UNIVERSIDADE POSITIVO
JOSÉ ROBERTO WINCKLER

CINZAS DE ***Pinus spp.*** **COMO ADIÇÃO MINERAL OU SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND: VIABILIDADE TÉCNICA** E **AMBIENTAL**

CURITIBA
2021

JOSÉ ROBERTO WINCKLER

CINZAS DE *Pinus spp.* COMO ADIÇÃO MINERAL OU SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND: VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Gestão Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental (PPGAMB), Universidade Positivo.
Linha de Pesquisa: Planejamento, Conservação e Desenvolvimento Socioambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio da Silva Carvalho Filho

CURITIBA
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca da Universidade Positivo - Curitiba - PR
Elaborado pelo Bibliotecário Douglas Lenon da Silva (CRB-9/1892)

W762 Winckler, José Roberto.
Cinzas de Pinus spp. como adição mineral ou substituição parcial ao cimento Portland : viabilidade técnica e ambiental / José Roberto Winckler. - Curitiba: Universidade Positivo, 2021.
141 f. ; il.

Tese (Doutorado) - Universidade Positivo, Programa de Pós-graduação em Gestão Ambiental, 2021.
Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio da Silva Carvalho Filho.

1. Gestão ambiental. 2. Cimento Portland - Aspectos ambientais. 3. Biomassa florestal. 4. Impacto ambiental - Avaliação. 1. Carvalho Filho, Marco Aurélio da Silva. Ii. Título.

CDU 691.54:502(043.2)

Dedico esse trabalho a minha mãe **Ely Silva Winckler,** que ao não se submeter à realidade que a vida lhe impôs, ousou sonhar e realizar. Seus exemplos de resiliência, generosidade e amor incondicional à sua família jamais serão esquecidos.

AGRADECIMENTOS

Entendendo o agradecimento não só como reconhecimento, mas também como reciprocidade, espírito de amizade e amor, agradeço:

Aos meus queridos e amados pais Ernesto e Ely *(in memoriam),* pela vida, ensinamentos, princípios, oportunidades e por sua imensa generosidade, os levarei como exemplo por toda vida.

À minha mulher, companheira e amiga Maristela, por sua obstinação, estímulo, auxílio, compreensão e amor.

Aos meus filhos Lucas e Bruno, por darem sentido a minha vida e tornarem meus dias mais felizes.

Ao meu orientador e amigo Marco Aurélio, por seu auxílio, disponibilidade, paciência, incentivo, confiança e compreensão.

Ao professor Kleber Frank Portella, por sua amizade, parceria e contribuição.

A todos os professores e colaboradores do PPGAMB, da Central de Analítica e dos laboratórios da Escola Politécnica da Universidade Positivo, por seu profissionalismo, dedicação, auxílio e capacidade de facilitar o acesso ao conhecimento.

Aos colegas de aula do PPGAMB, por seu companheirismo e amizade, aos graduandos em engenharia civil da UP, Artur, Leonardo e Pedro por sua parceria.

À Central de análises da UTFPR Campus Pato Branco pela colaboração na realização das análises de DRX. Ao Laboratório de análises de minerais e rochas LAMIR-UFPR pela colaboração na realização das análises de FRX. Aos Laboratórios dos Institutos LACTEC pela realização dos ensaios de caracterização física e de atividade pozolânica. Ao laboratório de solos do IFPR campus Palmas, na pessoa do professor Jessé Rodrigo Fink, por sua colaboração no desenvolvimento de todo o estudo.

Ao Instituto Federal do Paraná - IFPR, que além de disponibilizar sua estrutura e auxílio de seus seNidores, concedeu afastamento integral para participação no programa de Doutorado do PPGAMB da UP. Ao Instituto Federal Fluminense - IFF, que a partir da parceria com o Instituto Federal do Paraná - IFPR, proporcionou a bolsa de estudo junto ao PPGAMB da UP.

Aos empresários e seus colaboradores do setor madeireiro de Palmas-Pr, em especial à Indústria de Compensados Guararapes e à Marini Indústria de Compensados por sua disponibilidade, parceria e fornecimento de amostras. A todos os demais que de alguma forma tornaram possível a minha participação no PPGAMB-UP e contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A utilização das cinzas de *Pinus spp.* (GPS) como adição mineral ou substituição parcial, além de contribuir para a melhoria das características do cimento Portland, pode proporcionar a mitigação de impactos ambientais. Indústrias utilizam a biomassa florestal de *Pinus spp.* como combustível na alimentação de caldeiras para a produção de vapor e energia. As cinzas resultantes deste processo representam aproximadamente 0,3% do volume da biomassa queimada, tornando-se importante passivo ambiental. O cimento Portland é um dos produtos mais consumidos pela humanidade e responsável pela emissão de até 1,0 t de Gases do Efeito Estufa (GEEs) / t de clínquer produzido. Esse estudo analisa as características físicas, químicas e morfológicas da GPS bem como a viabilidade técnica e ambiental de sua utilização em substituição parcial ao clínquer ou em substituição parcial ao cimento Portland em concretos, argamassas ou pastas. A caracterização física foi obtida pelos ensaios: massa específica (2,95 g/cm^3) ABNT- NBR 16605 (2017); superfície específica método de Blaine (9.240 cm^2/g) NBR 16372:2015; finura por peneirador aerodinâmico (5,6%) NBR 12826:2014; granulometria por difração a laser (variação O,1 a 90 µm, médio 22,6 µm). As características químicas e morfológicas foram obtidas pelas análises: química elementar por FRX (SiO_2+ AbO_3+Fe_2O_3 = 62,8%); termogravimétrica (elevado grau de calcinação); fases químicas presentes por DRX (presença da fase amorfa). A atividade pozolânica foi avaliada pelos ensaios: *Chapei/e Modificado* (consumo de 528 mg de Ca(OH)2/g de CPS) NBR 15895:201O; IAP-cal (8,0 MPa) NBR 5751:2015; IAP-cimento (82,0%) NBR 5752:2014. A viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland por CPS foi avaliada pelos ensaios: resistência à tração na flexão (102,05% da REF. com 10% de substituição) NBR 13.279:2005; resistência à compressão (113,49% da REF. com 10,0% de substituição) NBR 13.279:2005; absorção de água (97,27% da REF. com 10,0% de substituição) NBR 9778:2005/2009. Para a avaliação da viabilidade ambiental, foram realizados dois estudos: o primeiro com a simulação de um projeto de MDL, utilizando a metodologia AGM 0005 UNFGGG e princípios da Economia Circular (EC), delimitado para o estado do Paraná, demostrou potencial de obtenção de 9.795 Reduções Certificadas de Emissões (RCEs); no segundo foi realizado um balanço de emissões de CO_2 na produção do cimento Portland e destinação da CPS, com delimitação para o território brasileiro, que demonstrou potencial de mitigação de 20.257 t de CO_2. Os resultados obtidos permitem inferir pela viabilidade técnica e ambiental do uso da CPS como adição mineral pozolânica ou em substituição parcial ao cimento Portland, possibilitando inclusive a aplicação de princípios da Economia Circular, a classificação da CPS como matéria-prima e a implementação de projetos de MDL para a mitigação de emissões de CO_2 e a obtenção de RCEs.

Palavras-chave: Pozolanas. Economia Circular. Mitigação de impactos ambientais.

ABSTRACT

The use of *Pínus spp.* ashes (CPS) as a mineral addition or partial replacement, in addition to contributing to the improvement of the characteristics of Portland cement, can provide mitigation of environmental impacts. Industries use the forest biomass of *Pínus spp.* as fuel in the boiler feed for the production of steam and energy. The ash resulting from this process represents approximately 0.3% of the volume of biomass burned, making it an important environmental liability. The Portland cement is one of the most consumed products by humanity and is responsible for the emission of up to 1.0 t of Greenhouse Gases (GHGs) / t of clinker produced. This study analyzes the physical, chemical and morphological characteristics of the CPS as well as the technical and environmental feasibility of its use in partial replacement for clinker or partial replacement for Portland cement in concretes, mortars or pastes. The physical characterization was obtained by the tests: specific mass (2.95 g/cm^3) ABNT- NBR 16605 (2017); specific surface Blaine's method (9,240 cm^2/g) NBR 16372: 2015; fineness by aerodynamic sieve (5.6%) NBR 12826: 2014; particle size by laser diffraction (range 0.1 to 90 µm, mean 22.6 µm). The chemical and morphological characteristics were obtained by the analyzes: elementary chemistry by FRX ($SiO2$ + AbO_3 + $Fe2O_3$ = 62.8%); thermogravimetric (high degree of calcination); chemical phases present by XRO (presence of the amorphous phase). The pozzolanic activity was evaluated by the tests: *Modífied Chapei/e* (consumption of 528 mg of Ca(OH)2 / g of CPS) NBR 15895: 2010; IAP-cal (8.0 MPa) NBR 5751: 2015; IAP-cement (82.0%) NBR 5752: 2014. The technical feasibility of partial replacement of Portland cement by CPS was evaluated by the tests: tensile strength in flexion (102.05% of REF. With 10% replacement) NBR 13.279: 2005; compression strength (113.49% of REF. with 10.0% replacement) NBR 13.279: 2005; water absorption (97.27% of REF. with 10.0% replacement) NBR 9778: 2005/2009. For the assessment of environmental feasibility, two studies were carried out: the first with the simulation of a COM project using the methodology ACM 0005 UNFCCC and principies of Circular Economy (CE) delimited for the state of Paraná demonstrated the potential to obtain 9,795 Certified Reductions of Emissions (CERs); in the second, a balance of CO_2 emissions was produced in the production of Portland cement and destination of the CPS, with delimitation to the Brazilian territory, which demonstrated a mitigation potential of 20,257 t of CO_2. The results obtained allow us to inter from the technical and environmental feasibility of using CPS as a pozzolanic mineral addition or partially replacing Portland cement, even allowing the application of Circular Economy principies, the classification of CPS as raw material and the implementation of COM for mitigating C02 emissions and obtaining CERs.

Keywords: Pozzolanas. Circular Economy. Mitigation of environmental impacts.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das adições minerais 25

Quadro 2 - Indicadores socioeconômicos do setor florestal e da indústria de madeira sólida em 2018 30

Quadro 3 - Caracterização física da GPS: resultados, comparações e avaliações 87

Quadro 4 - Caracterização química da GPS: resultados, comparações e avaliações 93

Quadro 5 - Índices de atividade pozolânica da GPS: resultados, comparações e avaliações 100

