido ao fato dos átomos organizarem-se em planos cristalinos, separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X, portanto quando um feixe de raios X incide sobre um material cristalino, outro feixe de raios é difratado, produzindo então a característica do elemento (CALLIGARIS *et al.*, 2015)

As análises foram realizadas na Universidade Estadual de Londrina, O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios X da marca Rigaku, modelo Ultima IV, operando a kV e 20 mA, com radiação de Cu K α ($\lambda = 0,154$ nm). A Figura 29 mostra o equipamento utilizado na pesquisa.

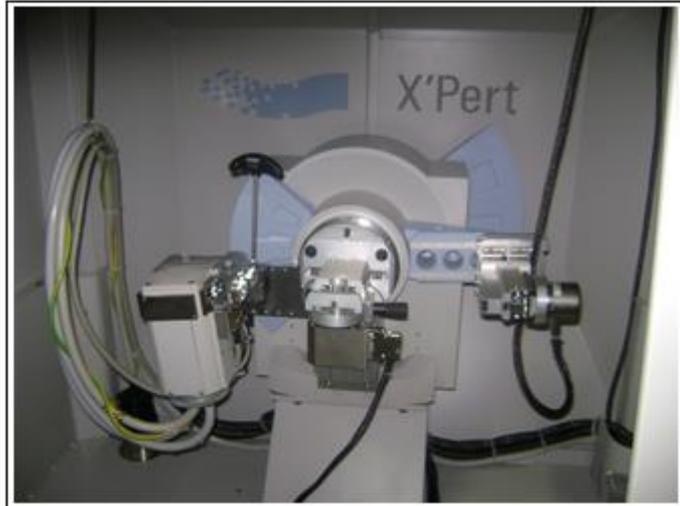


Figura 29- Equipamento de Difração de raios X.
Fonte: www.ltrx.uel.ning.com.

4.2.5.3 Adsorção-dessorção de nitrogênio

As propriedades texturais dos materiais foram determinadas por meio da isoterma de adsorção física de gás nitrogênio (N_2), com equipamento Quanta Chrome Model Nova 1200e e os dados obtidos foram determinados pelos métodos BJH (Barret-Joyner-Halenda) para volume de poro e multipontos BET (Brunauer-Emmett-Teller) para área específica. De acordo com a NBR NM 76 (2015), a superfície específica é definida como a área por unidade de massa, expressa em metros quadrados por grama. A Figura 30 mostra o equipamento que foi utilizado para o experimento.



Figura 30 – Equipamento de fisiossorção de nitrogênio.
Fonte: Laboratório de Química – UEL.

4.2.5.4 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) possui alta resolução e grande capacidade de foco. Consiste em emitir feixes de elétrons onde esses feixes são projetados na amostra formando diferentes sinais, como elétrons secundários e elétrons retroespalhados, dentre outros. O registro desses elétrons é capaz de formar a topografia da amostra identificando o tamanho, a forma e a textura superficial (SARKAR *et al.*, 2001). A morfologia dos materiais foi monitorada por meio da MEV em um equipamento TESCAN, modelo MIRA 3 LMU, Brno, Kohoutovice, República Checa. As análises foram realizadas na Universidade de Guadalajara, México, sob os cuidados do Prof. Dr. Gregorio Carbajal Arizaga Guadalupe. Foram analisadas as amostras de CBC e PDV em seu estado *in natura* e assim como nos fragmentos de argamassa resultante das amostras rompidas à compressão aos 28 dias. A Figura 31 mostra o equipamento utilizado.



Figura 31 – Microscópio eletrônico utilizado para análise por MEV.
Fonte: Universidade de Guadalajara, México.

4.2.5.5 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica foi utilizada para estabelecer a temperatura de requeima dos materiais. Essa técnica consiste em avaliar a variação da massa da amostra em função da temperatura, sendo caracterizada como um ensaio destrutivo. A importância desse ensaio é devido à necessidade de referência de controle de queima de acordo com a temperatura máxima suportada pelo material até sua perda total de massa. Com a ATG pode-se definir patamares de queima e temperatura final, possibilitando o melhor controle de queima conforme o tipo de amostra, visando a um melhor potencial de efeito pozolânico. A Figura 32 mostra o equipamento.

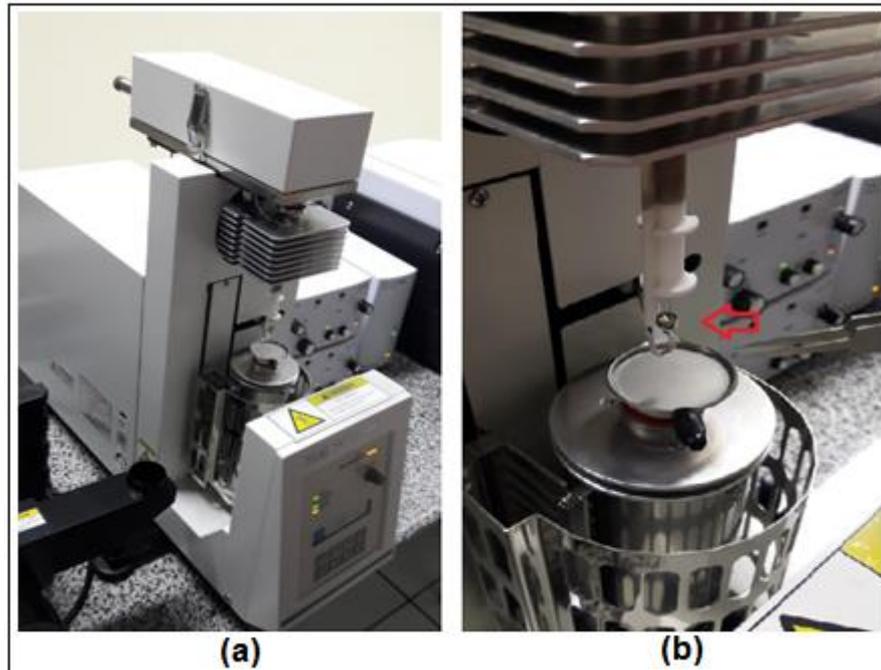


Figura 32 – Equipamento de análise termogravimétrica (a);
Material analisado na bandeja da microbalança (b).
Fonte: Aparelho analisador termogravimétrico UTFPR – Apucarana – PR.

4.2.6 Avaliação do desempenho da argamassa

4.2.6.1 Índice de atividade pozolânica com o cimento Portland

O ensaio foi realizado segundo a ABNT NBR 5752:1992, “Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento”, o qual é calculado por meio da relação entre a resistência à compressão de argamassa produzida com misturas do material suposto pozolânico e cimento Portland e outra argamassa apenas com o cimento (Equação 9).

$$IAP = \frac{F_{cb}}{F_{ca}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

IAP: Índice de atividade pozolânica;

fca: resistência média à compressão, aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento Portland e material pozolânico;

fc_b: resistência média à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados somente com cimento Portland.

Outro parâmetro avaliado foi a determinação da água requerida para a argamassa, sendo que mesma deve ter um índice de consistência de 225 ± 5 mm. De acordo com a ABNT NBR 7215:1997, o material testado aos 28 dias deve ter resistência à compressão simples mínima de 75 % da argamassa sem o material pozolânico. Esta norma também determina um valor máximo de água requerida de 115 % para classe N e de 110 % para as classes C e E.

A determinação da quantidade de água requerida é expressa na Equação 10.

$$AR = \frac{B}{A} \cdot 100 \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: A e B são as quantidades de água para obtenção dos índices de consistência de 225 ± 5 mm para as argamassas A e B, respectivamente.

Após a moldagem dos corpos de prova, a cura foi realizada durante as primeiras (24 ± 2) h nos próprios moldes e permaneceram em câmara úmida à temperatura de (23 ± 2) °C; em seguida, desmoldou-se e armazenou-se os corpos de prova em recipiente protegido da perda de umidade, à temperatura de (38 ± 2) °C, durante 27 dias. Para o ensaio de ruptura à compressão, os corpos de prova foram deixados à temperatura ambiente para estabilização térmica. A Figura 33 representa o ensaio do índice de consistência realizado com a CBC e o cimento para determinar a água requerida.



Figura 33 – Determinação da água requerida para o ensaio da NBR 5752:1992.

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.6.2 Índice de atividade pozolânica com cal

De acordo com a ABNT NBR 5751:2012, “Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal”. O índice de atividade pozolânica é obtido a partir do valor médio de resistência à compressão aos 7 dias de uma argamassa composta de uma parte em massa de hidróxido de cálcio, nove partes de areia normalizada e mais uma determinada quantidade de material pozolânico, correspondendo ao dobro do volume de hidróxido de cálcio (traço 1:9:2). A quantidade de água da mistura deve ser suficiente para a obtenção de índice de consistência de 225 ± 5 mm, obtida no ensaio de consistência (NBR 7215:1997) Figura 34. A cura durante as primeiras 24 h foi realizada à temperatura de 23 ± 2 °C. Durante os 6 dias posteriores os corpos de prova foram mantidos à temperatura de 55 ± 2 °C dentro das próprias formas protegidas da perda de umidade.



Figura 34 - Determinação da água requerida para o ensaio da NBR 5751:1992.

Fonte: Autoria própria, 2017.

Cada corpo de prova foi preenchido (5x10 cm) composta de 104 g hidróxido de cálcio, 234 g de cada uma das quatro frações de areia normal, totalizando 936 g e uma quantidade de material pozolânico, calculada da seguinte forma:

Massa de material pozolânico = $2 \times (\text{massa específica do material pozolânico dividido pela massa específica da cal}) \times 104$ g de material pozolânico.

A Figura 35 apresenta as porções que foram utilizadas para realizar o ensaio de índice de atividade pozolânica com cal.



Figura 35 - Material utilizado no ensaio de índice de atividade pozolânica com cal: CBC (a), PDV (b).

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.6.3 Consistência

A consistência das misturas de argamassa foi avaliada seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 13276:2005 – “Preparo da mistura e determinação do índice de consistência” e as medições de consistência das argamassas foram realizadas pelo ensaio (*flow table*),”. A Figura 36 mostra o aparelho utilizado.



Figura 36 - Mesa de consistência (*flow table*).
Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2.6.4 Avaliação do início e fim de pega com penetrômetro de Proctor

De acordo com a ASTM-C403 (2008), a pega é o momento em que a mistura de cimento ou argamassa passa do estado de escoamento líquido e começa a reagir formando um estado plástico. O método consiste em identificar o início de pega com a força aplicada na mistura ainda em estado fresco. Penetrômetro de Proctor é um equipamento que contém conjunto de agulhas de penetração ligada a um aparato de carregamento, como mostrado na Figura 37.



Figura 37 – Imagem ilustrando penetrômetro de Proctor.
Fonte: Autoria própria, 2018.

A agulha deve conter as seguintes áreas de rolamento: 645, 323, 161, 65, 32, e 16 mm². A haste da agulha deve ser graduada a cada 25 mm, a partir da área de rolamento. O aparelho de carregamento deve ser apto para medir a força requerida para causar penetração com a agulha. O dispositivo deve ser capaz de medir a força de penetração com uma precisão de ± 10 N e capacidade mínima de pelo menos 600 N.

A haste de carregamento deve ser de aço de 16 mm de diâmetro e cerca de 600 mm de comprimento, no formato cilíndrico reto, tendo a extremidade de calçamento ou ambas as extremidades arredondadas, com uma ponta hemisférica de diâmetro de 16 mm.

A norma ainda indica o início de testes utilizando Proctor em misturas convencionais de concreto a partir de um tempo de 3 a 4 h após o contato inicial entre cimento e água, sendo que os testes subsequentes devem ser feitos em intervalos de 1 h até iniciar a pega. Logo após a identificação, o tempo para nova leitura é de 30 min até a o fim da pega.

O início de pega é constatado quando a resistência à penetração for igual ou superior a 3,5 MPa e o final da pega quando a penetração indica uma resistência à penetração igual ou superior a 27,6 MPa. A Figura 38 ilustra os corpos de prova que foram realizados o teste.



Figura 38 – Ensaio pelo método penetrômetro de Proctor.
Fonte: Autoria própria, 2018.

4.2.6.5 Resistência à compressão

A resistência à compressão das misturas foi obtida de acordo com as ABNT NBR 5739:2007, “Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos” e ABNT NBR 7215:1997, “Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão”, com a utilização de corpos de prova cilíndricos 5x10 cm. Antes da ruptura, os corpos de prova foram capeados com enxofre fundido de forma a garantir a planicidade e o paralelismo entre o topo e a base.

Para a realização do ensaio de compressão simples dos corpos de prova foi utilizada prensa hidráulica da marca EDUTEC modelo Hidráulica Analógica Waw-1000D, aferida em 28/08/2017, com capacidade de rompimento de até 1000 kN. As Figuras 39 e 40 mostram os corpos de prova antes de serem capeados para o ensaio de resistência à compressão e prensa utilizada para o ensaio, respectivamente.



Figura 39– Corpos de prova.
Fonte: Autoria própria, 2017.



Figura 40 - Prensa hidráulica utilizada para rompimento dos corpos de prova.
Fonte: Autoria própria, 2017.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para cada ensaio serão apresentados a seguir de forma individualizada para caracterização e propriedades dos materiais estudados.

5.1 AGREGADO MIÚDO

A Tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo em termos de massa específica, módulo de finura, massa unitária no estado solto e diâmetro máximo característico. A Figura 41 representa a curva de distribuição granulométrica.

Tabela 12 – Caracterização do agregado miúdo.

Características	Unidade	Valores
Massa específica	g/cm ³	2,64
Módulo de finura	-	1,81
Massa unitária no estado solto	g/cm ³	1,56
Diâmetro máximo característico	mm	1,2

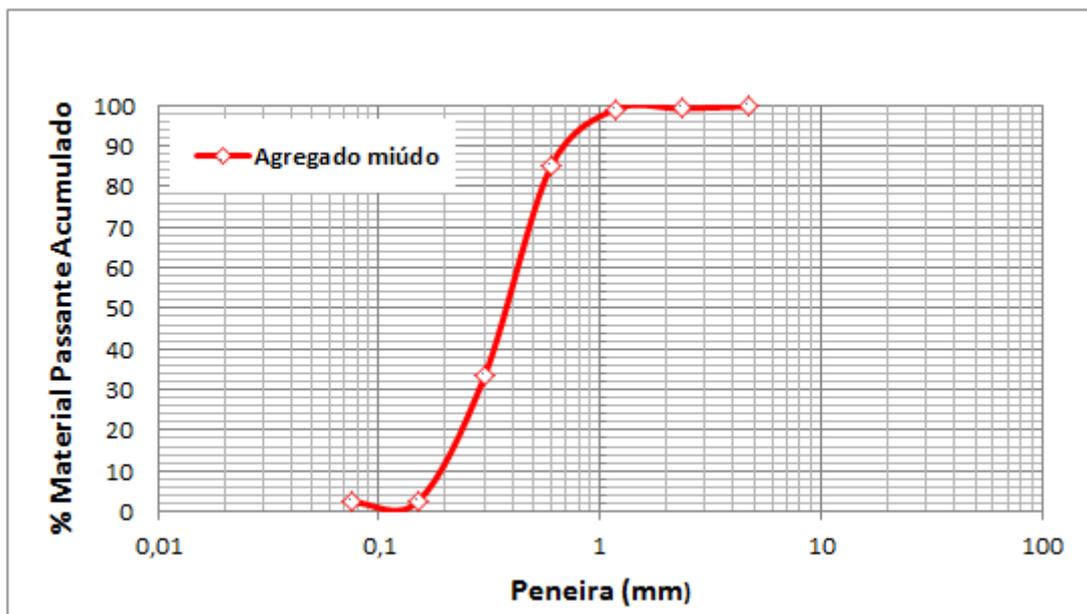


Figura 41 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

De acordo com a curva de distribuição granulométrica (Figura 43) pode-se classificar a areia utilizada como areia média fina, com o grau de uniformidade igual a 2,33 (Tabela 13) com uniformidade nos grãos, porém descontínuos.

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA CBC E DO PDV

Os materiais CBC e PDV *in natura* foram primeiramente caracterizados quanto ao teor de umidade, massa específica, teor de matéria orgânica, teor de carbono orgânico e perda ao fogo, uma vez que a CBC *in natura* apresentou cor preta, o que foi atribuído ao processo de queima ineficiente na caldeira na empresa e o PDV *in natura* deve possuir um grau importante de contaminação pelo fluido de corte utilizado na etapa de corte do vidro. Os resultados referentes a esses ensaios podem ser observados na Tabela 13, a seguir.

Tabela 13 – Características da CBC e PDV.

Resíduo	Característica	Unidade	Valor
CBC	Massa Específica	g/cm ³	2,55
	Teor de Umidade	%	2,29
	Matéria Orgânica	%	0,85
	Carbono Orgânico	%	0,47
	Perda ao Fogo	%	15,59
PDV	Massa Específica	g/cm ³	2,54
	Teor de Umidade	%	1,97
	Matéria Orgânica	%	0,17
	Carbono Orgânico	%	0,093
	Perda ao Fogo	%	3,14

Observou-se que as massas específicas obtidas para CBC e PDV apresentaram valores próximos e ambos inferiores àquele encontrado para a areia.

A CBC apresentou teor de matéria orgânica superior àquele observado para o PDV, provavelmente devido ao remanescente de matéria orgânica não consumida no tratamento térmico ao qual o material foi submetido na indústria.

Vale ressaltar que a perda ao fogo para a CBC ultrapassou o limite recomendado, o que deve estar associado ao remanescente de matéria orgânica

devido às condições insuficientes de queima do bagaço-de-cana de açúcar na caldeira da usina utilizada para coleta da amostra. No entanto, para o PDV o resultado foi satisfatório, já que segundo a ABNT NBR NM 18:2012, o limite máximo é de 10 % para classes de material N e 6 % para as classes C e E.

5.3 TRATAMENTO TÉRMICO DA CBC E DO PDV

Após a caracterização da CBC e PDV *in natura* e monitoramento da existência de remanescente de material orgânico em ambos os materiais, o estudo das condições do tratamento térmico foi realizado a partir dos resultados obtidos com a análise termogravimétrica. Optou-se por analisar somente a CBC *in natura*, uma vez que esse foi o material com maior teor de umidade e teor de matéria orgânica. O PDV não foi submetido à análise de ATG, pois, utilizou a mesma temperatura do tratamento térmico aplicado à CBC. A Figura 44 mostra que a CBC apresentou três regiões distintas de perda de massa. A primeira região, de 100 a 280 °C foi atribuído à perda de água fracamente e fortemente adsorvida na superfície da CBC e correspondeu a, aproximadamente, 30 % de perda de massa. A segunda região, de 280 a 370 °C, foi atribuída à desidroxilação, referente à, aproximadamente, 65 %, e a terceira à decomposição da matéria orgânica devido ao residual orgânico oriundo da queima parcial nas condições da caldeira na empresa geradora do resíduo do bagaço de cana-de-açúcar (MORAES *et al.*, 2015).

Com esses resultados, considerou-se o tratamento térmico dos materiais em duas etapas, a 350 °C por 3 h para a remoção de toda a água do material e transformação da sua superfície por conta do processo de desidroxilação e a 600 °C por mais 3 h para a remoção da matéria orgânica remanescente.

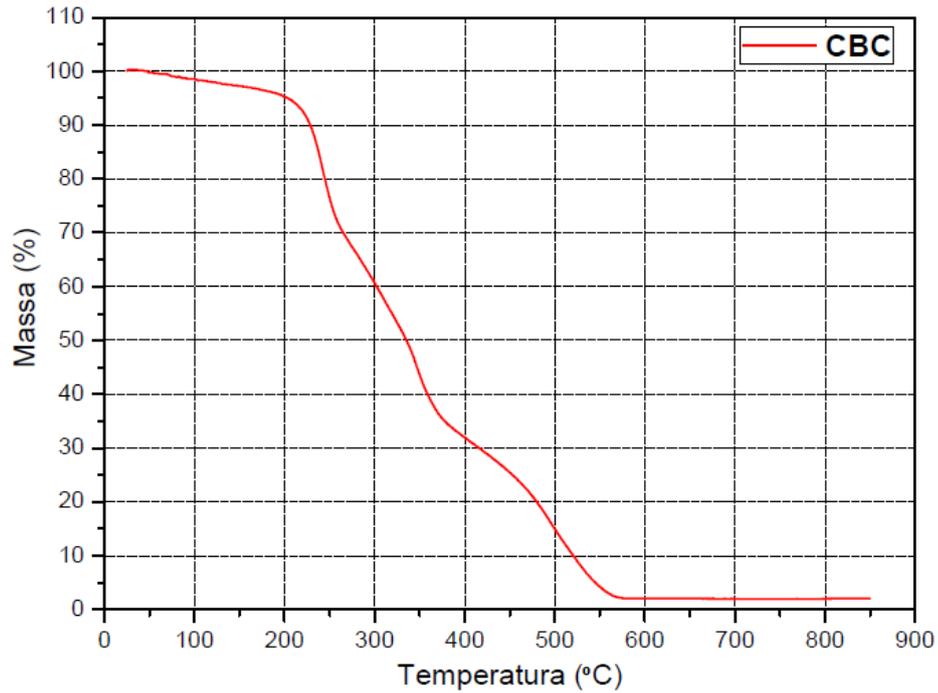


Figura 42 – Análise termogravimétrica da CBC.

5.3.1 Análise granulométrica da CBC e do PDV

Após o tratamento térmico, os materiais CBC e PDV foram moídos e peneirados para controle da granulometria. A Figura 45 mostra a curva granulométrica do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação. A porcentagem de material retido e acumulado em cada peneira.

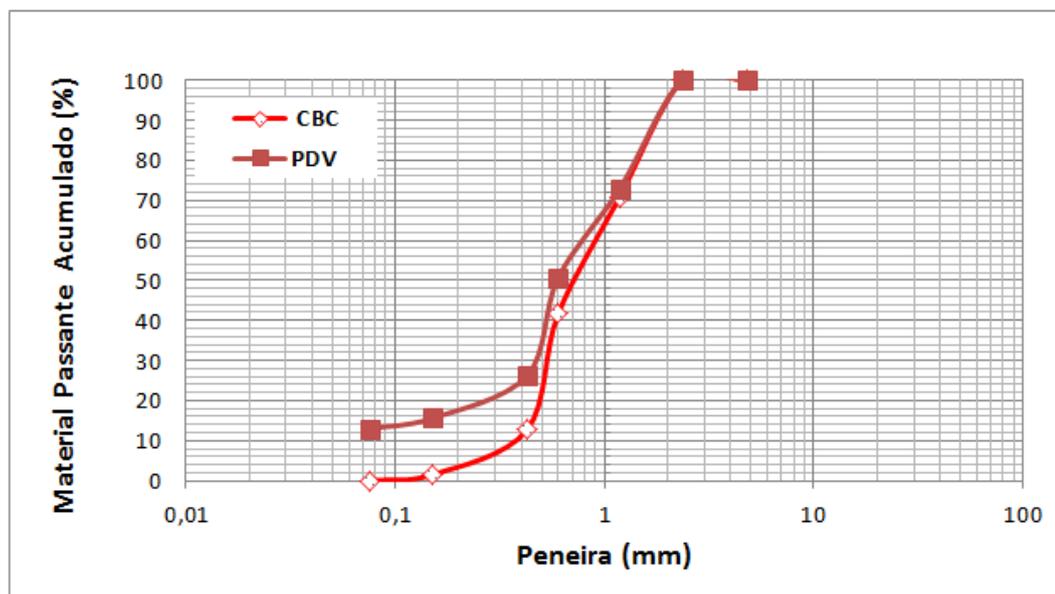


Figura 43 - Distribuição granulométrica da CBC e do PDV.

Tabela 14 - Classificação granulométrica da CBC e PDV segundo ABNT NBR 6502:1995.