Quadro 6 - Resistências e absorção de água de argamassas com GPS: resultados, comparações e avaliações 106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da metodologia para a avaliação da viabilidade técnica da utilização da GPS como adição mineral ou substituição parcial ao cimento Portland 57
Figura 2 - Fluxograma da metodologia para a avaliação da viabilidade ambiental da utilização da GPS como adição mineral ou substituição parcial ao cimento Portland 58
Figura 3 - Massa específica dos cimentos Portland e da GPS 82
Figura 4 - Superfície específica (Blaine) dos cimentos Portland e da GPS 83
Figura 5 - Distribuição granulométrica da GPS. 86
Figura 6 - Curva termogravimétrica da Polpa de *Pínus spp.* 91
Figura 7 - Curva termogravimétrica da "GPS *ín natura"* 91
Figura 8 - Curva termogravimétrica da "GPS calcinada em mufla" 92
Figura 9 - Difratograma da amostra de GPS 94
Figura 1O - Índice de atividade pozolânica da GPS com a cal 97
Figura 11 - Índice de atividade pozolânica da GPS com o cimento Portland 98
Figura 12 - Comparação da resistência mecânica à tração na flexão de corpos de prova contendo substituição parcial do cimento Portland por GPS 102
Figura 13 - Comparação da resistência mecânica à compressão de corpos de prova contendo substituição parcial do cimento Portland por GPS 103
Figura 14 - Comparação da absorção de água por corpos de prova contendo a substituição parcial do cimento Portland por GPS 104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Designação e limites de composição do cimento Portland 21
Tabela 2 - Requisitos físicos e mecânicos do cimento Portland 22
Tabela 3 - Propriedades químicas dos materiais pozolânicos 27
Tabela 4 - Propriedades físicas dos materiais pozolânicos 28
Tabela 5 - Características físicas de cinzas de casca de arroz 35
Tabela 6 - Características químicas das cinzas de casca de arroz 36
Tabela 7 - Atividade pozolânica de cinzas de casca de arroz 38
Tabela 8 - Resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água de argamassas contendo cinzas de casca de arroz 38
Tabela 9 - Características físicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar 40
Tabela 1O - Características químicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar 40
Tabela 11 - Atividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar 41
Tabela 12 - Resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água de argamassas contendo cinzas de bagaço de cana-de-açúcar 42
Tabela 13 - Percentual de cinzas obtidas pela queima de partes de *Pinus taeda* em diferentes idades 49
Tabela 14 - Estimativa do volume anual de produção de CPS no Estado do Paraná e no Brasil 50
Tabela 15 - Índice de finura dos cimentos Portland e da Cinza de *Pinus spp.* 85
Tabela 16 - Composição química da CPS 88
Tabela 17 - Propriedades químicas da CPS e os parâmetros da ABNT - NBR 12653 (2014/15) 89
Tabela 18 - Índice de atividade pozolânica da CPS - método de *Chapei/e modificado* 96
Tabela 19 - Índice de atividade pozolânica da CPS com a cal - ABNT NBR 5751 (2015) 97
Tabela 20 - Índice de atividade pozolânica da CPS com o cimento Portland ABNT NBR 5752 (2014) 98
Tabela 21 - Traços das argamassas com a substituição parcial do cimento Portland por CPS 101

Tabela 22 - Resistência mecânica à tração na flexão de corpos de prova contendo CPS 101
Tabela 23 - Resistência mecânica à compressão de corpos de prova contendo CPS 103
Tabela 24 - Comparação da absorção de água por corpos de prova contendo substituição parcial do cimento Portland por CPS 105
Tabela 25 - Emissões de CO_2 no transporte CPS para destinação final no Estado do Paraná 107
Tabela 26 - Distâncias médias entre polos geradores de CPS e cimenteiras no Estado do Paraná 108
Tabela 27 - Obtenção de RCEs com o uso da CPS em substituição parcial ao clínquer 109
Tabela 28 - Mitigação das emissões de CO_2 com o uso da CPS em substituição ao clínquer, em função das distâncias de transporte da CPS até cimenteiras 111
Tabela 29 - Balanço financeiro das receitas de venda de RCEs e dos custos anuais de transporte da CPS, em função da distância até as cimenteiras 112
Tabela 30 - Emissões anuais de CO2 na produção de cimento Portland no Brasil 113
Tabela 31 - Emissões de CO_2 no transporte da CPS para destinação final no Brasil 113
Tabela 32 - Emissões de CO_2 no transporte de CPS para indústrias de mix no Brasil 114
Tabela 33 - Balanço das emissões anuais de CO_2 com a substituição parcial do cimento Portland por CPS 114
Tabela 34 - Mitigação anual das emissões de CO2 com a substituição parcial do cimento Portland por CPS, em função das distâncias de transporte até as indústrias de mix 115

LISTA DE SIGLAS

CPS = Cinza de *Pinus spp.*

EC = Economia circular

GEEs = Gases de efeito estufa

IAP = Índice de atividade pozolânica

kt = Quilotonelada

MDL = Mecanismo de desenvolvimento limpo

MPa = Megapascal

Mt = Megatonelada

PIB = Produto Interno Bruto

RCE = Reduções certificadas de emissões

REF. = Corpo de prova de referência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **14**

1.1 OBJETIVOS 15

1.1.1 Objetivo geral 15
1.1.2 Objetivos específicos 16

2 REVISÃO DE LITERATURA **17**

2.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E O USO DE RECURSOS 17

2.1.1 Cimento Portland 18
2.1.2 Adições minerais 24
2.1.3 Materiais pozolânicos 26

2.2 SETOR FLORESTAL MADEIREIRO 29

2.3 CADEIA PRODUTIVA DO *Pinus spp.* 31

2.4 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS 32

2.5 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS 34

2.5.1 Resíduos de *Pínus spp.* 47

2.6 CINZA DE *Pinus spp.* - CPS 48

2.7 CINZAS COMO MATÉRIA-PRIMA E A ECONOMIA CIRCULAR 51

2.8 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO - MDL 53

3 MATERIAIS E MÉTODOS **57**

3.1 MATERIAIS 59

3.1.1 Polpa de *Pínus spp.* 59
3.1.2 CPS - Cinza de *Pínus spp.* 59
3.1.3 Cimento Portland 60
3.1.4 Cal hidratada 60
3.1.5 Agregado miúdo 61
3.1.6 Água 61

3.2 MÉTODOS 61

3.2.1 Viabilidade técnica da utilização da CPS 62
3.2.1.1 Preparo da polpa de *Pínus spp.* 62
3.2.1.2 Preparo da CPS 62
3.2.1.3 Caracterização física da CPS 64
3.2.1.4 Caracterização química da CPS 65

3.2.1.5 Caracterização morfológica da CPS 66
3.2.1.6 Atividade pozolânica da CPS 66
3.2.1.7 Substituição parcial do cimento Portland por CPS 67
3.2.2 Viabilidade ambiental na utilização da CPS 68
3.2.2.1 CPS como adição mineral ao cimento Portland e a obtenção de RCEs 69
3.2.2.2 CPS em substituição parcial ao cimento Portland e as emissões de CO2 77

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 82

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA CPS 82

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CPS 88

4.3 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA CPS 94

4.4 POTENCIAL POZOLÂNICO DA CPS 95

4.5 CPS EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND 100

4.6 IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETO DE MDL E OBTENÇÃO DE RCE 107

4.7 BALANÇO DAS EMISSÕES DE CO2 113

5 CONCLUSÕES 117

REFERÊNCIAS 119

ANEXOS 131

1 INTRODUÇÃO

A cobertura florestal no Brasil está entre as maiores do mundo, não só em valores absolutos, mas também proporcionalmente ao seu território. Além das florestas nativas, as florestas plantadas apresentam grande importância, colocando o Brasil entre os principais produtores mundiais. As florestas de *Pinus spp.* no Brasil representam aproximadamente 20,0% das florestas plantadas, com um volume de produção de madeira de 49,7 milhões de m^3 ou 22,5% do total de madeira de silvicultura no ano de 2018. Para cada m^3 de madeira de *Pinus spp.* industrializada são gerados aproximadamente 0,26 t de resíduos de biomassa que são encaminhados para a queima em caldeira. Existem vantagens na queima de resíduos de biomassa de florestas plantadas em comparação a outros combustíveis como os hidrocarbonetos, pois além de serem recursos renováveis e terem um menor custo de obtenção, apresentam a capacidade de realizar o "sequestro do carbono" em seu processo produtivo, uma das formas de mitigação do efeito estufa. A utilização de caldeiras tem por objetivo a produção de vapor e a cogeração de energia, ocorrendo também geração de cinzas residuais que representam entre 0,20% a 0,42% do volume da biomassa, sendo possível estimar no Brasil uma produção de cinzas de *Pinus spp.* (que será denominada na sequência deste trabalho por "CPS") na ordem de aproximadamente 40.000 t/a. O elevado volume de CPS gerado se associado ao transporte e a disposição inadequada pode causar importantes impactos financeiros e ambientais. A utilização das cinzas como matéria-prima em substituição parcial ao clínquer ou em substituição parcial ao cimento Portland em concretos, argamassas e pastas apresenta-se como uma alternativa em potencial para sua destinação.

O cimento Portland é o produto industrializado mais consumido mundialmente, com um volume total de produção de aproximadamente 56,6 milhões t no Brasil em 2019. Sua cadeia produtiva apresenta grande potencial de causar impactos ambientais, pela alteração dos ambientes naturais na obtenção dos insumos e, principalmente, pelas emissões de materiais particulados, CO_2 e outros gases nos processos de mineração, transporte da matéria prima e fabricação do cimento Portland. A utilização de resíduos de outros processos como as cinzas de biomassa e neste caso mais especificamente a CPS como adição mineral

pozolânica na industrialização do cimento Portland, vem de encontro aos princípios da Economia Circular (EC), podendo proporcionar a mitigação de impactos ambientais tanto nos processos de destinação das cinzas como na industrialização do cimento Portland.

O desenvolvimento do presente estudo justifica-se pela lacuna encontrada no conhecimento tecnológico mundial, observada pela sua ausência nas bases de dados, quando pesquisadas publicações sobre a viabilidade técnica da destinação da cinza de *Pinus spp.* em substituição parcial ao clínquer ou em substituição parcial ao cimento Portland, bem como sua viabilidade ambiental na mitigação de emissões de CO_2, dentro da dinâmica da Economia Circular (EC). Visando preencher a lacuna observada, foi desenvolvido o presente estudo, que está dividido em cinco capítulos e as referências bibliográficas. O Capítulo 1 faz uma introdução ao tema apresentando a justificativa para o desenvolvimento desse estudo bem como seus objetivos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura com o objetivo realizar o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento metodológico, as discussões dos resultados e as conclusões. O Capítulo 3 apresenta e descreve os materiais utilizados, as normas e metodologias aplicadas na realização dos ensaios, bem como as metodologias e equações utilizadas nas simulações dos projetos de emissões. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as discussões sobre os resultados, através da comparação com os parâmetros normativos e com resultados observados na literatura. O Capítulo 5 apresenta as conclusões sobre os resultados e discussões, as quais passam a compor a tese doutoral. Nas referências são listados todos os trabalhos utilizados como base referencial teórica para o desenvolvimento desse estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Determinar a viabilidade técnica e ambiental da utilização da cinza de *Pinus spp.* como adição mineral ou substituição parcial ao cimento Portland.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física, química, morfológica e da atividade pozolânica da GPS;
- Avaliar o potencial de mitigação de emissões de $G0_2$ na utilização da GPS como matéria-prima.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E O USO DE RECURSOS

As atividades relacionadas a toda a cadeia produtiva da construção civil possuem um elevado potencial de geração de impactos ambientais ao se apresentarem como as maiores consumidoras de recursos naturais (LIMA, 2008). No Brasil a construção civil é responsável por aproximadamente 14% do PIB, para tanto, utiliza entre 20% e 50% do volume de recursos naturais consumidos pela sociedade (MESQUITA, 2012). Dadas as suas características de grande consumidor de matérias-primas, diversidade de produtos utilizados nas diferentes etapas do processo construtivo e levando em consideração a crescente busca pela redução de custos, demonstra ótimo potencial para o consumo de resíduos de outras cadeias produtivas (ROCHA & CHERIAF, 2003). Porém, o uso de resíduos como matéria-prima passa pela busca de nichos que cada resíduo possa atender e deve ser feito com a utilização de critérios técnico-científicos os quais considerem não só as características qualitativas expressas pela textura, forma, granulometria, cor e a sua capacidade de aglutinação, mas também, tendências de seu comportamento ao longo prazo, de forma a prevenir riscos de contaminação nas edificações e impactos ao meio ambiente (ROCHA & CHERIAF, 2003).

Por consumir uma grande quantidade de recursos naturais e energia, o setor da construção civil tem buscado estratégias para a utilização de resíduos, principalmente em função de três principais benefícios: redução da demanda por novos recursos, minimização dos custos de transporte e produção e, uso de materiais residuais que, de outra forma, seriam destinados a aterros industriais (POUEY, 2006). A utilização de materiais residuais pode proporcionar também a redução no consumo de energia e nas emissões de CO2, uma vez que a utilização de resíduos geralmente exige menos energia em comparação ao processamento de estoque virgem e também pode diminuir as necessidades de transporte e suas influências associadas (UMAR *et ai.,* 2020). Neste sentido, a avaliação da viabilidade técnica de utilização de determinado resíduo como matéria-prima deve servir como etapa inicial para uma análise sistêmica e holística capaz de evidenciar outros

aspectos como os econômicos e ambientais, proporcionando o desenvolvimento de novas tecnologias que culminem na viabilização de seu uso (LIMA, 2008).