Classificação	CBC (%)		PDV (%)	
	Percentagem retida	Percentagem passante Acumulada	Percentagem retida	Percentagem passante acumulada
2 a 2,36mm (Pedrisco)	29,15	29,15	27,12	27,12
0,6 a 2 mm (Areia grossa)	29,14	58,28	22,17	49,29
0,2 a 0,6 mm (Areia média)	29,03	87,31	24,54	73,83
0,06 a 0,2 mm (Areia fina)	11,17	98,49	10,58	84,41
0,002 a 0,06 mm (Silte)	1,51	100	2,62	87,03
≤ 0,002 mm (Argila)	0	100	0	87,03

Analisando a classificação granulométrica da CBC e do PDV (Tabela 14) pode-se observar que esses materiais ficaram retidos acumulado na peneira 0,6 a 2 mm, 58,28 e 49,29 %, respectivamente, sendo classificados como areia fina segundo a ABNT NBR 7211:2005.

Devido ao tamanho das partículas foi necessário submeter os materiais ao processo de moagem, realizado para homogeneizar as amostras e alcançar a granulometria desejada ($\geq 75 \mu\text{m}$) em prol da substituição parcial do cimento. O tempo necessário para alcançar a granulometria desejada com maior eficiência do moinho foi de 3 horas.

5.3.2 Resistência à compressão simples

Com base nos resultados apresentados, optou-se pelo tratamento térmico da CBC e do PDV para evitar a presença de resíduos orgânicos e homogeneizar os materiais.

Os traços foram selecionados de acordo com a Tabela 11 e baseados nos resultados obtidos e reportados na literatura (Quadros 1 e 3). Um corpo de prova chamado referência (T1), preparado sem a substituição do cimento, foi utilizado como parâmetro para os demais corpos de prova.

A Figura 44 apresenta os resultados médios de resistência à compressão aos 60 dias das misturas de concreto.

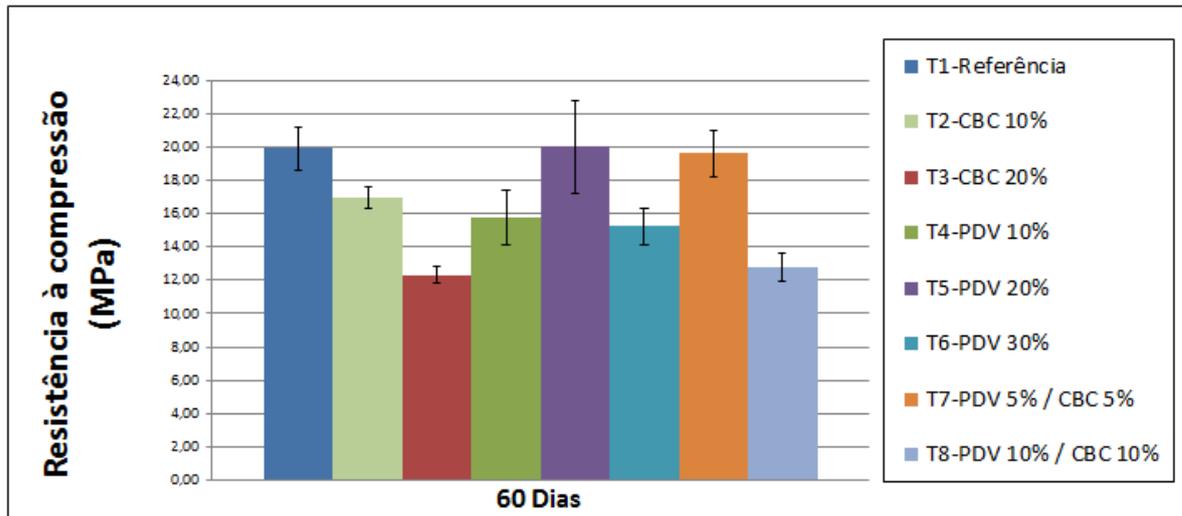


Figura 44 - Resistência à compressão aos 60 dias.

Como pode ser visto na Figura 44, dentre os traços utilizados, os que apresentaram melhor desempenho foram o T5 (PDV 20 %) e o T7 (PDV 5 % mais CBC 5 %), ambos com resistência à compressão equivalente ao traço referência, T1.

Estatisticamente, pode-se dividir os resultados em três grupos. O primeiro grupo contendo os traços T3 e T8 (grupo de menor resistência, G1); o grupo contendo os traços T2, T4 e T6 (grupo de resistência mediana, G2); o grupo dos traços T5 e T7 (grupo de resistência equivalente à referência, G3).

Comparativamente, os resultados dos traços T3 e T8 (G1) mostraram que a substituição de 20 % do cimento por CBC ou pela mistura CBC e PDV (10 % cada) não favoreceu a resistência à compressão, a qual não ultrapassou os 13 MPa (Figura 44a)

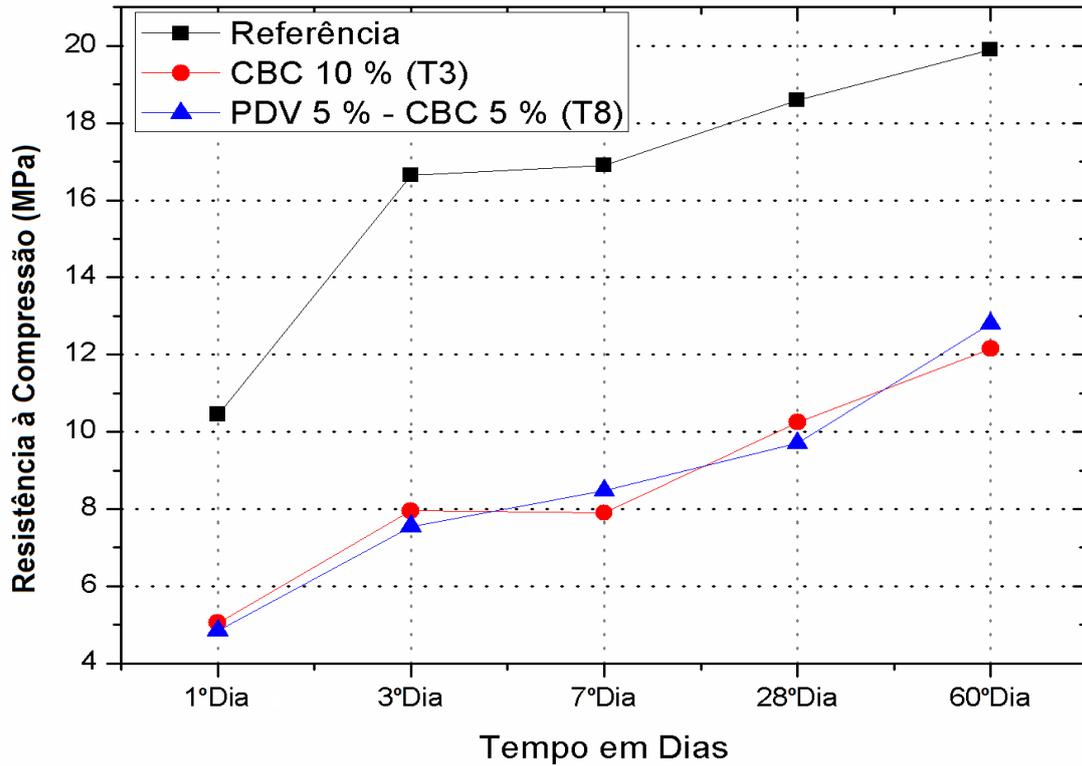


Figura 44a – Evolução da resistência à compressão para o Grupo 1.

No mesmo sentido, os traços T2, T4 e T6 (G2) alcançaram o patamar de resistência à compressão na faixa de 15 a 17 MPa (Figura 44b).

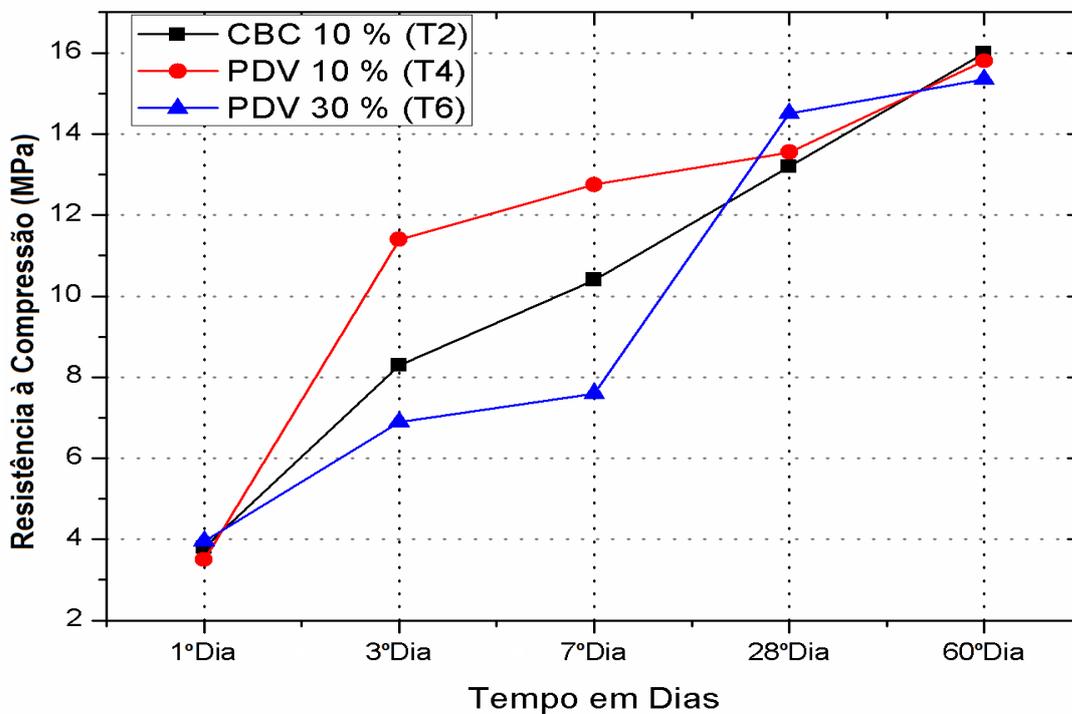


Figura 44b – Evolução da resistência à compressão para o Grupo 2.

Quando comparados, os dois grupos, G1 e G2, pode-se notar que o traço T2 (CBC 10 %) foi melhor que o traço T3 (CBC 20 %), indicando que a resistência à compressão diminuiu com o aumento da participação da CBC na mistura cimentícia. Os traços T5 e T7 (G3) foram os que apresentaram a maior resistência à compressão, sendo que esses resultados alcançaram o patamar daqueles obtidos com o corpo de prova referência (T1), preparados sem a substituição do cimento (Figura 44c).

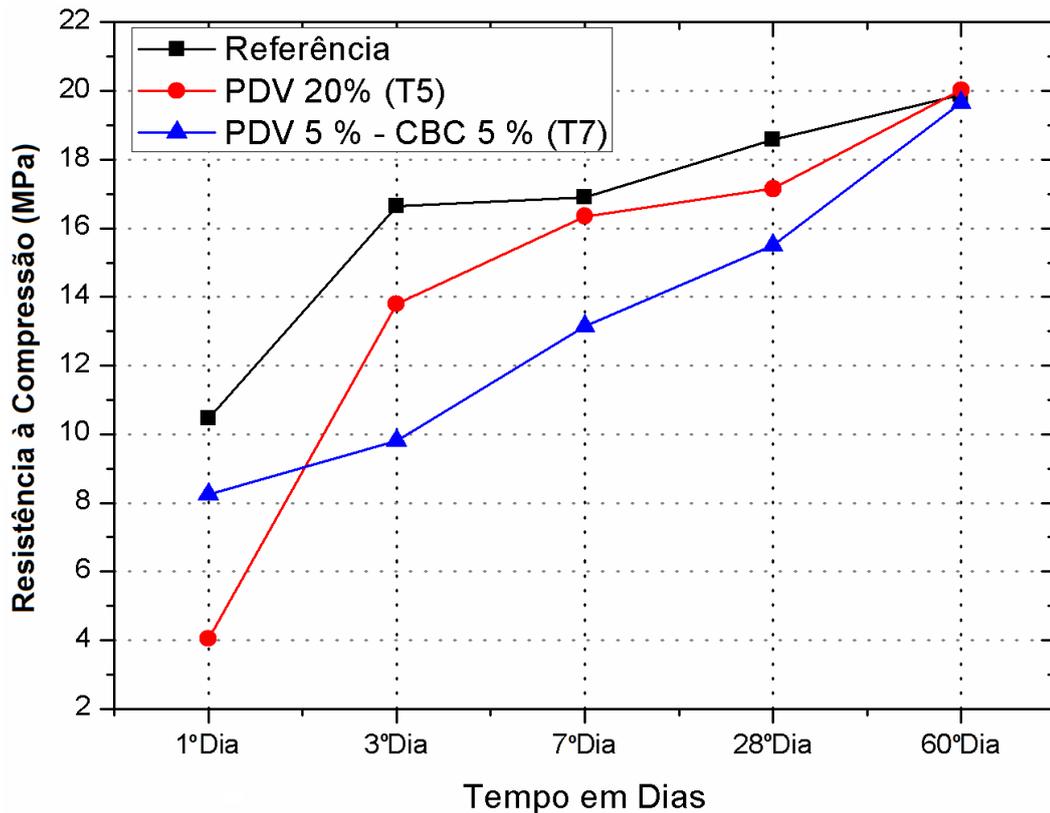


Figura 44c – Evolução da resistência à compressão para o Grupo 3.

Considerando as informações estatísticas, não foi possível classificar o traço T5 como sendo aquele proveniente da melhor substituição realizada, pois o resultado sobrepôs-se ao traço T4 no limite da margem de erro. Ligeiramente fora dessa sobreposição encontrou-se o traço T7, indicando que, provavelmente, a melhor substituição foi aquela realizada com a mistura dos dois materiais em proporções iguais e atingindo um máximo de 10 % da quantidade substituída de cimento.

É interessante notar que a cinética das reações químicas foi muito favorecida nos corpos de prova da referência (sem substituição do cimento), cuja resistência à compressão alcançou 50 % do seu total (10 MPa) logo após as

primeiras 24 h de hidratação. Após o terceiro dia, a resistência alcançou 80 % do total (15,8 MPa). Para todos os traços provenientes de misturas, exceto para o T7, a cinética do primeiro dia foi bastante lenta e somente a partir do terceiro dia é que os traços T4 e T5 (PDV 10 e 20 %, respectivamente) mostraram um aumento significativo da resistência à compressão. A partir do sétimo dia, os traços T5 e T7 apresentaram cinética equivalente à cinética do traço T1, resultando em resistência à compressão equivalente a do traço T1. Aos vinte e oito dias, os grupos de traços G1, G2 e G3 puderam ser identificados e a partir desse ponto todos os traços apresentaram cinética de reação de hidratação da mistura cimentícia na mesma ordem do que foi estabelecido até o sétimo dia.

Apesar dos traços T5 e T7 terem apresentado resistência à compressão equivalente ao traço T1, a cinética da reação química foi mais lenta, principalmente no início do tempo de monitoramento. Tal desfavorecimento cinético deve estar associado às características do material substituinte do cimento, tais como tamanho e morfologia dos grânulos, composição química, composição cristalográfica, área específica e volume de poros. Nesse sentido, realizou-se a caracterização química elementar dos materiais CBC e PDV por meio da fluorescência de raios X, fisiossorção de nitrogênio e difração de raios X.

5.3.3 Fluorescência de raios X

O ensaio de fluorescência de raios X permitiu classificar o material de acordo com o grau de pozolanicidade por meio da somatória das percentagens dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Conforme a ABNT NBR 12653:2012, o material pode ser considerado pozolânico se o teor dos elementos silício, alumínio e ferro, expressos na base óxido, alcançar, no mínimo, 70 % da sua composição total. A Tabela 15 apresenta os teores dos componentes da amostra, expressos na base óxido.

Tabela 15 - Composição química das amostras na base óxido.

Óxido	CBC (%) [*]	PDV (%) [*]
SiO ₂	51,14	62,0
Al ₂ O ₃	10,2	1,5
Fe ₂ O ₃	11,6	7,2
CaO	5,4	25,2
MgO	1,9	0,0
K ₂ O	1,9	1,2
P ₂ O ₅	10,9	2,8
Mn ₂ O ₃	5,1	0,0
SO ₃	1,8	0,0
Cl ₂ O ₇	0,06	0,1

^{*} Percentual mássico base seca.

Os materiais PDV e CBC foram classificados como potenciais materiais pozolânicos, pois o somatório dos óxidos de silício, alumínio e ferro foi de 73,8 e 70,8 %, para a CBC e para o PDV, respectivamente. Além disso, em ambos os casos, pode ser observado a predominância de silício, ultrapassando os 50 % em massa, o que chamou a atenção, pois o silício possui um papel relevante na formação de compostos silicatados, os quais rendem resistência à compressão ao material.

No caso do PDV, o elevado teor de cálcio encontrado por meio da FRX, aproximadamente ¼ da massa do material (25,2 %), deve ser cuidadosamente considerado, uma vez que a composição do cimento Portland é predominantemente à base de compostos de cálcio (ver Tabela 1). Sendo assim, em termos composicionais, o PDV pode ser considerado um excelente material pozolânico, pois além de ter apresentado alta concentração de óxido de silício (62,1 %) mostrou também com capacidade de substituir parcialmente o cálcio proveniente do cimento Portland. Diferentemente, a CBC apresentou apenas 5,4 % de cálcio, considerado na base óxido. A CBC possui origem de matriz vegetal, por esse motivo sua composição é mais complexa e os teores de silício, ferro e alumínio observados são resultado do processo de absorção de nutrientes do solo pelas raízes das plantas (MITANI, 2005).

O aspecto composicional dos materiais pareceu importante para a interpretação dos resultados de resistência à compressão quando se considerou a relação mássica entre os elementos químicos expressos na forma dos seus óxidos mais estáveis e o impacto da substituição do cimento por quantidades definidas do resíduo industrial. Dessa forma, os resultados obtidos na Tabela 15 foram utilizados para compor a relação de teores dos elementos químicos na forma de óxidos e suas relações mássicas (Tabela 16).

Tabela 16 - Relações mássicas dos componentes das misturas estudadas.

Amostra/Traço	Componente (%)				Razão mássica	
	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO/SiO ₂	CaO/Al ₂ O ₃
Cimento / T1	57-68	18-22	0,2-3	4,0-7,1	3,13 ^a	11,36 ^a
CBC 10 % / T2	56,8	23,2	2,4	6	2,44	9,51
CBC 20 % / T3	51,1	26,4	3,4	6,4	1,93	7,93
PDV 10 % / T4	58,8	24,2	2,0	5,1	2,43	11,52
PDV 20 % / T5	55,0	28,4	2,6	4,7	1,94	11,71
PDV 30 % / T6	51,3	32,6	3,1	4,3	1,57	11,93
CBC+PDV 10 % / T7	57,8	23,7	2,2	5,5	2,44	10,44
CBC+PDV 20 % / T8	53,1	30,5	3,7	5,8	1,74	9,15

^a valor médio referente aos teores de óxidos do cimento.

Basicamente, os dados de FRX mostraram que de acordo com o aumento do nível de substituição do cimento por PDV, houve o decréscimo dos teores de CaO e Al₂O₃ e o aumento dos teores de SiO₂ e Fe₂O₃ na mistura cimentícia resultante. Para a substituição com CBC, apenas o teor de CaO diminuiu de acordo com o nível de substituição do cimento, ou seja, os teores de SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ aumentaram com o aumento do nível de substituição. Com isso, pode-se expressar as alterações nos teores dos óxidos por meio da sua relação mássica.

Um exemplo da relevância da razão mássica dos componentes da mistura pode ser observado nos traços T2 e T3 (CBC 10 e 20 %, respectivamente). Esses

dois traços apresentaram resistência à compressão igual a 17 e 12 MPa, respectivamente. A resistência à compressão do traço T3 pode ter sido inferior àquela do traço T2 devido à menor relação $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ do traço T3 em relação ao traço T2. A maior concentração de alumínio no traço T3 pode ter limitado a formação de compostos baseados na combinação entre cálcio e silício, tais como os silicatos dicálcicos e os silicatos tricálcicos, os quais são os principais responsáveis pela resistência à compressão do material resultante (BRYKOV *et al.*, 2013). De maneira geral, observou-se uma contribuição menos expressiva da CBC para o aumento da resistência à compressão em relação ao PDV.

Os traços T5 e T7 ganharam destaque devido ao comportamento característico de atividade pozolânica, pois a evolução da resistência após o sétimo dia tornou-se nítida quando comparada ao traço T1. Esse fato pode ter ocorrido devido à quantidade máxima de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ capaz de reagir com o material pozolânico. As condições para que ocorra o efeito pozolânico dependem da quantidade e qualidade de fases ativas e presentes e alguns fatores, tais como, o teor de SiO_2 ativa, área específica do material pozolânico, relação sólido/água na mistura cimentícia, entre outros MASSAZALA (1998).

Interessante notar ainda que no caso do traço T7, a mistura de CBC e PDV parece ter criado um efeito sinérgico, alcançando a resistência à compressão de 19,8 MPa. Isso não ocorreu com o traço T2 (CBC 10 %) ou com o traço T4 (PDV 10 %); ambos apresentaram resultados menos expressivos.

5.3.4 Difração de raios X

A limitação da análise por fluorescência de raios X está na ausência de informação a respeito da identidade cristalográfica do material, ou seja, por meio da FRX os elementos químicos presentes majoritariamente não podem ser relacionados às estruturas dos seus respectivos compostos. A importância do tipo de composto químico e de suas fases cristalinas para as reações de hidratação foram apresentadas na Figura 2.

Nesse sentido, a análise de DRX foi realizada para identificar as fases amorfas e/ou cristalinas dos componentes da amostra e ajudar na compreensão dos processos químicos envolvidos na presença da CBC e do PDV e nos resultados

obtidos. A Figura 45 apresenta os difratogramas de raios X da CBC e do PDV e das três misturas cimentícias com maior resistência à compressão, obtidas aos 28 dias de hidratação (T2, T5 e T7).

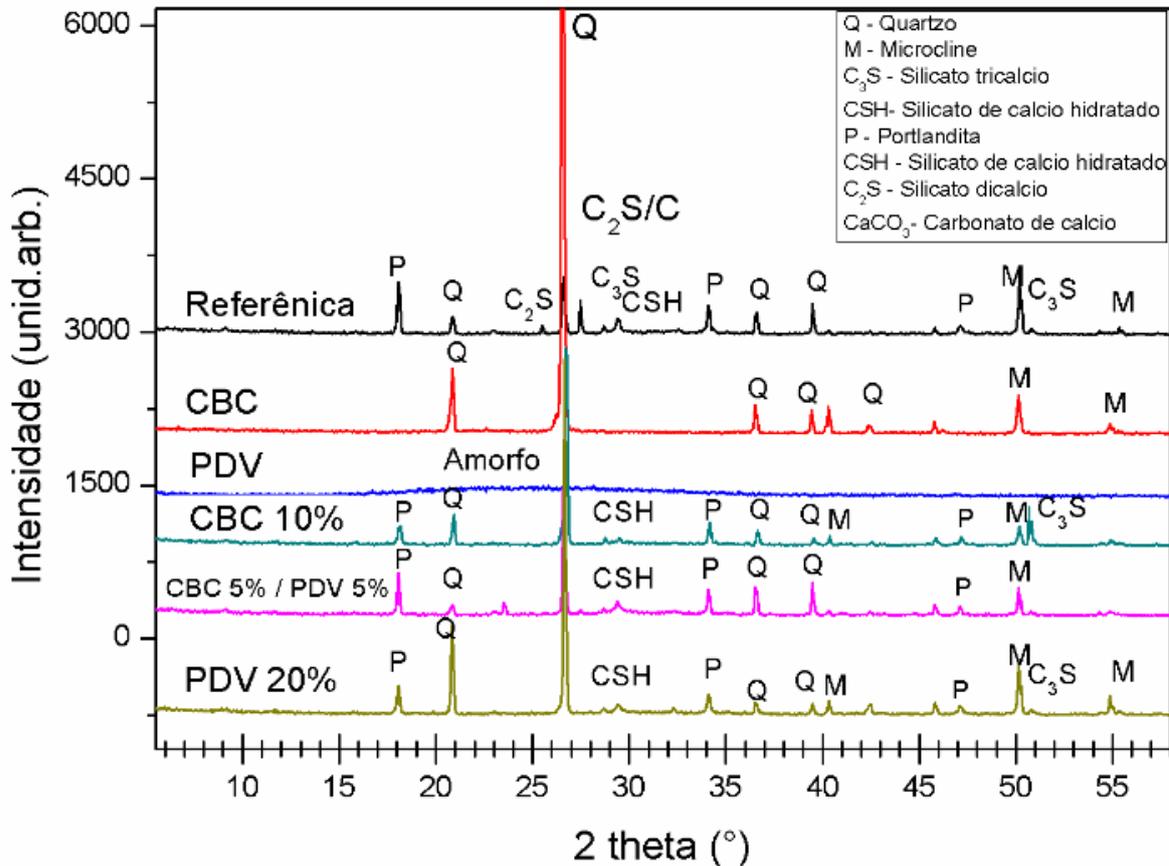


Figura 45 – Difratogramas de raios X dos principais materiais obtidos.