O cimento Portland é um insumo de fundamental importância na cadeia produtiva da construção civil, uma vez que se apresenta como um componente básico de concretos, argamassas e pastas, podendo também ser classificado como o material feito pelo homem mais utilizado no planeta (SNIC, 2019). Por suas características, o cimento Portland pode ser empregado em todas as etapas dos processos construtivos, se constituindo como um dos materiais mais utilizados na construção civil. O conhecimento de suas características torna-se fundamental para estudos que visem discutir aspectos de sua utilização.

2.1.1 Cimento Portland

Apresenta-se com um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, com capacidade de endurecer em presença de água, formando uma pasta homogênea que durante o processo de cura adquire rigidez conservando a sua estrutura, mesmo tendo novos contatos com a água (ABCP, 2002). Segundo SNIC (2019) o cimento Portland é o mais utilizado mundialmente, sua fabricação tem como principais matérias-primas a argila e o calcário, constituindo-se basicamente por silicatos de cálcio, alumina e óxidos de ferro reativos, responsáveis pela adesividade e estabilidade do cimento quando hidratado **(MEHTA** & MONTEIRO, 2014). De acordo com SNIC (2019b), o resumo do processo produtivo do cimento Portland pode ser feito conforme com as seguintes etapas:

- **Extração de matérias-primas:** Máquinas pesadas extraem em depósitos calcários naturais o material essencial para a produção do cimento Portland que é o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Além deste, outras pequenas quantidades de materiais classificados como "corretivos", como minério de ferro, bauxita, xisto, argila ou areia, são também escavados a partir de minas, sendo utilizados quando necessários para fornecer conteúdos extras de óxido de ferro (Fe_2O_3), alumínio (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), visando adequar a composição química da farinha crua necessária ao processo de fabricação e aos requisitos do produto;

- **Britagem:** Os materiais são fragmentados (<10 cm) e transportados para a fábrica de cimento;
- **Preparação da farinha crua:** no processo chamado "pré-homogeneização", as diferentes matérias-primas são dosadas e misturadas para manter a composição química necessária. Posteriormente, o material é moído obtendo-se então a "farinha crua".
- **Tratamento das matérias-primas e combustíveis alternativos: A** indústria do cimento tem buscado elevar o grau de coprocessamento de subprodutos e resíduos gerados em outras atividades industriais. Esses materiais são normalmente utilizados como substitutos de matérias-primas usadas na produção da farinha crua ou de combustíveis usados no processo de queima. Por variar amplamente de natureza, tais materiais precisam ser previamente preparados antes de sua utilização.
- **Pré-aquecimento:** a farinha crua é conduzida através de uma série de ciclones verticais entrando em contato com gases quentes advindos do forno que se movem na direção oposta. Com o pré-aquecimento da farinha crua antes de entrar no forno rotativo, ocorrem parte das reações químicas necessárias para a formação do clínquer de forma mais precoce e eficiente.
- **Pré-calcinação:** A calcinação é a decomposição do calcário para formação de óxido de cálcio (CaO), principal óxido constituinte do clínquer. O calcário submetido ao calor sofre uma decomposição térmica dando origem ao clínquer, conforme a reação de calcinação representada pela equação (1):

$$CaCO_3(s) \xrightarrow{\text{Calor}} CaO(s) + CO_2(g) \quad (1)$$

Parte dessa reação ocorre em uma câmara de combustão localizada na parte inferior do pré-aquecedor ou "pré-calcinador", e parte no interior do forno rotativo.

- **Produção de clínquer no forno rotativo:** O combustível queimado no forno alimenta um maçarico que proporciona temperaturas de até 1.450 ºC. A farinha pré-calcinada entra no forno rotativo, que gira cerca de três

a cinco vezes por min e ao deslizar, cai através de zonas cada vez mais quentes em direção à chama. As reações químicas e físicas provocadas pelo calor intenso fundem parcialmente a farinha, transformando-a em clínquer Portland. A decomposição química do calcário geralmente é responsável por emitir de 60% a 70% dos totais de GEEs. A queima de combustível gera o restante das emissões.

- **Resfriamento e armazenamento:** O clínquer, que se encontra em temperaturas superiores 1.000 ºC, é resfriado rapidamente para até 100 ºC, por meio de ar frio soprado para dentro do forno por um resfriador. Ao absorver calor, o ar é reaproveitado na queima dos combustíveis melhorando a eficiência térmica do forno.
- **Moagem do cimento:** Após o resfriamento o clínquer é misturado com gesso e passa por um processo de moagem até se transformar no cimento Portland comum. Na produção de todos os tipos de cimento são adicionados cerca de 3% a 4% de gesso, que funciona como controlador do tempo de pega do produto. Nos cimentos especiais, outras adições são feitas ao cimento Portland, sendo sua moagem realizada em conjunto com o clínquer ou em separado.
- **Armazenamento em silos para despacho e embalagem:** Ao final do processo, o produto final obtido é então homogeneizado e armazenado em silos para posterior encaminhamento aos clientes.

Devido à queima de combustíveis e à calcinação do calcário, o fabrico de 1,0 t de cimento libera até 1,0 t de CO_2, sua fabricação é atualmente responsável por 8 a 9% do total CO_2 antropogênico e de 2 a 3% do consumo de energia global, com projeções sugerindo um aumento de 50% na produção anual de cimento até 2050 (MONTEIRO *et ai.,* 2017). Para SNIC (2019b), a indústria do cimento brasileira comparativamente ao resto do planeta apresenta um dos menores índices de emissão específica de CO_2, advindo tal condição das ações mitigadoras implementadas pelo setor, que observou um aumentou na produção de 273% entre 1990 e 2014 (de 26 Mt para 71 Mt), com um crescimento no total de emissões de 223% nesse intervalo de tempo. As diminuições proporcionais das emissões se deram em virtude da redução de 18% das emissões específicas de 700 kg CO_2/t cimento para 564 kg CO_2/t cimento (SNIC, 2019). Os principais fatores responsáveis

pela melhora na eficiência nesse período foram diminuição do consumo térmico específico em 17%, aumento do uso de combustíveis alternativos de 5% para 19% e elevação de 20% para 33% de substitutos do clínquer (SNIC, 2019). As emissões/ t de cimento Portland variam bastante, tendo-se valores entre 173 kg de CO_2/t e 823 kg CO_2/t, dependendo da classificação de cada tipo distinto em relação à norma brasileira (ABNT - NBR 16697, 2018), que determina os limites para o teor de clínquer contido no cimento (POSSAN, 2019). Como o teor de clínquer contido no cimento pode variar de 20 a 95% e as emissões de CO_2 são proporcionais ao teor de clínquer, quanto menor esse teor, menores as emissões associadas a sua produção (POSSAN, 2019). A Tabela 1 apresenta a designação e os limites de composição do cimento Portland.

Tabela 1 - Designação e limites de composição do cimento Portland

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + Sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum		CPI	25, 32 ou 40d	RSb ou BC[e]	95-100	0-5		
		CP I-S			90-94	o	o	6-10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP Ii-E			51 -94	6-34	o	0-15
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP 11-Z			71 -94	o	6-14	0-15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP 11-F			75- 89	o	o	11-25
Cimento Portland de alto forno		CP Iii			25- 65	35- 75	o	0-10
Cimento Portland pozolânico		CPIV			45- 85	o	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CPV[a]			90 - 100	o	o	0-10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25,32 40 ou		75 - 100			0 - 25
	Não Estrutural				50 74			26-50

[a] No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias wanuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Significa resistente a sulfatos.

e Significa baixo calor de hidratação.

d As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

e Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

OBSERVAÇÕES: As siglas S, E, Z ou F representam a adição que foi aplicada na composição do cimento CP I ou CP 11, não aparecendo nos demais, já que o CP Iii possui uma adição predominante de escória, o CP IV, pozolana, e o CP V, apenas material carbonático. O Cimento Portland comum possui a representação S nas suas adições, já que a composição do material é abaixo de 5%, podendo ser de escória, pozolana ou *filler* (Material Carbonático). O Cimento composto é modificado, pois todos possuem ao menos uma adição acima de 5% da constituição do aglomerante. Com isso, cada inicial representa o material incorporado: E - Escória granulada de alto forno (Quando se exige desprendimento de muito calor e resistência ao ataque por sulfatos); Z - Pozolana (Produz concreto mais impermeável, ou seja, mais durável); F - *Filler* (Para aplicações gerais de piso ou concreto simples)

Adaptado de ABNT - NBR 16697 (2018)

Segundo SNIC (2019b), a principal alternativa observada pela indústria cimenteira brasileira na busca para mitigar suas emissões está na redução na quantidade de clínquer no cimento. Estimou-se que com uma redução da razão

clínquer/cimento de 67% em 2014, para 52% em 2050, será possível evitar a emissão cumulativa de 290 milhões t de CO_2, representando algo em torno de 69% do potencial de redução estimado pelo setor até o ano de 2050 (SNIC, 2019b). Com a expansão projetada da demanda e produção de cimento na ordem de 60 a 120% até o ano de 2050, observa-se uma redução proporcional na disponibilidade de escórias siderúrgicas e cinzas volantes no longo prazo, o que está levando o setor a buscar outras soluções, como ampliar o uso de *fíller* calcário, argilas calcinadas e cinzas de biomassa (SNIC, 2019). A produção de cimentos Portland com a utilização de adições proporciona importantes reduções nas emissões de CO2, pela diminuição da proporção de clínquer no cimento, diminuição da queima de combustíveis e das emissões por calcinação/descarbonatação do calcário, além de contribuir para diminuição do uso de recursos naturais e a preservação de jazidas (REZENDE, 2016). Na produção dos diferentes tipos de cimento Portland, alguns requisitos físicos e mecânicos devem ser observados, de acordo com a ABNT - NBR 16697 (2018), os quais, de acordo com os interesses dessa pesquisa estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Requisitos físicos e mecânicos do cimento Portland

Sigla[a]	Classe de resistência	Finura	Resistência à compressão	
		Resíduo na peneira 75 µm %	7 dias	28 dias
CPI CP 1-S CP Ii-E CP 11-F CP 11-Z	25	:5 12,0	15,0	25,0
	32	:5 12,0	20,0	32,0
	40	:5 10,0	25,0	40,0
CP IIi CP IV	25	:5 8,0	15,0	25,0
	32	:5 8,8	20,0	32,0
	40	:5 8,0	23,0	40,0
CPV	ARI	:5 6,0	34,0	
CPB Estrutural	25b	:5 12,0	15,0	25,0
	32b	:5 12,0	20,0	32,0
	40b	:5 12,0	25,0	40,0
CPB Não estrutural		:5 12,0		10,0

[a] Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.
[b] Resíduo na peneira 45 µm.

Adaptado de ABNT - NBR 16697 (2018)

O cimento Portland ao ser utilizado como insumo na produção de concretos, argamassas e pastas passa obrigatoriamente pelo processo de hidratação, onde as

reações de hidratação definirão as características técnicas finais da matriz cimentícia. Os aspectos gerais relacionados ao processo de hidratação do cimento Portland são apresentados a seguir.