Primeiramente, os materiais CBC e PDV, avaliados como substitutos parciais do cimento, apresentaram perfis de difração completamente distintos. Enquanto o PDV apresentou o halo amorfo entre 15 e 35 ° (2θ), característico de materiais amorfos e tipicamente associado aos materiais vítreos (AZIS *et al.*, 2015), a CBC, por outro lado, apresentou um padrão de picos de difração atribuído, principalmente, ao SiO₂ como quartzo (ZUO *et al.*, 2016). De acordo com a literatura, a sílica presente na estrutura interna das plantas é predominantemente amorfa (CURRIE e ANPERRY, 2009), porém, o tratamento térmico realizado antes da análise de DRX deve ter favorecido a formação de uma fase cristalina rica em quartzo (LE BLONDE *et al.*, 2010).

De acordo com a literatura, a estrutura amorfa do PDV sugere que o material possui maior probabilidade de produzir um efeito pozolânico nas reações químicas de hidratação do cimento, fazendo com que haja maior interação entre as partículas,

melhorando as características das misturas cimentícias produzidas devido a vários fatores, tais como, densidade de grupos silanol (Si-OH) na superfície do material, concentração total de grupos silanol e solubilidade em meio básico (OERTEL *et al.*, 2014).

É possível notar na Figura 45 que o traço T1 apresentou uma série de picos de difração, os quais foram atribuídos, de acordo com a literatura, à fase cristalina da sílica na forma de quartzo (Q), portlandita (P), silicato de cálcio hidratado (CSH), silicato dicálcico (C_2S), silicato tricálcico (C_3S), carbonato de cálcio (C) e microclina (M) (GOPINATH *et al.*, 2012; HOU *et al.*, 2014, GARCIA *et al.*, 2017).

No caso das misturas em que o cimento foi substituído parcialmente pela CBC e/ou PDV, observou-se que o traço T7 foi o que mais se assemelhou ao traço T1 (referência).

Interessante notar que, quando foram comparadas às intensidades relativas dos picos de difração do traço T1, os três traços (T2, T5 e T7) apresentaram um decréscimo substancial na intensidade dos picos de difração referentes à portlandita, $Ca(OH)_2$, tais como aqueles a 18, 34 e 47,5 ° (2θ), atribuídos aos planos 001, 101 e 102 da portlandita (KHACHANI *et al.*, 2013) De acordo com a literatura, esse decréscimo foi decorrente do consumo do $Ca(OH)_2$ durante o processo de hidratação da mistura cimentícia e indicou o efeito pozolânico obtido pela substituição do cimento por CBC e/ou PDV (GARCIA *et al.*, 2017).

O traço T2, apesar de ter apresentado um decréscimo significativo da intensidade dos seus picos de difração referentes ao $Ca(OH)_2$, apresentou também um pico bastante pronunciado em 51 ° (2θ), referente à fase silicato tricálcico (C_3S) (Figura 46), indicando que a reação de hidratação dessa fase cristalina não ocorreu em nível semelhante ao do traço referência. Esse resultado pode estar associado à menor resistência à compressão apresentada pelo traço T2.

5.3.5 Microscopia eletrônica de varredura

A análise feita por meio da MEV permitiu a avaliação da morfologia das partículas da CBC e do PDV, bem como das misturas cimentícias obtidas pela substituição parcial do cimento. As Figuras 46 à 49 mostram um panorama geral de

algumas imagens obtidas. As morfologias observadas foram bastante diferentes, o que já era esperado devido às diferentes origens de cada material.

A Figura 46 mostra as imagens obtidas para a CBC seca a 105 °C. Como esperado, nessas condições o material apresentou formas predominantemente prismáticas, típico dos cristais de quartzo, com superfície lisa (Fig. 47 c,d) e uma pequena parcela de fragmentos finos contendo microfuros com, aproximadamente, 750 nm (Fig. 46b). Esses fragmentos foram atribuídos à parcela não queimada ou parcialmente queimada nas condições experimentais da caldeira da empresa (CASTALDELLI *et al.*, 2016).

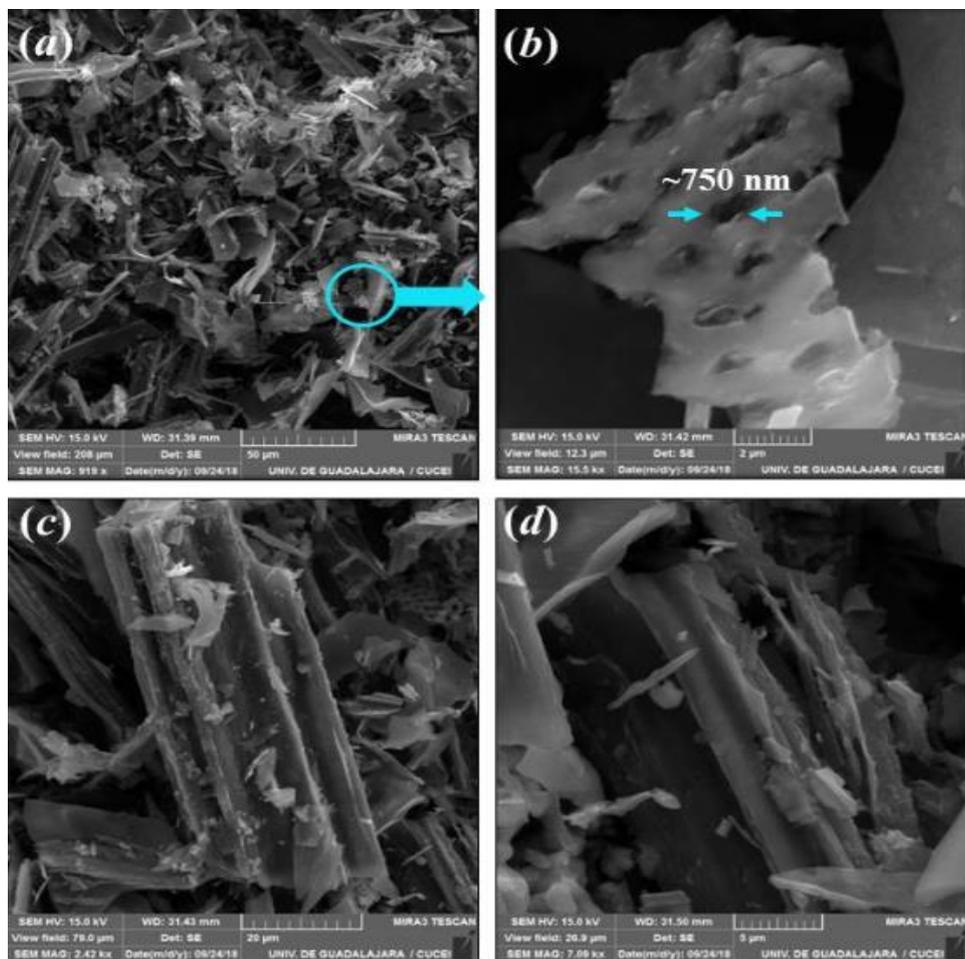


Figura 46 – Imagens de MEV da CBC seca a 105°C.

É interessante notar que a CBC, após ter sido submetida ao tratamento térmico a 600 °C teve suas estruturas prismáticas destruídas, passando a apresentar formas aproximadamente esféricas, como pode ser observado na indicação da Figura 47f. A CBC tratada termicamente apresentou também um nível

de porosidade distribuída por todo o material (Fig. 47a-d). Apesar disso, os poros observados são relativamente grandes, na ordem de 1 ou 2 μm , e pouca profundidade (Fig. 47b), o que não deve ter sido o suficiente para aumentar significativamente a área específica do material (ver adsorção e dessorção de nitrogênio à frente).

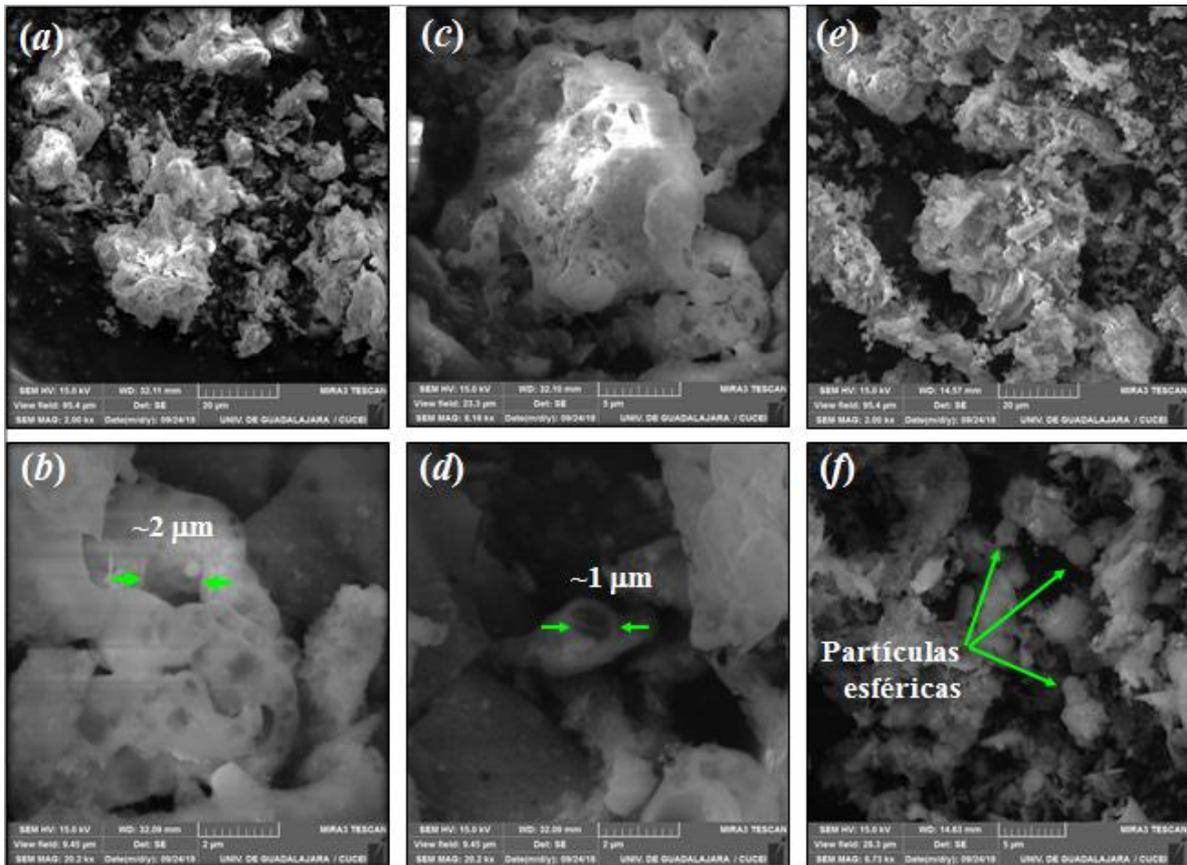


Figura 47 – Imagens de MEV da CBC tratada termicamente.

Ao contrário, o PDV não apresentou grandes mudanças na sua morfologia após o tratamento térmico. A Figura 49a-f apresenta as imagens obtidas para o PDV seco a 105 °C e após o tratamento térmico a 600 °C. O PDV, em geral, apresentou partículas de formato irregular, com superfície lisa, fratura conchoidal, típica de materiais amorfos e de composição homogênea, características físicas intensificadas pela moagem em moinho de bolas (PERRUSO *et al.*, 1998). As partículas apresentaram-se claramente agregadas entre si. Em alguns casos, foi possível detectar algum nível de porosidade nas partículas (Fig. 48f), mas não de forma relevante.

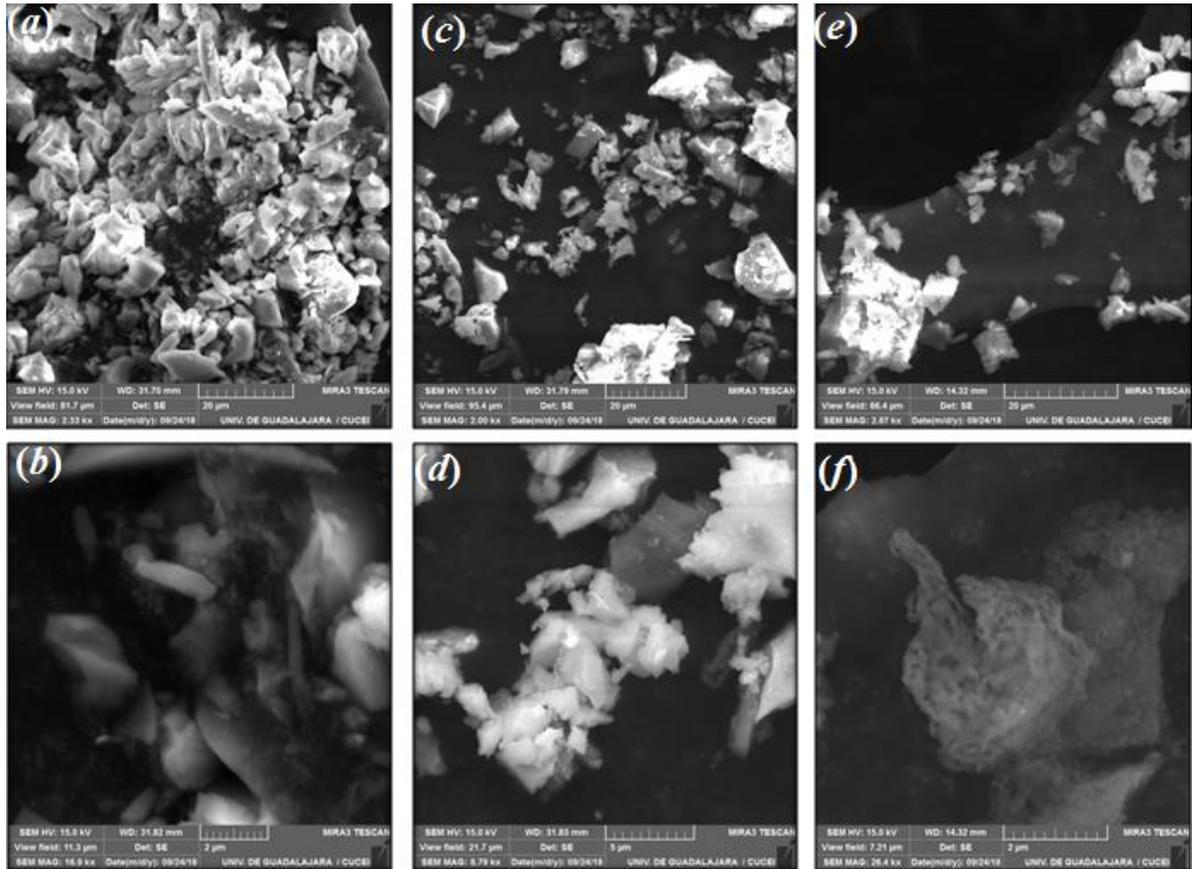


Figura 48 – Imagens de MEV para o PDV seco a 105°C.

No caso das amostras dos corpos de prova analisados (Referência, CBC 10 %, PDV 20 % e CBC+PDV 10 %), as imagens de MEV mostraram determinadas diferenças nas morfologias das misturas cimentícias produzidas. Apesar de, aparentemente, as imagens mostrarem agregados de partículas de sílica de tamanho heterogêneo, as Figuras 49a,c mostram a presença de poros de, aproximadamente, 150 µm de diâmetro nas misturas com CBC e PDV. Por outro lado, na mistura cimentícia obtida pelo uso de CBC e PDV os poros não foram identificados.

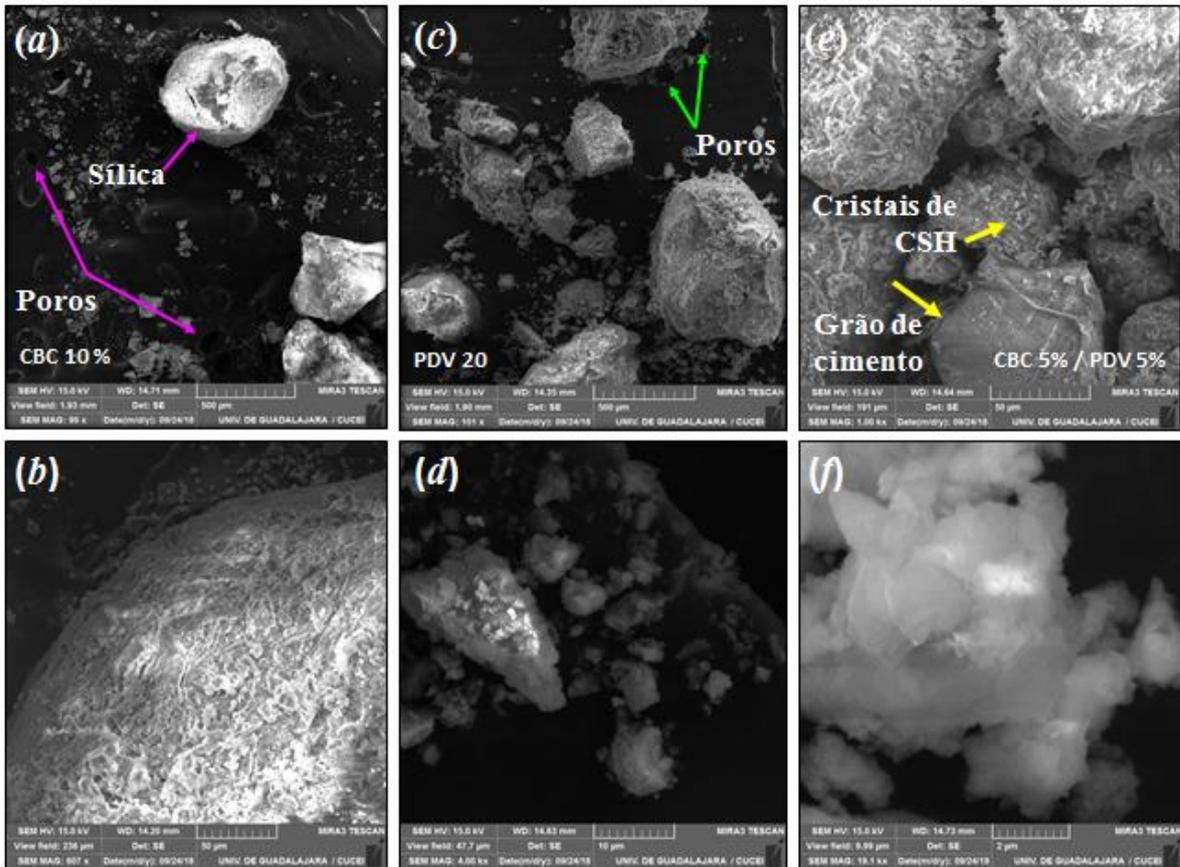


Figura 49 – Imagens de MEV das melhores misturas obtidas.

De acordo com BEDIAKO *et al.* (2013), um material com atividade pozolânica contribui para a diminuição da porosidade da mistura cimentícia, aumentando a resistência do material final. O efeito sinérgico entre CBC e PDV parece ser o responsável pela rápida hidratação do traço T7 e sua elevada resistência à compressão. De acordo com OERTEL *et al.*, (2014), que estudaram o papel da sílica amorfa na primeira hora de hidratação do cimento de alta performance, as partículas de sílica atuam como nucleadoras para o crescimento de cristais de silicato de cálcio hidratado (CSH) por meio do chamado efeito *seeding*. Dessa forma, o traço T7 foi favorecido pelo fato de ter a concentração de sílica aumentada pela adição de CBC e PDV e, ao mesmo, tempo pela reposição de parte do cálcio removido com o cimento. Adicionalmente, o traço T2 (CBC 10 %), apesar de possuir a contribuição da sílica na forma de quartzo, não contou com a contribuição do cálcio oriundo do PDV e teve sua resistência à compressão comprometida.

O traço T5 apresentou cinética mais lenta quando comparado ao traço T7 no primeiro dia, porém, a partir do terceiro dia sua resistência à compressão aumentou substancialmente. Esse comportamento pode estar associado ao fato do PDV

contribuir com uma matriz amorfa contendo silício e cálcio. Nesse caso, apesar da cinética ter mostrado grande evolução somente a partir do terceiro dia, o resultado final foi de resistência à compressão similar a do traço T1.

O efeito sinérgico da CBC e do PDV, principalmente relacionado à cinética do primeiro dia, pode ter uma componente baseada na porosidade e área específica da CBC, uma vez que as reações de hidratação e formação dos silicatos de cálcio dependem do contato com os grupos silanol da superfície da sílica amorfa ou quartzo (OERTEL *et al.*, 2014).

5.3.6 Adsorção-dessorção de nitrogênio

A Figura 50 mostra os resultados obtidos para os ensaios de área específica da CBC e do PDV pelo método BET e do volume de poros pelo método BJH.

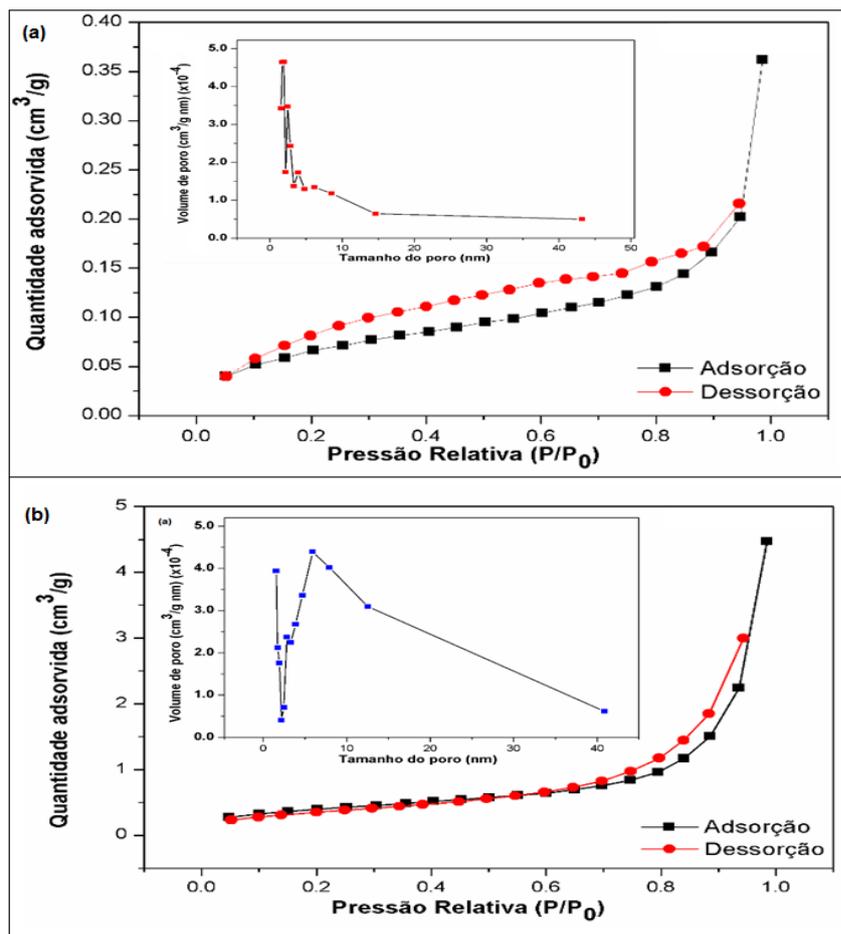


Figura 50 – Isothermas de adsorção-dessorção de N_2 e distribuição do tamanho dos poros (detalhe) de CBC fundo (a); PDV fundo (b).