2.1.1.1 Reações de hidratação do cimento Portland

Quase que imediatamente após a hidratação começam a ocorrer reações químicas entre os silicatos e os aluminatos através de mecanismos distintos com o passar do tempo, iniciando com a dissolução dos compostos anidros e a formação de hidratos na solução, que em função das baixas solubilidades são precipitados (SOUTO, 201O). Na sequência, em função das restrições na mobilidade iônica, o processo de hidratação passa a ocorrer por reações no estado sólido (MEHTA & MONTEIRO, 2014). A hidratação do cimento Portland forma principalmente dois compostos, conforme as Equações (2) e (3).

$$2C3S + 6H \text{ -} C3S2H3 + 3CH \quad (2)$$

$$2C2S + 4H \text{ -} C3S2H3 + CH \quad (3)$$

Com a hidratação dos silicatos e aluminatos formam-se os C-S-H (silicato de cálcio hidratado) tem-se o início da aglomeração e o ganho progressivo de resistência através da formação de agulhas de etringita, responsáveis pelo início de pega e pela resistência inicial (IKEMATSU; LAGUNA, 2009). Em um segundo momento, quando a mistura deixa de ser deformável transformando-se em uma massa rígida, ocorre o fim da pega e o início da etapa do endurecimento da pasta (CORDEIRO, 2006). Após o processo final de endurecimento e cura, a segurança quanto à resistência e durabilidade de materiais cimentícios requer a realização de ensaios que atestem seu atendimento aos padrões definidos em norma. Os ensaios de resistência podem ser realizados utilizando-se da norma ABNT - NBR 7680-1 (2015), que trata da resistência à compressão axial de estruturas e concreto ou ABNT - NBR 13279 (2005), que trata da resistência mecânica à tração na flexão e resistência mecânica à compressão de argamassas. Os principais fatores responsáveis pelo aumento na resistência à compressão estão ligados à redução na

porosidade da matriz cimentícia e da zona de transição (POGGIALI, 201O). Os fatores responsáveis pelo aumento na resistência à compressão dos concretos são basicamente os mesmos que levam ao aumento na resistência à tração (FONSECA, 201O). Caso a elevação da resistência à compressão tenha ocorrido em função do efeito *fíller,* não garantirá um aumento de mesma proporção na resistência à tração, pois um aumento significativo da resistência à tração só ocorrerá a partir da consolidação das reações pozolânicas das adições minerais, em consequência da redução nos tamanhos e nas concentrações dos cristais de hidróxido de cálcio presentes na zona de transição (DAL MOLIN, 2011). Para a avaliação da durabilidade das estruturas de concreto, podem ser realizados ensaios utilizando a norma ABNT - NBR 9778 (2005/2009), que trata da absorção de água, principal fator de influência na durabilidade de materiais cimentícios (SOUTO, 201O). A obtenção de propriedades como maiores resistência à compressão e tração e maior durabilidade associada aos menores índices de absorção de água em matrizes cimentícias, estão diretamente ligadas à presença de adições minerais no cimento Portland, principalmente as pozolânicas (DE PAULA *et ai.,* 2009). Para Mehta e Monteiro (2014), as adições minerais normalmente são caracterizadas por serem ricas em sílica reativa e por seu elevado grau de finura, características que lhes conferem potencial pozolânico ou propriedades cimentantes, podendo assim ser adicionadas ao cimento Portland, concretos argamassas e pastas com o objetivo de melhorar suas propriedades.

2.1.2 Adições minerais

De acordo com Dai Molin (2011), as adições minerais, quanto a sua ação físico-química, podem ser classificadas como:

- materiais pozolânicos: quando apresentarem predominantemente materiais silicosos ou sílico-aluminosos que por si só apresentam pouca ou nenhuma atividade cimentícia. Porém, ao serem finamente divididos e hidratados reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentantes. São representados principalmente pela sílica ativa, cinzas de casca de arroz e metacaulim;

- material cimentante: Caracteriza-se por não necessitar do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o C-S-H. Porém ao ser utilizado como adição ou em substituição em cimento Portland, por estar na presença de hidróxido de cálcio e gipsita ocorre uma aceleração de sua hidratação. Seu processo de auto-hidratação ocorre normalmente de forma lenta, formando uma quantidade de produtos cimentantes insuficientes para seu uso em materiais com fins estruturais. Seu principal representante é a escória granulada de alto forno;
- *"fíller':* São adições minerais que por não possuírem atividades químicas, devem ser finamente divididas. Seu efeito se dá de forma física, em função da melhoria na distribuição granulométrica e de empacotamento. Atuam também como pontos de nucleação facilitando a hidratação dos grãos de cimento. Seus principais componentes são o calcário, pó de quartzo e pó de pedra.

O Quadro 1 apresenta uma classificação de alguns materiais utilizados como adições minerais ao cimento Portland.

Adições	Produtos
Cimentantes	Escória granulada de alto forno.
Cimentantes e pozolânicos	Cinza volante com alto teor de cálcio (CaO > 10,0%).
Super pozolanas	Sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz produzida por combustão controlada (predominantemente amorfa).
Pozolanas comuns	Cinza volante com baixo teor de cálcio (CaO < 10,0%), argilas calcinadas, cinzas vulcânicas.
Pozolanas pouco reativas	Escórias de alto forno resfriadas lentamente, cinza de casca de arroz predominantemente cristalina.
Fíller	Calcário, pó-de-quartzo, pó-de-pedra.

Quadro 1 - Classificação das adições minerais
Adaptado de (DAL MOLIN, 2011)

De acordo com suas características, diversos resíduos podem ser utilizados como adições minerais. A eficiência de uma adição mineral depende de sua composição química, morfologia, granulometria, quantidade utilizada e condições de cura (DAL MOLIN, 2011). A utilização de resíduos como adições minerais

pozolânicas além de melhorar o desempenho técnico do cimento Portland, concretos, argamassas ou pastas, pode também contribuir na diminuição de custos de produção, e na mitigação de impactos ambientais, principalmente no consumo de energia e emissões de GEEs, em função da substituição parcial do clínquer (CORDEIRO, 2006). Para Rezende (2016), são poucas as chances de mitigação de CO_2 pelo uso de combustíveis alternativos e pela substituição do clínquer pela escória de alto forno e cinzas volantes na produção Brasileira de cimento. Justifica a autora que a produção brasileira se encontra em rápida expansão e já é eficiente no uso de combustíveis e a substituição do clínquer por escória de alto-forno e cinza volante é dependente do crescimento da oferta desses materiais, pois atualmente grande parte desses resíduos já é utilizada. Conclui a autora pela possibilidade da substituição parcial do clínquer depender da fabricação de pozolanas artificiais advindas de outros resíduos. A caracterização de materiais como pozolânicos requer o conhecimento das características básicas necessárias para que o material possa ser utilizado em matrizes cimentícias contribuindo para a melhoria de suas características técnicas. Para tanto, apresenta-se a seguir uma revisão de literatura sobre os materiais pozolânicos.

2.1.3 Materiais pozolânicos

Para Mehta e Monteiro (2014), a atividade pozolânica de um material origina-se através da reação pozolânica que ocorre entre o óxido de cálcio (CaO) e os óxidos presentes nas pozolanas conforme descrito na Equação (4).

$$CH + S + H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H \quad (4)$$

Essa reação ocorre de maneira lenta com a liberação de calor. O aumento de sua resistência também ocorre lentamente, chegando ao seu auge aos 91 dias de cura, de maneira diferente ao que ocorre nas pastas de cimento sem pozolana que chegam perto ao auge de sua resistência (entre 90 a 96%) aos 28 dias de cura (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A reação pozolânica consome o hidróxido de cálcio presente na mistura formando então o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), de forma

semelhante ao que é produzido pela hidratação dos silicatos de cálcios presentes no cimento Portland e que foram apresentados nas Equações (2) e (3), proporcionando um aumento na durabilidade da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Essa reação é a principal responsável pela melhoria nas características dos materiais cimentícios atribuídas às pozolanas. Os produtos obtidos pelas reações pozolânicas apresentam grande eficiência por fechar os poros capilares aumentando a resistência e proporcionando um maior grau de impermeabilidade à pasta, além disso, fortalece a interface na zona de transição com os agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A norma ABNT - NBR 12653 (2014/15) que estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso como substitutos parciais do cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, define as pozolanas como: materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, de maneira isolada, apresentam pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas, quando apresentam alto grau de finura e são submetidas a um meio aquoso, reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades aglomerantes, podendo ser classificadas em três classes:

- classe N: pozolanas naturais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- classe C: cinzas volantes, produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas;
- classe E: qualquer material cujos requisitos diferem das classes anteriores e que possa ser classificado como pozolana de acordo com os critérios estabelecidos na mesma norma.

Em função das características químicas e físicas de cada material, foram desenvolvidas classificações dos materiais pozolânicos, as quais são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Propriedades químicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	**Classe do material**		
	N	**e**	**E**
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (% mínima)	70	70	50
SO_3 (% máxima)	4	5	5
Teor de umidade(% máxima)	3	3	3
Perda ao fogo(% máxima)	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na_2O (% máxima)	1,5	1,5	1,5

ABNT - NBR 12653 (2014/15)

Tabela 4 - Propriedades físicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classe do material		
	N	e	E
Material retido na peneira #325 (45 μm) (% máxima)	20,0	20,0	20,0
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias em relação ao controle(% mínima)	90,0	90,0	90,0
Índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias (Resistência mínima MPa)	6,0	6,0	6,0

ABNT - NBR 12653 (2014/15)

Dentre os métodos de ensaio para a avaliação da reatividade pozolânica, encontra-se o de *Chapei/e Modificado.* Segundo Madalena (2013), este método foi inicialmente desenvolvido por J. Chapelle no ano de 1958, tendo como objetivo avaliar um material quanto a sua reatividade pozolânica, tomando como referência o consumo de portlandite em um meio saturado de água. Posteriormente, este método passou por algumas modificações protagonizadas por *Benoit* e *Largent,* em relação ao nível da temperatura, ao tempo de duração do ensaio e com a introdução da agitação constante, passando a ser denominado de método de *Chapei/e Modificado* (MADALENA, 2013). No Brasil, a norma ABNT - NBR 15895 (201O) é a norma padrão a ser utilizada para a realização de ensaios para a avaliação da reatividade pozolânica de um material, pelo método de *Chapei/e Modificado.* Outros métodos que devem ser utilizados na determinação da atividade pozolânica de um material são os descritos pelas normas ABNT NBR 5751 (2015), que trata do índice de atividade pozolânica com a cal e ABNT - NBR 5752 (2014), índice de atividade pozolânica com o cimento.

A ABNT - NBR 16697 (2018), que especifica os requisitos para o cimento Portland, ao tratar da aceitação de um material a ser utilizado como adição pozolânica no processo de produção do cimento Portland, determina a necessidade de realização dos ensaios de atividade conforme a ABNT - NBR 5752 (2014). Para sua aceitação o índice de atividade pozolânica (IAP cimento) deve ser no mínimo de 75 % da resistência obtida pelo corpo de prova de referência (REF.) aos 28 dias de cura.

Análises morfológicas dos materiais também são utilizadas como métodos auxiliares na avaliação da reatividade de materiais pozolânicos. A presença de materiais ricos em sílica e alumina na fase amorfa, bem como sua granulometria extremamente fina (finura), são importantes características utilizadas na

determinação de sua pozolanicidade, uma vez que a instabilidade de uma pozolana se relaciona diretamente com a capacidade de reação com a portlandita na hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A submissão de amostras de pozolanas a equipamentos de difração de raios X permite determinar seu estado morfológico e avaliar a sua capacidade reativa.

A utilização de materiais pozolânicos como adição mineral tem a capacidade de proporcionar características de interesse às matrizes cimentícias e também contribuir para uma diminuição da proporção de clínquer no cimento Portland. Porém, para a definição do efetivo emprego de materiais classificados como pozolânicos, deve ser avaliada a sua disponibilidade, principalmente em função do aumento do volume de produção do cimento Portland e da possível elevação da demanda por esses materiais pela indústria cimenteira (REZENDE, 2016). Sendo assim, as cinzas de biomassa oriundas do setor florestal madeireiro, como a GPS, devem ser estudadas quanto ao seu potencial de uso, podendo contribuir no suprimento da demanda futura.

2.2 SETOR FLORESTAL MADEIREIRO

O setor florestal pode ser dividido em florestas naturais e florestas plantadas. As florestas plantadas têm assumido papel de destaque na economia do Brasil e do mundo ao fornecer divisas, emprego e renda e por ser fonte sustentável de uma gama de produtos madeireiros (lenha, madeira em tora para serraria, laminação, celulose e outros usos) e não madeireiros (folhas, óleos essenciais, frutos, látex, resina e outros) (IBÁ, 2019). Do ponto de vista ambiental, apresentam a capacidade de contribuir com a preservação do solo e de rios, ser fonte de energia renovável e atuar na redução dos gases de efeito estufa na atmosfera (IBÁ, 2019). Segundo a FAO (2020), do ponto de vista global, as florestas ocupam 4,06 bilhões de ha o que representa 31,0% das áreas de terra do planeta, com as florestas plantadas representando cerca de 7,0% desse total e apresentaram crescimento passando de aproximadamente 170 milhões de ha em 1990 para 290 milhões de ha em 2020. Já em 2018, as áreas florestadas no Brasil foram estimadas segundo o SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (2019), em aproximadamente 500 milhões de ha (59,0%

do seu território), o que representava a segunda maior área de florestas do mundo. Observava-se uma predominância das florestas naturais (aproximadamente 98,%), com ênfase àquelas localizadas na região norte e os restantes (aproximadamente 2,0%) florestas plantadas, constituídas de forma predominante por espécies exóticas, principalmente dos gêneros *Euca/yptus spp.* e o *Pinus spp.* (IBÁ, 2019). Já em 2018, as florestas manejadas economicamente representavam aproximadamente 45% das florestas plantadas (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2019). No Brasil, segundo IBÁ (2019), as florestas plantadas ocupavam uma área de 7,84 milhões de ha em 2018, para o IBGE (2019) aproximadamente 9,9 milhões de ha. As floretas plantadas foram responsáveis pela produção de aproximadamente 247,5 milhões de m^3 de material lenhoso já no ano de 2018 (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2019b). A importância socioeconômica do setor para o Brasil pode ser evidenciada pelas informações contidas no Quadro 2.

Indicador	Setor florestal	Indústria de madeira sólida
Valor bruto da produção	R$ 82,8 bilhões (1,20% do PIB brasileiro)	R$ 18,5 bilhões (0,27% do PIB nacional)
Geração de empregos	599 mil (1,30% do total de empregos no Brasil)	336 mil (0,7% do total dos empregos gerados no Brasil)
Arrecadação Tributária	US$ 7,2 bilhões (1,5% do total da arrecadação nacional)	US$ 2,3 bilhões (< 1,0% do total da arrecadação nacional)
Exportações	US$14,1 bilhões (5,87% do total de exportações brasileiras)	US$ 2,61 bilhões (1,09% do total de exportações brasileiras)
Balança comercial	US$ 12,9 bilhões . (21,99% do total no Brasil)	US$ 2,55 bilhões . (4,35% do total no Brasil)

Quadro 2 - Indicadores socioeconômicos do setor florestal e da indústria de madeira sólida em 2018
Adaptado de (ABIMCI, 2019)

A distribuição percentual da propriedade das áreas das florestas plantadas no Brasil mostra que 35% são das indústrias de celulose e papel, outros 30% de produtores não verticalizados, 13% do setor siderúrgico, 9% de Organizações de Investimento em Produção de Madeira - TIMOS (sigla de *Timber Investment Management Organizations),* 6% dos setores de painéis e pisos, 4% de produtos sólidos de madeira e 3% de outros (MAPA, 2018). Dados do IBGE (2019) apontavam que no Brasil as florestas plantadas com *Pinus spp.* correspondiam a aproximadamente 2,0 milhões de ha ou 20,1% da área total plantada. A cadeia produtiva do *Pinus spp.* no Brasil apresenta características importantes,

principalmente ligadas ao desenvolvimento econômico e à substituição do uso de madeiras nativas como a *Araucária angustifolia* pelo setor madeireiro (AGUIAR *et ai.,* 2014).

2.3 CADEIA PRODUTIVA DO *Pinus spp.*

As árvores do gênero *Pinus spp.* pertencem à ordem das coníferas e ao grupo das gimnospermas, tendo sua ocorrência de forma natural na Ásia, Europa, América do Norte e Central, ocorrendo de forma exótica no continente Sul-americano (AGUIAR *et ai.,* 2014). A importância dada ao cultivo das árvores do gênero *Pinus spp.* no Brasil, se deu em função: da sua rusticidade e tolerância, que permitiram seu plantio em solos com características inadequadas à produção agrícola; por apresentar uma madeira de coloração clara e fibras longas apropriadas para a fabricação de papel; pela sua capacidade de produção e extração de resina em escala comercial; por suas características paisagísticas e ornamentais; e, sua grande diversidade de aplicações pelas indústrias (AGUIAR *et ai.,* 2014). Além disso, com o desenvolvimento tecnológico aplicado sobre o cultivo e a industrialização do *Pinus spp.* foi possível o abastecimento das indústrias e substituição da exploração da Araucária, trazendo importantes contribuições na preservação dos ecossistemas florestais nativos (AGUIAR *et ai.,* 2014).

Por suas características de solo, clima e tecnologia adotada, a produtividade dos plantios de *Pinus spp.* no Brasil tem sido a maior do planeta, com aproximadamente 30,1 m^3/ha/a (IBÁ, 2019). Da mesma forma, apresenta uma das rotações mais curtas (considerando o tempo decorrido entre o plantio e a colheita) entre todos os principais países produtores de *Pinus spp.* (IBÁ, 2019). No ano de 2018, o volume de produção de *Pinus spp.* no Brasil foi de 49,7 milhões m^3, o que representou 22,5% do total de madeira de silvicultura (IBÁ, 2019). Os plantios de florestas de *Pinus spp.* estão concentrados na região sul do Brasil, principalmente em função das condições climáticas favoráveis ao seu cultivo, com invernos mais acentuados e temperatura média anual mais baixa em relação ao restante do país (APRE, 2018). Pela proximidade com a matéria-prima, a região sul concentra também as empresas e segmentos florestais associados ao consumo e produção de

madeira de *Pinus spp.* (APRE, 2018). Nos processos de extração e industrialização do *Pinus spp.,* ocorre a geração de resíduos dessa biomassa, os quais são encaminhados para a alimentação de caldeiras na produção de vapor e cogeração de energia e tendo também como resultando as cinzas residuais, também denominadas de resíduos agroindustriais.

2.4 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

O CONAMA (2002) define os resíduos sólidos industriais, como aqueles resultantes de atividades industriais e que se apresentam nos estados sólido, semissólido ou gasoso (quando contido e líquido), que apresentem características que inviabilizem seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos de água, ou que demandem para o seu lançamento, a adoção de soluções técnicas viáveis do ponto de vista econômico e considerando a melhor tecnologia disponível. Para a ABNT NBR 10004 (2004), os resíduos industriais devem ser classificados como:

> Resíduos Classe 1 - Perigosos: são os resíduos ou mistura de resíduos que, devido às suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade podem representar risco à saúde pública e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma errônea.
> Resíduos Classe 11 - Não Perigosos
> Resíduos Classe li A - não inertes: são os resíduos que apresentam propriedades como solubilidade em água, biodegradabilidade ou combustibilidade.
> Resíduos Classe li B - inertes: resíduos que, quando amostrados de forma representativa e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez e sabor.

Para BAIN *et ai.* (201O), resíduos industriais de uma empresa podem ser utilizados como insumo para outras empresas. A reutilização de resíduos industriais - RRI (ou IWR - industrial wast reuse) se apresenta como uma alternativa para mitigar problemas de emissão de carbono. A RRI pode contribuir na redução de emissão de carbono em função da substituição do uso de recursos naturais por resíduos industriais, reduzindo assim tanto o consumo de recursos primários quanto da energia necessária para sua obtenção transporte e transformação (DONG *et ai.,* 2014). Segundo ELLEN MACARTHUR FUNDATION (2013), atualmente a maioria

dos recursos materiais apresenta baixas taxas de recuperação ao final da sua (primeira) vida util, em comparação com as suas taxas de fabricação primárias, mesmo assim, em termos de volume, cerca de 82 bilhões de t deverão entrar nos sistemas econômicos de produção em 2020. Na Europa em 201O, apenas cerca de 40% do que foi inicialmente processado, foi reutilizado, reciclado ou compostado e digerido, tendo taxas de reciclagem atuais significativas, apenas para um pequeno grupo de resíduos, principalmente aqueles que ocorrem de forma homogênea e em grandes volumes. (ELLEN MACARTHUR FUNDATION, 2013). Vários fatores afetam a demanda pela reutilização de materiais em processos industriais, como aspectos econômicos, desenvolvimento tecnológico e estrutura de mercado. A economia de energia baseada na reutilização de materiais é muito importante para as economias em desenvolvimento e, além disso, a reutilização de materiais oferece vantagens quando se trata de considerações sobre mudanças climáticas evitando aumentos significativos de emissões de GEEs mitigando a decomposição de resíduos orgânicos em aterros (BAIN *et ai.,* 201O).

Para Lima (2008), a busca pelo desenvolvimento e uso de tecnologias que possibilitem a utilização de resíduos dentro do próprio processo gerador ou em processos paralelos está em evidência, se destacando a utilização de resíduos como combustível na produção de energia. A prática da queima de resíduos, além da produção de energia, possibilita a redução de seu volume, tendo como consequência a geração de novos resíduos como: lodo, escórias e cinzas, que deverão então ter seu destino definido de acordo com a legislação ambiental e a melhor tecnologia disponível (LIMA, 2008). Dentre os resíduos agroindustriais, as cinzas de origem vegetal são destacadas por Freire e Beraldo (2013), pelo seu volume e por sua composição química, física e morfológica, normalmente caracterizadas pela presença de sílica no estado amorfo e finura adequada, características necessárias para uma matéria-prima ser utilizada como adição mineral ao cimento Portland. Caso a sua composição química lhe proporcione reatividade com o Ca(OH)2 em meio aquoso, as cinzas poderão ser classificadas e utilizadas como adição mineral pozolânica (FREIRE; BERALDO, 2013). A viabilidade do uso dos resíduos industriais, com ênfase às cinzas de biomassa em matrizes cimentícias, tem sido objeto de estudos, principalmente visando identificar aspectos que favoreçam a sua utilização como matéria-prima, os quais são apresentados a seguir.

2.5 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Em diversos processos, resíduos orgânicos são queimados para reduzir seu volume ou obter energia. Depois disso, as cinzas resultantes são descartadas em aterros industriais ou dispostas livremente no ambiente. A utilização dessas cinzas permite prolongar a vida útil de aterros, reduzir os resíduos poluidores acumulados em aterros industriais e melhorar a sustentabilidade. Muito embora a utilização de resíduos agroindustriais na cadeia da construção civil seja algo desejável, para que isso se torne possível faz-se necessário que estes apresentem características técnicas adequadas (SOUTO, 201O). Os processos de produção industriais que geram resíduos como cinzas de biomassa, invariavelmente não possuem um planejamento para que seus resíduos apresentem características adequadas para serem utilizados na construção civil, sem a necessidade de um processamento. As características das cinzas resultantes de processos agroindustriais são diretamente dependentes da temperatura de combustão, uma vez que esta determinará a morfologia (cristalina ou amorfa) da sílica presente nesses resíduos (TASHIMA, 2006). Da mesma forma, o período de tempo que os resíduos são submetidos à queima terá influência sobre a morfologia e quantidade da sílica produzida (PAULA, 2006). O trabalho de revisão de literatura realizado sobre estudos científicos já publicados buscou identificar o estado da arte em relação à utilização de cinzas de origem vegetal como matéria prima. Algumas cinzas agroindustriais foram estudadas e os resultados apontam aspectos de viabilidade de sua utilização. Tais estudos serviram de embasamento teórico para a presente investigação.