O perfil da isoterma de adsorção-dessorção da CBC com granulometria abaixo de 75 μm (Fig. 50a) correspondeu à isoterma do Tipo IV com presença de histerese H3 a P/P0 0,8-0,95. A isoterma do Tipo IV é, geralmente, associada a materiais mesoporosos e a histerese H3 a existência de poros com formato de fendas (WEISHAUPTOVÁ *et al.*, 2017) Apesar da distribuição do tamanho de poros da CBC ter ficado na faixa de 2 a 40 nm, faixa atribuída a mesoporos, o volume referente aos poros foi relativamente baixo, 0,033 cm^3/g .

Para o PDV com granulometria inferior a 75 μm (Fig. 50b), a isoterma apresentada foi semelhante ao Tipo IV, porém com histerese H3 localizada em mais baixa pressão relativa quando comparada à histerese do material CBC. De acordo com a literatura, o fenômeno da histerese a baixa pressão relativa é devido à presença de microporos, os quais limitam a difusão do gás N_2 pelos poros. Essa limitação é fundamental em aspectos morfológicos e no tipo de conectividade dos poros (JEROMENOK *et al.*, 2013).

A Tabela 17 mostra os resultados obtidos. É possível observar que a área específica e o volume de poros dos dois materiais são relativamente baixos, no entanto a CBC e o PDV esteve próximo dos valores encontrados por outros autores (CORDEIRO *et al.*, 2017; SOLIMAN *et al.*, 2017). Essas diferenças texturais estão de acordo com as imagens obtidas por meio da MEV, a qual indicou a maior concentração de poros na CBC. O tamanho médio dos poros também pode ser relacionada com as imagens de MEV. O PDV apresentou sua distribuição do tamanho de poros em uma faixa mais definida, de 2 a 40 nm. Novamente, o volume de poros foi extremamente baixo, característico de um material vítreo.

Tabela 17 – Área específica e volume de poros.

	Área específica ^a (m^2/g)	Volume de poros ^b (cm^3/g)
CBC	7,163	0,033
PDV	1,185	0,0022

^aObtida pelo método BET; ^bObtido pelo método BJH no ramo adsorção.

5.3.7 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland e cal

Finalmente, para monitorar ainda melhor os resultados de resistência à compressão, os corpos de prova foram novamente preparados para a avaliação do índice de atividade pozolânica com cimento e com cal.

A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos para o índice de atividade pozolânica em termos de resistência à compressão para as amostras.

Tabela 18 - Resistência à compressão e índice de atividade pozolânica com cimento e cal aos 7 dias.

Ensaio	Cimento		Cal
	Média (MPa)	IAP (%)	Média (MPa)
Cimento	15,2	-	-
CBC	14,7	88,0	1,3
PDV	11,5	75,7	1,9

O índice de atividade pozolânica com cimento obtido a partir da relação da resistência média sem adição de cinza e com adição de cinza foi de 88,0%, e com o PDV foi 75,7, sendo superior aos 75% exigido pela ABNT NBR 12653: 2012.

A baixa resistência à compressão que a CBC e o PDV apresentaram para o índice de atividade com cal, devem estar associados à cinética mais lenta se comparado ao traço referência (T1). Provavelmente, se a norma solicitasse o experimento aos 14 dias, os resultados seriam significativamente superiores aos observados.

5.3.8 Índice de consistência e Início e fim de pega

O índice de consistência e o método para realizar o controle de início e fim de pega foram realizados para caracterizar a argamassa em sua plasticidade e endurecimento. De acordo com a ABNT NBR 5732:1991, no momento que insere-se quantidades iguais ou superiores a 20 % de materiais supostamente pozolânicos,

deixa-se de ter um cimento CP II – Z e obtem-se um cimento CP IV, cimento pozolânico, por essa razão utilizou-se o cimento CP IV , CP V (referência) e as misturas que se destacaram nesse trabalho. A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 19 – Índice de consistência e início e fim de pega.

Amostra	Traço	Flow Table (cm)	Início e fim de Pega (Horas)*	Totais (Horas)
Referência	T1	22,3	11:30 (I)	6
CP-V ARI			17:30 (F)	
CBC 10 %	T2	20,1	10:00 (I)	7
			17:00 (F)	
PDV 20 %	T5	14,6	12:30 (I)	7
			19:00 (F)	
CBC 5 % e	T7	19,8	09:30 (I)	7,5
PDV 5 %			17:00(F)	
Cimento CP-IV	-	19,5	10:30 (I)	8
			18:00 (F)	

*I = início, F = fim.

Pode-se observar que as propriedades da mistura tomaram comportamentos diferentes no momento que iniciou-se a inserção de materiais na mistura. O índice de consistência para a mistura de referência foi o maior valor, indicando que seu estado plástico é maior que as outras misturas (maior plasticidade) e o tempo observado foi o menor. Isso deve ter ocorrido devido às características do cimento CP-V ARI, alta resistência inicial, quando inseriu-se materiais como a CBC 10 %, iniciou-se a perda da plasticidade, tornando a mistura menos plastica.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos sobre a substituição parcial de cimento Portland por diferentes quantidades de CBC e PDV em misturas de argamassa, pode-se concluir que as características granulométricas da CBC e do PDV são muito parecidas com a areia fina natural quartzosa devido a alta quantidade de material retido na faixa 0,6-2 mm.

As técnicas analíticas foram de fundamental importância na avaliação do desempenho dos materiais avaliados. Por meio da FRX, determinou-se a composição química das amostras, sendo que ambas, predominante, são formadas por silicatos. Verificou-se alta concentração de CaO para a amostra de PDV avaliada, esse composto pode ter sido o responsável por proporcionar um dos melhores resultados aos ensaios de resistência à compressão simples, uma vez que o óxido de cálcio é o princípio ativo para a fabricação do clínquer. O ensaio de DRX mostrou que a CBC apresentou uma fase cristalina predominante à base de quartzo (SiO_2) e o PDV apresentou um perfil amorfo.

Em relação às exigências físicas e químicas estabelecidas pela ABNT NBR 12653:2012, a qual caracteriza o material como pozolânico, a CBC e o PDV não se enquadram como pozolana nos três seguintes itens: (a) índice de atividade pozolânica com cal, pois a quantidade saturada de cal não reagiu totalmente com o material pozolânico ao sétimo dia, prejudicando a resistência à compressão; (b) água requerida, devido à utilização de material fino para a confecção dos corpos de prova, prejudicando a plasticidade da mistura; (c) perda ao fogo, devido à alta quantidade de matéria orgânica contida na CBC devido a sua origem vegetal. No entanto, esses aspectos não inviabilizaram os testes que avaliaram o desempenho da argamassa frente à resistência à compressão.

A adição dos materiais residuais, CBC e PDV, influenciou o comportamento das misturas cimentícias monitoradas a partir dos ensaios de início e fim de pega. O cimento utilizado como referência, CP V – ARI apresentou rápida taxa de hidratação, como esperado, com o total de 6 horas para o ciclo completo de início e fim de pega, sendo o mais rápido entre as misturas avaliadas no estudo. O ciclo de início e fim de pega para as misturas contendo 10 % de CBC e 5 % de CBC mais 5 % de PDV, foi mais lento que para a mistura referência, demonstrando que a inserção de materiais alternativos deve ser realizada com restrições para não inviabilizar tecnicamente a mistura resultante. Com o material amorfo, PDV, substituindo 20 % de cimento na mistura, houve adiantamento do ciclo de início e fim de pega, provavelmente devido à elevada concentração de compostos de cálcio, o que ajudou a manter os níveis de cálcio próximos ao recomendado com base na composição do cimento Portland.

Os resultados obtidos por meio dos ensaios de fisiossorção de nitrogênio e MEV nas amostras dos materiais CBC e PDV colaboraram para o entendimento dos

resultados de resistência à compressão das misturas cimentícias. Esses ensaios indicaram diferenças na área específica e morfologia dos materiais.

A utilização dos resíduos estudados por meio de ensaios de resistência à compressão simples mostrou que a substituição parcial do cimento por CBC e PDV em níveis de 10 a 20 % renderam resistência à compressão simples similares àquelas obtidas apenas pelo uso de cimento Portland. De maneira geral, os resultados obtidos com a mistura de CBC e PDV a 10 % de substituição do cimento, principalmente no aspecto cinético, permitem concluir que deve ter ocorrido um efeito sinérgico entre os dois materiais, o que favoreceu as primeiras etapas do processo de hidratação do cimento e dos materiais adicionados.

Com base nos resultados obtidos, é possível incentivar a substituição do cimento Portland pela mistura de CBC e PDV ou por apenas um dos dois resíduos industriais, o que certamente contribuiria para aspectos ambientais de forma significativa. Ensaios mais aprofundados explorando a resistência à compressão em idades mais avançadas e reações paralelas que causem a expansão do concreto podem ser realizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A.; ABOSHAMA, A. Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v 124, p.866-877, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance - **ASTM C403/C403M – 08**, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 618-12a** Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, 1898.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1349** ASTM C 1349 is a Standard Specification for Architectural Flat Glass Clad Polycarbonate.

ARAUJO, E, B. Vidro: Uma Breve História, Técnicas de Caracterização e Aplicações na Tecnologia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 19, p. 325-329, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDRO PLANOS (ABRAVIDRO). Disponível em: <<http://abravidro.org.br/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. Ed. São Paulo, p.28, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <<http://abcp.org.br/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR NM 23** - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro - RJ, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR NM 24** – Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro - RJ, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR NM 45** - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro - RJ, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR NM 67** - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR NM 76** - Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro - RJ, 1998a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR NM 248**. Agregados –determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 6502**. Rochas e solos –Rio de Janeiro – RJ, 1993 , 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 5732** – Cimento Portland comum. Rio de Janeiro - RJ, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 5738** - Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro - RJ, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 5739** - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 5751** Materiais pozolânicos — Determinação da atividade pozolânica — Índice de atividade pozolânica com cal — Método de ensaio -. Rio de Janeiro- RJ, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 5752** Materiais pozolânicos — Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland — Índice de atividade pozolânica com cimento — Método de ensaio -. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 6502** – Rochas e solos. Rio de Janeiro - RJ, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7181** Solo — análise granulométrica – Rio de Janeiro - RJ, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7199** Projeto, execução e aplicações de vidros na construção civil – Rio de Janeiro - RJ, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7211** Agregado para concreto – Rio de Janeiro - RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7215** Cimento Portland — Determinação da Resistência à compressão – Rio de Janeiro - RJ, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 10004**. Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 10005**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 10006**. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 12653** - Materiais pozolânicos - Rio de Janeiro - RJ, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 13276** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro - RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR NM 13600**. Solo- Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro – RJ, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR NM 11172**. Aglomerantes de origem mineral - Terminologia. Rio de Janeiro – RJ, 1990.

Associação dos fornecedores de cana (SOCICANA). 2018. Disponível em: <<http://socicana.com.br/>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

AZIZ, S. H. A.; MALLAWANY, R.; BADARON, S. S.; KAMARI, H, M.; MATORI, K. A. Optical Properties of Erbium Zinc Tellurite Glass System. **Advances in Materials Science and Engineering**, p. 1-5, 2015.

BEDIAKI, M.; FRIMPONG, A. O. Alternative Binders for Increased Sustainable Construction in Ghana – A Guide for Building Professionals. **Materials Science and Applications**, v. 4, p. 20-28, 2013.

BIGNOZZI, M. C.; SACCANI, A.; BARBIERI, L.; LANCELLOTTI, I. Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. **Cement & Concrete Composites**, v. 55, p.45-52, 2015.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: . Acesso em: 15 jun. 2012.

BRYKOV, A. S.; VASIL, A. S.; MOKEEV, M. V. Hydration of Portland Cement in the Presence Of Aluminum-Containing Setting Accelerators. **Journal of Applied Chemistry**, v. 86, p. 793-801, 2013.

CÂMARA, E. **Efeitos da substituição parcial de agregados miúdos por cinzas residuais do bagaço da cana-de-açúcar no processo de hidratação do cimento**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2015.