A produção de cinzas de casca de arroz como resíduo ou subproduto se dá principalmente nas indústrias que realizam o beneficiamento de arroz, ao utilizar as cascas como combustível para a geração da energia utilizada nos processos de parbolização e secagem (LIMA, 2008). Trabalhos de investigação sobre a utilização das cinzas como adição mineral ao cimento Portland já ocorrem desde o século passado a partir da década de 70, sendo estudados aspectos como: químicos e tecnológicos da casca de arroz (HOUSTON, 1972); produção de energia e materiais residuais (MEHTA & PITT, 1976); misturas de cinza de casca de arroz com cal e cimento para uso em alvenaria (COOK *et* ai., 1977); uso da cinza de casca de arroz em concretos (AL-KHALAF & YOUSIF, 1984); utilização de resíduos na construção

civil (CINCOTTO, 1988). Desde então estudos vêm sendo desenvolvidos buscando entender os aspectos necessários para a obtenção de cinzas de casca de arroz que apresentem elevado grau de pozolanicidade e possibilitem a sua utilização em substituição à sílica ativa (resíduo da fabricação do ferro-silício e/ou do silício metálico). Pesquisadores como Guerdert (1989), Isaia (1995 e 2000), Silveira (1996), Santos (1997), Gava (1999), Weber (2001), Deila *et ai.* (2005), Cordeiro (2006), Pouey (2006), Saraswathy & Song (2007), Zain *et ai.* (2011), Van Tuan *et ai.* (2011), Zerbino *et ai.* (2011), Kartini (2011), Tashima *et ai.* (2012), Khan *et ai.* (2012), Antiohos *et ai.* (2013), Rêgo *et ai.* (2015), Venkatanarayanan & Rangaraju (2015), Zunino & Lopez (2016), Zhang *et ai.* (2020), desenvolveram trabalhos relacionados ao uso das cinzas de casca de arroz em matrizes cimentícias. Os resultados obtidos para os ensaios de caracterização física das cinzas de casca de arroz são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Características físicas de cinzas de casca de arroz

(continua)

Ensaio	Resultado	Autor
Massa específica (g/cm^3)	2,179	GUERDERT (1989)
	2,000	SILVEIRA (1996)
	1,930 a 2,120	SANTOS (1997)
	2,080	GAVA (1999)
	2,170 a 2,200	WEBER (2001)
	1,990	DELLA *et ai.* (2005)
	2,293	CORDEIRO (2006)
	1,764 a 1,880	POUEY (2006)
	2,130 a 2,160	TASHIMA (2006)
	2,140	TASHIMA *et ai.* (2012)
	2,000 a 2,100	ZERBINO *et ai.* (2011)
	2,100	KARTINI, (2011)
	2,110 a 2,240	RÊGO *et ai.* (2015)
	2,160	ZUNINO & LOPEZ (2016)
Superfície específica (Método de Blaine) (cm^2/g)	6.330 a 10.480	GUERDERT (1989)
	18.000	SILVEIRA (1996)
	5.880 a 19.770	SANTOS (1997)
	10.350 a 19.760	WEBER (2001)
	23.270 a 46.310	POUEY (2006)
	3.947 a 8.563	TASHIMA (2006)
	7.500	ZERBINO *et ai.* (2012)
Resíduo retido na peneira 45 µm (%)	41,13	SILVEIRA (1996)
	0,97	GAVA (1999)
	1,40 a 40,20	WEBER (2001)
	0,0	DELLA *et ai.* (2005)
	21,87	KARTINI (2011)

Tabela 5 - Características físicas de cinzas de casca de arroz

(conclusão)

Ensaio	Resultado	Autor
Diâmetro médio das partículas (μm)	31,25	SILVEIRA (1996)
	2,52	GAVA (1999)
	7,47 a 30,09	WEBER (2001
	0,68	DELLA *et ai.* (2005)
	5,69 a 38,78	CORDEIRO (2006)
	39,18 a 73,28	POUEY (2006)
	11,08 a 20,03	TASHIMA (2006)
	11,08	TASHIMA *et ai.* (2012)
	4,0 a 6,0	ZERBINO *et ai.* (2012)
	25,83	KARTINI (2011)
	9,43a 17,39	RÊGO *et ai.* (2015)

Nos estudos foram relatados usos de diferentes metodologias nos processos de geração, obtenção e preparo das amostras de cinzas utilizadas na realização dos ensaios por cada um dos autores, uma vez que ao não existir uma metodologia padrão normatizada ou descrita para a obtenção e preparo das amostras de cinzas, cada estudo definiu sua própria metodologia. As características químicas obtidas pelos pesquisadores podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características químicas das cinzas de casca de arroz

(continua)

Ensaio	Resultado	Autor
Composição química (SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3) (%)	94,43	GUERDERT (1989)
	93,05	SILVEIRA (1996)
	83,21 a 98,46	SANTOS (1997)
	75,37	GAVA (1999)
	95,41	WEBER (2001)
	90,64 a 95,60	DELLA *et ai.* (2005)
	83,49	CORDEIRO (2006)
	62,73 a 92,34	POUEY (2006)
	81,14 a 87,10	ZAIN *et ai.* (2011)
	85,81	TASHIMA *et ai.* (2012)
	95,77	ZERBINO *et ai.* (2011)
	87,98 a 89,71	ANTIOHOS *et ai.* (2013)
	93,52	SARASWATHY & SONG (2007)
	97,76	KARTINI (2011)
	80,12a91,31	RÊGO *et ai.* (2015)
	85,89	ZUNINO & LOPEZ (2016)

Tabela 6 - Características químicas das cinzas de casca de arroz

(conclusão)

Ensaio	Resultado	Autor
Álcalis presentes (Teor de Na_2Oeq) (%)	0,86	GUERDERT (1989)
	0,62	SANTOS (1997)
	0,42	GAVA (1999)
	0,39	WEBER (2001)
	2,63	DELLA *et ai.* (2005)
	1,24	CORDEIRO (2006)
	0,85 a 2,08	POUEY (2006)
	1,83 a 2,07	ZAIN *et ai.* (2011)
	1,48	TASHIMA *et ai.* (2012)
	2,22	ZERBINO *et ai.* (2011)
	1,04 a 1,46	ANTIOHOS *et ai.* (2013)
	1,43	SARASWATHY & SONG (2007)
	0,86	**KARTINI (2011)**
	0,22 a 1,55	RÊGO *et ai.* (2015)
	3,21	ZUNINO & LOPEZ (2016)
Perda ao fogo (%)	5,05	SANTOS (1997)
	22,97	GAVA (1999)
	2,50	WEBER (2001)
	0,85	DELLA *et ai.* (2005)
	11,88	CORDEIRO (2006)
	0,8 a 34,7	POUEY (2006)
	8,45 a 14,26	ZAIN *et ai.* (2011)
	5,2	TASHIMA (2006)
	0,25	ZERBINO *et ai.* (2011)
	6,30 a 6,34	ANTIOHOS *et ai.* (2013)
	1,97	SARASWATHY & SONG (2007)
	4,81	**KARTINI (2011)**
	2,39 a 15,20	RÊGO *et ai.* (2015)
	5,05	**ZUNINO** & LOPEZ (2016)
Termogravimetria Presença de carbono não calcinado (%)	0,14	DELLA *et ai.* (2005)

A elevada presença de óxidos de interesse nas reações pozolânicas, principalmente de SiO2, é uma característica marcante das cinzas de casca de arroz.

Do ponto de vista morfológico, ao submeterem as cinzas de casca de arroz a análises de difratometria de raios X, Gava (1999) e Cordeiro (2006), observaram a presença das cinzas na fase amorfa e cristalina. Já Santos (1997), Weber (2001), Zain *et ai.* (2011), Tashima *et ai.* (2012) e Antiohos *et ai.* (2013) observaram a predominância das cinzas na fase amorfa. A morfologia apresentada pelas cinzas está diretamente relaciona às temperaturas e tempo de exposição à queima e ao processo de resfriamento (CORDEIRO, 2006).

Foram encontrados na literatura relatos de ensaios realizados para determinar a ocorrência de atividade pozolânica no uso das cinzas de casca de arroz. Os resultados obtidos pelos pesquisadores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Atividade pozolânica de cinzas de casca de arroz

Ensaio	Resultado	Autor
Atividade pozolânica *(Chapei/e modificado* - Consumo de Ca(OH)2 (mg/g)	717 543 a 736 480 a 510 450 a 657	GAVA (1999) CORDEIRO (2006) ANTIOHOS *et ai.* (2013) RÊGO *et ai.* 2015
IAP - Cal - Resistência à compressão **(MPa)**	4,96 a 8,66 13,11	GUERDERT (1989) GAVA (1999)
IAP - Cimento - Resistência à compressão (%) em relação à REF.	= 66,00 ;:: 83,00 >100,00 79,75 a 101,50 80,00 a 110,00 72,90 a 120,70	SILVEIRA (1996) SANTOS (1997) GAVA (1999) WEBER (2001) CORDEIRO (2006) POUEY (2006)

A resistência e a durabilidade das matrizes cimentícias produzidas com frações de cinzas de casca de arroz também têm sido objeto de investigações. Foram encontrados na literatura estudos visando avaliar a resistência e durabilidade de matrizes cimentícias com a substituição parcial do cimento Portland por cinzas de casca de arroz. Os resultados obtidos nos estudos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água de argamassas contendo cinzas de casca de arroz

Ensaio	Resultado	Autor
Resistência mecânica à compressão axial em relação à REF. (%)	Até 35,0% de substituição:::: REF. 10,0% de substituição > REF. 15,0% a 40,0% de substituição> REF. 10,0% a 40,0% de substituição> REF. 15,0% de substituição > REF. 15,0% de substituição > REF. 15,0% de substituição > REF. 25,0% de substituição = REF. 5,0% a 30,0% de substituição> REF. 20,0% de substituição > REF. Até 35,0% de substituição > REF.	GUERDERT (1989) SILVEIRA (1996) SANTOS (1997) GAVA (1999) WEBER (2001) TASHIMA *et ai.* (2012) ZERBINO *et ai.* (2011) KHAN *etal.,* (2012) SARASWATHY & SONG (2007) RÊGO *et ai.* (2015) ZHANG *et ai.* (2020)
Resistência mecânica à tração na flexão em relação à REF. (%)	10,0% de substituição > REF. 5,0 a 15,0% de substituição> REF. 5,0 a 25,0% de substituição> REF. 7,5 a 15,0% de substituição> REF. Até 35,0% de substituição> REF.	SILVEIRA (1996) TASHIMA *et ai.* (2012) SARASWATHY & SONG (2007) VENKATANARAYANAN & RANGARAJU (2015) ZHANG *et ai.* (2020)
Absorção de água em relação à REF. (%)	15,0% de substituição = até 65,0% de diminuição da absorção de água. Até 25,0% de substituição = diminuição da absorção de água. Até 25,0% de substituição = diminuição da absorção de água.	ANTIOHOS *et ai.* (2013) SARASWATHY & SONG (2007) KARTINI (2011)

Observou-se nos estudos realizados com as cinzas de casca de arroz, que de acordo com Zerbino *et ai.,* (2011) e Kartini (2011), seu uso como material

pozolânico apresenta grande potencial em função do elevado percentual de sílica (SiO_2) presente na sua constituição, sendo portanto considerada uma super pozolana (DAL MOLIN, 2011). Mesmo as cinzas que se apresentam morfologicamente com picos cristalinos nos ensaios de difração de raios X, com menores superfícies específicas e com maior grau de frações de carbono, apresentaram adequado desempenho como adições minerais (DELLA *et ai.,* 2005). O bom desempenho dos resultados obtidos pelas cinzas de casca de arroz nos ensaios de resistência e durabilidade é determinando pela presença de sílica, geralmente em estado amorfo, com elevada superfície específica e, em alguns casos pela presença do carbono não totalmente calcinado o qual apresenta extrema finura, proporcionando o chamado "efeito *fíller".* (PRUDENCIO JR *et ai.,* 2003). Os resultados obtidos nos estudos realizados com as cinzas de casca de arroz motivaram a realização de estudos com a utilização de outras cinzas de biomassa produzidas em grande quantidade, como as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar apresenta grande importância econômica, social e ambiental a nível mundial. No Brasil, ocupa lugar de destaque nos setores agrícola e agroindustrial por seu grande volume de produção. O país é um dos principais produtores de açúcar e contribui com aproximadamente 60% do álcool etílico consumido no planeta. (SOUTO, 201O). As cinzas da queima do bagaço de cana-de-açúcar se apresentam como o principal resíduo resultante do processo industrial, necessitando ter seu destino definido nos programas de gestão ambiental das usinas sucroalcooleiras. Segundo Cordeiro (2006), de forma predominante, a destinação das cinzas é feita de dois modos: armazenamento temporário com posterior encaminhamento para ser utilizado como fertilizante e corretivo do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, alternativamente são destinadas a aterros industriais. Dentre as alternativas seria possível definir como melhor opção de destinação a utilização como fertilizante e corretivo orgânico. Porém, as cinzas se caracterizam por apresentar pequena concentração de nutrientes e elevados teores de sílica, tais característica dificultam a sua degradação não sendo, portanto tecnicamente recomendada a sua adição aos solos de cultivo (CORDEIRO, 2006). A literatura apresenta estudos realizados buscando demostrar a viabilidade técnica e ambiental da utilização da cinza como adição mineral ao cimento Portland ou como substituição parcial do cimento em matrizes cimentícias (SINGH *et ai.,* 2000), (CORDEIRO, 2006), (GANESAN *et ai.,* 2007), (DE PAULA *et*

ai. 2009), (POGGIALI, 2010), (LIMA *et ai.,* 2010), (SRINIVASAN & SANTHIYA, 2010), (RIBEIRO & MORELLI, 2014), (REZENDE, 2016), (ZAREEI *et ai.,* 2018), (KHALIL *et ai.,* 2020), (ANDRADE NETO *et ai.,* 2021). Os resultados obtidos para as características físicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Características físicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar

Ensaio	Resultado	Autor
Massa específica (g/cm^3)	2.530	CORDEIRO (2006)
	1,850	GANESAN *et ai.* (2007)
	0,556 a 2,051	POGGIALI (2010)
	2,230 a 2,650	LIMA *et ai.* (2010)
	1,977	REZENDE (2016)
	1,510	ZAREEI *et ai.* (2018)
	3,780	ANDRADE NETO *etal.* (2021)
Superfície específica (Método de Blaine) (cm^2/g)	2.950	CORDEIRO (2006)
	9.430	GANESAN *et ai.* (2007)
	11.120	POGGIALI (2010)
	2.600	ZAREEI *et ai.* (2018)
	4.946	ANDRADE NETO *et ai.* 2021
Resíduo retido na peneira 45 µm (%)	22,00	CORDEIRO (2006)
	1,00	GANESAN *et ai.* (2007)
Diâmetro médio das partículas (µm)	26,60	CORDEIRO (2006)
	5,40	GANESAN *et ai.* (2007)
	13,53	REZENDE (2016)
	36,68	ANDRADE NETO *etal.* (2021)

Assim como observado para os estudos com cinzas de casca de arroz, cada autor definiu sua própria metodologia para a obtenção das amostras de cinzas a serem utilizadas nos ensaios laboratoriais.

As características químicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar encontradas na literatura são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Características químicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar

(continua)

Ensaio	Resultado	Autor
Composição química (SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3) (%)	78,26	SINGH *et ai.* (2000)
	90,50	CORDEIRO (2006)
	78,72	GANESAN *et ai.* (2007)
	90,24	DE PAULA *et ai.* (2009)
	51,32a85,19	POGGIALI (2010)
	76,0 a 98,1	LIMA *et ai.* (2010)
	90,5	SRINIVASAN & SANTHIYA (2010)
	41,75	REZENDE (2016)
	78,78	ZAREEI *et ai.* (2018)
	75,25	ANDRADE NETO *et ai.* (2021)

Tabela 10 - Características químicas das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar

(conclusão)

Ensaio	Resultado	Autor
Álcalis presentes (Teor de Na_2Oeq) (%)	0,50	CORDEIRO (2006)
	1,81	GANESAN *et ai.* (2007)
	4,04	DE PAULA *et ai.* (2009)
	2,33 a 7,36	POGGIALI (201O)
	0,80 a 7,40	LIMA *et ai.* (201O)
	2,40	SRINIVASAN & SANTHIYA (2010)
	1,63	REZENDE (2016)
	1,74	ZAREEI *et ai.* (2018)
	4,81	ANDRADE NETO *et ai.* (2021)
Perda ao fogo (%)	6,90	SINGH *et ai.* (2000)
	0,42	CORDEIRO (2006)
	4,90	GANESAN *et ai.* (2007)
	5,00	DE PAULA *et ai.* (2009)
	0,34 a 16,28	LIMA *et ai.* (201O)
	49,16	REZENDE (2016)
	3,10	ANDRADE NETO *et ai.* (2021)
Termogravimetria Presença de carbono não calcinado (%)	5,00 a 14,00	CORDEIRO (2006)

Nos resultados obtidos pelos autores observou-se a tendência de menor presença de sílica em comparação com as cinzas de casca de arroz (POGGIALI, 201O e **REZENDE,** 2016).

As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram submetidas às análises por difratometria de raios X (DRX). Poggiali (201O) e Rezende (2016) observaram a presença de cinzas na fase amorfa e picos cristalinos. Já Ganesan *et ai.* (2007) e Andrade Neto *et ai.* (2021) observaram a presença predominante de cinzas na fase amorfa. Da mesma forma, Cordeiro (2006), observou que cinzas obtidas pela calcinação do bagaço de cana-de-açúcar em temperaturas de até 600 ºC, se apresentaramse de forma predominantemente amorfa.

Na literatura, foram encontrados relatos de ensaios realizados com o objetivo de determinar o nível de atividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Atividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar

Ensaio	Resultado	Autor
Atividade pozolânica *(Chapei/e modificado)*	173,00	CORDEIRO (2006)
Consumo de Ca(OH)2 (mg/g)	1.023,96	ANDRADE NETO *et ai.* (2021)
IAP - Cal - Resistência mecânica à compressão (MPa)	5,20	CORDEIRO (2006)
IAP - Cimento - Resistência à compressão	81,00	CORDEIRO (2006)
(%) em relação à REF.	79,25 a 82,84	POGGIALI (2010)

Comparando-se com resultados obtidos pelas cinzas de casca de arroz, observa-se menores índices de atividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO, 2006).

Ensaios com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram encontrados na literatura. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água de argamassas contendo cinzas de bagaço de cana-de-açúcar

Ensaio	Resultado	Autor
Resistência mecânica à compressão (%) em relação à REF.	10,0% de substituição> REF.	SINGH *et ai.* (2000)
	10,0% de substituição= 91,66% REF.	CORDEIRO (2006)
	Até 15,0% de substituição> REF.	GANESAN *et ai.* (2007)
	Até 20,0% de substituição= REF.	DE PAULA *et ai.* (2009)
	Até 20,0% de substituição> REF.	POGGIALI (2010)
	Até 20,0% de substituição> REF.	SRINIVASAN & SANTHIYA (2010)
	10,0% de substituição REF.	RIBEIRO & MORELLI (2014)
	10,0% de substituição 90,0% da REF.	REZENDE (2016)
	5,0% de substituição> REF.	ZAREEI *et ai.* (2018)
	Até 15,0% de substituição> REF. .	ANDRADE NETO *et ai.* (2021)
Resistência mecânica à tração na flexão (%) em relação à REF..	10,0% de substituição= 94,78% REF.	CORDEIRO (2006)
	Até 20,0% de substituição> REF.	SRINIVASAN & SANTHIYA (2010)
	10,0% de substituição> REF. .	REZENDE (2016)
Absorção de água (%) em relação à REF.	10,0% de substituição= REF.	CORDEIRO (2006)
	Até 25,0% > REF. aos 90 dias de cura	GANESAN *et ai.* (2007)
	10,0% a 30,0% de subst.. > REF.	DE PAULA *et ai.* (2009)
	Até 15,0% de substituição= REF.	POGGIALI (2010)
	Até 15,0% de substituição> REF.	ANDRADE NETO *et ai.* (2021)

Mesmo apresentando concentrações de sílica normalmente abaixo das apresentadas pelas cinzas de casca de arroz, os estudos demonstraram importante potencial para a utilização das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como adição mineral pozolânica (GANESAN *et ai.,* 2007 e ANDRADE NETO *et ai.,* 2021).

Utilizando-se de cinzas de folhas de bananeira foram desenvolvidos trabalhos visando determinar: o potencial pozolânico como adição em argamassas e concreto de cimento Portland; a influência da adição de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa em uma argamassa de cimento Portland; resistência mecânica e envelhecimento em câmara. As folhas de bananeira foram submetidas à combustão em um forno. As cinzas residuais foram submetidas à moagem durante os tempos de 0,5; 1,0; 2,0 e 3,0 h. Os resultados obtidos com os ensaios de IAP-Cal e IAP-Cimento demonstraram a atividade pozolânica da cinza da folha de bananeira ao atender os parâmetros definidos pelas normas NBR-ABNT (KANNING, 2010). A

partir de um traço de argamassa de referência, foram realizadas adições de cinza de folha de bananeira, cinza volante e sílica ativa nas proporções de: 5%, 7,5% e 10%. Os resultados dos ensaios de resistência mecânica demonstraram que a adição da cinza da folha de bananeira proporcionou resistência superior ao obtido pelas argamassas de referência e argamassas com adição de cinza volante. Apresentou também semelhança de resistência às argamassas com adição de sílica ativa (KANNING, 2013). Foi realizada a adição parcial de cinzas de folha de bananeira na confecção de argamassas, na proporção de O a 10% em massa. Em outro ensaio foi feita a adição nas proporções de 1O a 20% em massa em concretos, sendo avaliada a sua durabilidade relativa quando submetido à câmara de intemperismo artificial. Com a adição de 10% de cinza na argamassa, foi observada resistência superior em 25% a da argamassa de referência. Os concretos com a adição de 20% de cinza apresentaram resistência 40% superior ao concreto de referência. Os materiais apresentaram parâmetros eletroquímicos excelentes nos ensaios de envelhecimento em câmara (KANNING *et ai.,* 2014). Os resultados obtidos pelo conjunto de trabalhos desenvolvidos permitiram aos autores concluir que a utilização das cinzas de folha de bananeira como material pozolânico encontra viabilidade técnica.

Cinzas da casca da castanha de caju foram estudadas por Lima (2008), submetidas à análise de composição química e morfologia, com a avaliação da presença de sílica na fase amorfa. Os resultados demostraram um somatório dos teores médios de $SiO2+A'2O_3+Fe2O_3$ abaixo do parâmetro mínimo para materiais pozolânicos. Observou-se a presença de fase amorfa nos ensaios de difratometria. Os ensaios de IAP-Cal e IAP-Cimento ficaram abaixo dos requisitos da norma para materiais pozolânicos. Finalmente, os ensaios de resistência à compressão demonstraram que somente valores menores que 5% de substituição do cimento por cinza apresentaram resistência similar ao traço de referência (LIMA, 2008).