CAPUTO, H.P. Mecânica dos solos e suas aplicações, Fundamentos 1. 6 ed, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC) S.A. 1988.

CARVALHO, J. D. N. About the origins and development of reinforced concrete, **Revista Tecnológica**, v.17, p.19-28, 2008.

CASTALDELLI, V. N.; MORAES, J. C. B.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P, MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M. M. Study of the binary system fly ash/surgane bagasse ash (FA/SCBA) in SiO₂/K₂O alkali-activated binders. **Fuel**, v. 174, p. 307-316, 2016.

CEBRACE – Empresa Cebrace Cristal Pano. São Paulo, 1974. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/#!/home>> Acesso em: 27 de maio de 2018.

CIMENTO.ORG: **O Mundo do Cimento**. 2010. Disponível em: <<http://cimento.org/cimento-nacional-tem-menor-emissao-de-co2-que-media-mundial/>>. Acesso em: 19 Jun. 2018.

CONAB. COMPAHINHA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Produção de cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 09 março 2018.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E.; Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v.97, p.41-49, 2017.

CORINALDESI, V.; GNAPPI, G.; MORICONI, G.; MONTENERO, A. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. **Waste Management**, v. 25, p. 197-201, 2005.

CURRIE, H. A.; PERRY, C. C. Chemical evidence for intrinsic “Si” within Equisetum cell walls. **Phytochemistry**, v.70, p. 2089-2095, 2009.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 261–310, 2011.

DROLET, C.; DUCHESNE, J. FOURNIER, B. Effect of alkali release by aggregates on alkali-silica reaction. **Construction and Building Materials**, v.157, p. 263-276, 2017.

DONGYU, X.; SHIFENG, H.; LEI, Q.; LINGCHAO, L.; XIN, C. Monitoring of cement hydration reaction process based on ultrasonic technique of piezoelectric composite transducer. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 220–226, 2012.

ELYAMANY, H. E.; ELMOATY, A. E. M. A.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, p.295-307, 2014.

FAEP: Federação da Agricultura do Estado do Paraná. Federação da Agricultura do Estado do Paraná. Disponível em: <<http://sistemafaep.org.br/chuva-atrasa-colheita-da-cana-parana-e-mato-grosso-sul/>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

FAN, B. W.; ZHU, K. Q.; SUN, T.; YUAN, N. Y.; DING, J. N. Effect of glass thickness on temperature gradient and stress distribution during glass tempering. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 437, p. 72-79, 2016.

FILHO, D, B. **Pequena história da arte**. 3 ed, Campinas- SP: Papyrus Editora, 1989.

FREITAS, E. de S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, ENF, Rio de Janeiro, 2005.

GARCIA, D. C. S.; SOARES, M. M. N. S.; BEZERRA, A. C. S.; AGUILAR, M. T. P.; FIGUEIREDO, R. B. Microstructure and hardness of cement pastes with mineral admixture. **Revista Matéria**, v.22, N. 02, 2017.

GOPINATH, S.; MOULI, P. C. H.; MURTHY, A. R.; IYER, N. R.; MAHESWARAN, S. Effect of nano silica on mechanical properties and durability of normal strength concrete. **Archives of Civil Engineering**, v. 58, 433-444, 2012.

HELMUTH, R.; STARK, D. Alkali-silica reactivity mechanisms. Material Science of concrete III. **American Ceramic Society**, p. 131- 208, 1992.

HERNÁNDEZ, J. F. M.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: Study of the reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p.1525-1536, 1998.

HOU, P.; ZHANG, R.; CHENG, X. Case study of the gradient features of in situ concrete. **Case Studies In Construction Materials**, v.1, p.154-163, 2014.

IDIR, R.; CYR, M.; HAMOU, A. T.; Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 19-29, 2011.

INTERCEMENT. Disponível em: <<http://www.intercement.com/pt/#/home/>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

ISLAM, G. M. S.; RAHMAN, M. H.; KAZI, N. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. **International Journal of Sustainable Built Environment**, p. 37-44, v.6, 2017.

JAGADESH, P.; RAMACHANDRAMURTHY, A.; MURUGESAN, R.; Evaluation of mechanical properties of sugar cane bagasse ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 608-617, 2018.

JANI, Y.; HOGGLAND, W. Waste glass in production of cement and concret – A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 2 p. 1767- 1775, 2014.

JATOBETON: Reforço de Fundação - Reação Álcali-Agregado (RAA). Reforço de Fundação - Reação Álcali-Agregado (RAA). 2015. Disponível em: <http://www.jatobeton.com.br/projeto-5>>. Acesso em: 02 ago. 2018.

JEROMENOK, J.; WEBER, J. Restricted Access: On the Nature of Adsorption/Desorption Hysteresis in Amorphous, Microporous Polymeric Materials. **Langmuir**, v.29, p.12982-12989, 2013.

JOHN, V. M. Pesquisa e Desenvolvimento de Mercados Para Resíduos. In: **Workshop Reciclagem E Reutilização De Resíduos Como Materiais De Construção**. Anais. São Paulo: ANTAC, p.21-31 1996..

KHACHANI, M.; HAMIDI, A.; HALIM, M.; ARSALANE, S. Non-isothermal kinetic and thermodynamic studies of the dehydroxylation process of synthetic calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$. **Journal of Materials Environmental Science**, v. 5, p. 615-624, 2013.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. "Mineral admixtures in mortars – Effect of inert materials on short-term hydration", **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1939-1947, 2003

LEÃO, A. L. **Geração de resíduos sólidos urbanos e seu impacto ambiental**. In: Maia, N.B.; Martos, H.L. (coords.). Indicadores ambientais. Sorocaba: [s.n.], 1997.

LE BLOND, J. S.; HOTWELL, C. J.; WILLIAMSON, B. J.; OPPENHEIMER, C. Generation of crystalline silica from sugarcane burning. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 12, p. 1459-1470, 2010.

LIU, S.; LI, Q.; XIE, G.; LI, L.; XIAO, H. Effect of grinding time on the particle characteristics of glass powder. **Powder technology**, v. 295, p. 133-141, 2016.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1244–1256, 2011.

MASSAZZA, F. "Pozzolana and pozzolanic cements. Lea's chemistry of cement and concrete, 4 ed. New York, Wiley, p. 471-631, 1998.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1 ed. São Paulo: Editora Pini, p. 616, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: PINI, 2008.

MITANI, N.; FENG, J. Uptake system of silicone in diferente plant species. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, p.1255-1261, 2005.

MORAES, J. C. B.; AKASAKI, J. I.; MELGES, J. L. P.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M. M. Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 670-677, 2015.

MOREIRA, J. R., GOLDEMBERG, J. "The alcohol program", **Energy Policy**, v. 27, n. 4, pp. 229-245, 1999.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção – Aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Ed. UFC, p.258, 2014.

NUNES, I. H. S. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, 2009.

KAZMI, S. M. S.; MUNIR, M. J.; PATNAIKUNI, I.; WU, Y. F. Pozzolanic reation of sugarcane bagasse ash its role in controlling álcali sílica reaction. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 231-240, 2017.

OERTEL, T.; HUNTTTER, F.; HELBIG, U.; SEXTL, G. Amorphous silica in tultra-high performance concrete: First hour of hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 58, p. 131-142, 2014.

OLIVEIRA, J. R. S. **Modelagem da expansão do concreto devido à raa com decaimento do módulo de elasticidade**. 2013 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná.

ORMAN, A.;HAMOU, A. T. Performance of glass-powder concrete in field application. **Contruccion and Build Materials**, v. 106, p. 84-95, 2016.

PAULA, M.O. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 031, p. 353–357, 2009.

PANDEY, V. C.; SINGH, N. Impact of fly ash incorporation in soil systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment, Amsterdam**, v. 136, n. 1-2, p. 16-27, 2010.

PERRUSO, C. R.; NETO, A. A.; NEUMANN, R.; NASCIMENTO, R. S. V.; FONSECA, M. V. A. Powdered microporous glassess: Changing porosity through aging. **Cerâmica**, v. 44, n. 289, 1998.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P.; Utilization of bagasse ash in hig-strength concrete. **Materials and Design**, v. 34, p. 45-50, 2012.

SAID,H.; LACHEMI,M.; SAHMARAN,M,. HOSSAIN,K,M,A. Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. **Contruccion and Building Materials**, v. 113, p.163 -173, 2016.

SALES, A.; LIMA, S. A.; Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v.30, p. 1114-1122, 2010.

SANCHEZ, L. F.; FOURNIER, B.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. Overall assessment of alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. **Cement and Concrete Research**, v. 93, p.17-31, 2017.

SANTOS, T. J. **Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Córdoba, Argentina 2010.

SARKAR, S. L.; AIMIN, X.; JANA, D. Scanning electron microscopy X-ray microanalysis of concretes. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. (Eds.). **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology**. New Jersey: Noyes Publications, p. 231 –274, 2001

SCHNEIDER, R.; COSTA, I. Reaproveitamento de materiais vítreos obtidos a partir de resíduos de vidraçarias comerciais para a produção de compósitos vidro-cimento:

PRÊMIO 3M DE INOVAÇÃO SOCIAL. PRÊMIO 3M DE INOVAÇÃO SOCIAL. 2018. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/toledo/estrutura-universitaria/assessorias/ascom/noticias/noticias/premio-3m>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

SHAO, Y.; LEFORT, T. MORAS,S.;RODRIGUEZ,D. Studies on concrete containing ground wast glass. **Cenment and Concrete Rsearch**, v. 30, p. 91-100, 2000.

SHI, C.; ZHENG, K. A review on the of waste glasses in the production of cement and concrete. **Resources Conservation & Recycling**, v. 52, p. 234-247, 2007.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Disponível em: <<http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=ProducaoRegional2016.gif>>. Acesso em: 19 set. 2017.

SIMÃOES, L. J.; SAUER, A. S.; TRISTÃO, F. A.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L. Caracterização do resíduo de vidro laminado de parabrisa para utilização como substituto parcial do cimento em matrizes cimentícias. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 22, p.43-49, 2013.

SINGH, N. B; SINGH, V. D,; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1485-1488, 2000.

SOARES, M. M. N. S.; GARCIA, D. C. S.; FIGUEIREDO, R. B.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂. **Cement and Concrete composites**, v. 71, p.20-25, 2016.

SOLIMAN, N. A.; HAMOU, A. T.; Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 243-252, 2017.

SOUTO, G. D. A. B.; POVINELLI, J. **Resíduo Sólido. Engenharia Ambiental – Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Cap. 6 p. 565-588, 2013.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 261-271, 2018.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*, Thomas Telford, 2 ed. London p. 459, 1997

UNICA. União das indústrias de cana-de-açúcar, 2014. **Produção de Cana-de-Açúcar**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/faq/>>. Acesso em: 20 outubro 2017.

UNICA, União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2012. **Histórico do setor-Linha do tempo**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/linhadotempo>>Acesso em: 20 outubro 2017.

VAN VLACK, L. H. *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*, 4 ed. Rio de Janeiro, Campus, p. 567, 1984.

ZUO, R. F.; DU, G. X.; YANG, W. G.; LIAO, L. B., LI, ZHAOHUI, Mineralogical and Chemical Characteristics of a Powder and Purified Quartz From Yunnan Province. **Open Geosciences**, v. 8, p. 606-611, 2016.

WELLENKAMP, F.J. Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão, 1 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 56 p. 1999.

WEISHAUPTOVÁ, Z.; PRIBYL, O.; SYKOROVÁ, I.; RENÉ, M. Effect of the properties of Silurian shales from the Barrandian Basin on their methane sorption potential. **FUEL**, v. 203, p. 68-81, 2017.

YOUNG, J. F., MINDESS, S., GRAY, R. J., BENTUR, A. **The science and technology of civil engineering materials**. New Jersey: Prentice Hall, p. 384, 1998.



LAQMATS

Laboratório de Química de Materiais
e **Tecnologias Sustentáveis**

O Laboratório de Química de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (LAQMATS) compõe o Núcleo de Inovação Industrial da UTFPR e desenvolve atividades de pesquisa de inovação e desenvolvimento tecnológico desde março de 2014. Essa é a primeira dissertação de mestrado do Grupo de Pesquisa. Os resultados obtidos possibilitaram o depósito de um pedido de patente junto ao INPI.