Cinzas da casca de coco verde foram estudadas por Bonato (2014), relacionados à substituição parcial do cimento Portland em concretos. Para a obtenção das cinzas, as cascas de coco verde foram submetidas à secagem em forno elétrico a uma temperatura de 550 ºC por um período de 6 h e em seguida à calcinação em mufla, a uma temperatura de 900 ºC durante 1,0 h. As cinzas resultantes apresentaram a proporção de 0,83% do volume de material inicial. Posteriormente, as cinzas foram processadas em moinho de bolas por 12 h e encaminhadas aos ensaios de caracterização química, física e morfológica. Os

resultados obtidos do somatório de SiO2+Al2O3+ Fe2Ü3, teor de álcalis Na2Üeq e perda ao fogo se apresentaram em desacordo com os parâmetros de pozolanicidade definidos pela norma ABNT - NBR 12653 (2014/15). Por outro lado, a concentração de SO3 ficou abaixo do máximo definido em norma para uma pozolana. O difratograma obtido não demonstrou a presença de halo amorfo, evidenciando a baixa reatividade da cinza. Corpos de prova foram produzidos com teores de substituição do cimento Portland variando de O, 3, 5 e 8% em massa. Nos ensaios de resistência à compressão axial as dosagens de substituição de 3 e 5% demonstraram atendimento aos requisitos da norma ABNT NBR 12655 (2006), ultrapassando a resistência da amostra de referência aos 91 dias de cura. A conclusão da pesquisa foi de que todas as dosagens de substituição analisadas demonstraram alcance de resistência superior aos valores mínimos para a produção de postes de concreto, conforme definido pela ABNT NBR 8451-1:2011 versão corrigida (2012), (BONATO, 2014).

Como o potencial de utilização de diferentes cinzas de biomassa tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores, Vassilev *et ai.* (2013) fizeram uma compilação dos resultados obtidos por mais de 600 artigos publicados que tratam desse tema. As cinzas de madeiras, que encontram maior aderência ao presente trabalho, foram estudadas de maneira genérica por autores como Elinwa e Mahmood (2002), Cheah & Ramli (2011), Siddique (2012), Chowdhury *et ai.* (2015), sem terem sido relatados nessa compilação, estudos específicos relacionados as cinzas de Pinus spp.

Cinzas de *Euca/yptus spp.* foram estudadas por Vaske (2012). As análises químicas apresentaram a soma dos teores médios de SiO2+Al2O3+Fe2Ü3 em valores abaixo do limite mínimo para sua classificação como material pozolânico de acordo com os requisitos da norma (ABNT NBR 12653:2014/15). Corpos de prova foram produzidos com traços de 1:6; 1:7,5 e 1:9 e com substituição de 0%, 15% e 45% do cimento Portland em massa pela cinza foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão. O traço 1:9 com 15% de substituição do cimento demonstrou o melhor resultado apresentando valor de resistência 41,23% maior que o de referência. A amostra de cinza submetida ao ensaio de difratometria de raios X registrou a presença de picos característicos das fases cristalinas o que demonstrou a baixa reatividade da cinza. Concluiu-se no trabalho que as cinzas de *Euca/yptus spp.* apresentam viabilidade técnica de utilização na forma de adição como *"fíller'*

(VASKE, 2012). Resende (2013) buscou caracterizar a cinza de cavaco de *Euca/yptus spp.* e determinar a viabilidade de sua utilização como material cimentício suplementar. Os estudos tiveram seu desenvolvimento em duas vias, com amostras de cinzas *in-natura* e com cinzas submetidas à moagem e a requeima. Utilizou-se do método de *Chapei/e Modificado* para determinar o potencial pozolânico das cinzas, tendo obtido resultado que não atenderam os parâmetros de pozolanicidade (ABNT - NBR 15895:2010). Nos ensaios de IAP-Cal, não houve atendimento à norma (ABNT - NBR 5751:2015). Os ensaios de IAP-Cimento atenderam os parâmetros da norma (ABNT - NBR 5752:2014) como indicador de pozolanicidade. Finalmente, corpos de prova foram produzidos se utilizando da substituição parcial ao cimento Portland por cinzas nas proporções de 5, 1O e 15% em massa, obtendo-se como resultado resistência mecânica à compressão superior ao obtido pela REF. para substituição de até 10,0% do cimento Portland pelas três amostras de cinzas analisadas. A conclusão da pesquisa foi pela viabilidade técnica do uso da cinza de cavaco de *Eucalyptus spp.* como material cimentício suplementar, com ênfase à mitigação de impactos ambientais relacionados a esses resíduos (RESENDE, 2013). Nas duas investigações sobre o aproveitamento de cinzas *Eucalyptus spp.* foi evidenciado o seu "efeito *fíller',* recomendando a sua adição em concreto e argamassas, mesmo sem a sua caracterização como pozolana.

De acordo com Coelho (2013), ao longo do tempo pesquisadores têm estudado a variação do desempenho da cinza da casca do arroz levando em conta as condições de temperatura e tempo de exposição adotado na sua obtenção. Estudos desenvolvidos por Hwang; Wu (1989), analisaram o desempenho de cinzas obtidas com temperaturas de queima variando entre 400 e 1200ºC. Boateng; Skeete (1990) concluíram ser fundamental que a temperatura de queima se mantenha constante entre uma faixa de 800 e 900 ºC para que a cinza obtida apresente característica amorfa e reativa. Sugita et ai. (1992) concluíram que cinzas obtidas com temperaturas controladas entre 500 e 600 ºC por um tempo de exposição não superior à uma hora, permitem a obtenção de cinzas com maior atividade pozolânica. Mehta; Pitt (1974), desenvolveram um processo para produzir cinza da casca do arroz constituída essencialmente de sílica em estado amorfo, a uma temperatura controlada inferior a 500ºC, em larga escala e com baixo custo. Pouey (2006) afirma que o resultado do processo de combustão e obtenção da cinza

depende do equipamento utilizado, da temperatura de queima e do tempo de exposição, sendo o controle da temperatura um dos aspectos críticos para a obtenção de cinzas com boa reatividade. Para Coelho (2013), outro fator importante na utilização da cinza como material pozolânico é a sua granulometria, que pode ser melhorada através da moagem, com a modificação de suas propriedades físicas como superfície específica e finura. Estas propriedades estão ligadas à trabalhabilidade da mistura nos processos de produção de concretos e argamassas COELHO (2013). O processo de moagem consiste da fragmentação de uma estrutura sólida, através da sua submissão a esforços mecânicos, capazes de ocasionar deformações das partículas a ponto garantir maior compacidade à mistura, tornando as partículas, inicialmente aciculares, mais próximas da forma esférica (CORDEIRO, 2009). Santos (1997) analisou diferentes cinzas residuais verificando que com diferentes tipos de moagem, foram obtidas áreas superficiais distintas, concluindo que para cada tipo de queima a um tempo de moagem específico para atingir o seu melhor grau de pozolanicidade. Weber (2001) realizou a moagem de cinzas em tempos variando entre 2 e 24 horas em moinho de bolas e concluiu que com maior tempo de moagem, menor o tamanho médio das partículas, maior área superficial e massa específica das cinzas, não sendo as alterações significativas após 12 horas de moagem. Guerdert (1989) afirma que cinzas de casca de arroz, mesmo produzidas sem nenhum controle de temperatura, podem apresentar características pozolânicas, dependendo da eficácia do seu processo de moagem, que ao apresentarem maiores superfícies específicas (método de Blaine), também apresentam maiores resistências à compressão. Muito embora seja possível observar parâmetros muito distintos, todos os trabalhos foram direcionados para a obtenção de cinzas residuais com predominância de sílica na fase amorfa e com finura adequada.

Do ponto de vista dos processos de obtenção das diferentes cinzas, a bibliografia não apresenta um consenso sobre a temperatura e o tempo entendidos como ideais para o processo de combustão de resíduos que possibilite a obtenção de material predominantemente amorfo e com elevada superfície específica, ou seja, com grande potencial reativo. Mesmo assim, pesquisadores desenvolveram estudos que visaram demonstrar que processos controlados de combustão podem proporcionar cinzas com características de maior reatividade. Nesse sentido, visando direcionar os resíduos como matéria-prima para a indústria cimenteira,

dentro de uma perspectiva de economia circular, faz-se necessário que os processos de combustão sejam controlados e executados dentro de parâmetros adequados. De maneira geral, quando a biomassa é submetida a temperaturas próximas a 100 ºC, inicia-se a perda de massa pela evaporação da água presente na biomassa; quando a temperatura é levada a algo em torno de 350 ºC, tem-se o início da queima do material de maior volatilidade; entre 400 e 500 ºC verifica-se grande perda de massa e a oxidação do carbono, com tendência de proporcionar cinzas residuais com grande quantidade de sílica com características de alta reatividade por estar no estado amorfo; temperaturas elevadas além de 700 ºC tendem a promover a formação de material cristalino de baixa reatividade; temperaturas de queima acima de 800 ºC tendem a produzir essencialmente sílica cristalina (PAULA, 2006). O tempo de exposição e a temperatura de queima são diretamente influenciados pelas características das fornalhas, determinando os aspectos morfológicos e de distribuição granulométrica presente nas cinzas (PAULA, 2006).

Analisando o conjunto de trabalhos realizados e buscando identificar os melhores parâmetros para a obtenção de cinzas de biomassa com maior capacidade reativa, observou-se que a submissão a calcinação à temperaturas de até aproximadamente 600 ºC por períodos de uma a três horas, tende o favorecimento da obtenção de cinzas com maior capacidade reativa, ou seja: maior superfície específica, predominância do estado amorfo e maior índice de calcinação.

Dentre as cinzas de biomassa produzidas em grande quantidade, não foram encontrados na literatura estudos específicos relacionados à utilização das GPS em matrizes cimentícias como adição mineral pozolânica, porém foram encontrados estudos que tratam da utilização de resíduos de *Pinus spp.*

2.5.1 Resíduos de *Pinus spp.*

Resíduos de *Pinus spp.* resultantes de diversas etapas de sua cadeia produtiva e sua utilização na construção civil tem sido objeto de estudos como de Bardini, (2008), Lima & Iwakiri (201O) e Lima & Iwakiri (2011). Tais estudos estão relacionados a sua aplicação em compósitos de cimento madeira, ou como

agregado miúdo em matrizes cimentícias com objetivo investigar a sua viabilidade de uso. Tais estudos foram desenvolvidos no sentido de encontrar alternativas à sua aplicação que tragam evolução às características técnicas dos materiais produzidos. Ao mesmo tempo, se busca diminuir a pressão sobre o uso de outros recursos e proporcionar a mitigação de impactos oriundos da disposição desses resíduos no ambiente. Bardini (2008) buscou caracterizar viabilidade técnica na utilização das cinzas da casca de *Pinus spp.* como *"fíller"* em misturas asfálticas. Para as análises, foi utilizada a substituição em massa, do *"fílfer"* mineral pelo resíduo. Os resultados obtidos indicaram um decréscimo de qualidade das características das misturas. Mesmo assim, os resultados dos ensaios demonstraram valores, na maioria dos casos, acima dos requisitos mínimos determinados pela normatização técnica. Estudos foram produzidos por Lima & lwakiri (201O) e Lima & lwakiri (2011) avaliando o potencial de utilização do resíduo do desdobro de toras de *Pinus spp.* e de substituições parciais do cimento Portland por sílica ativa e cinza de casca de arroz; por cinza volante e escória de alto-forno; e, em substituição ao agregado miúdo do concreto utilizado para a produção de blocos para alvenaria estrutural. Em todos os casos foram obtidos resultados satisfatórios do ponto de vista de viabilidade técnica da utilização destes resíduos.

Do ponto de vista bibliométrico, as buscas realizadas nas principais bases de dados demonstraram a existência de pequeno número de estudos com alguma aderência ao tema desta pesquisa. Observou-se também que até o presente momento não foram publicados estudos específicos sobre a viabilidade técnica e ambiental da utilização da CPS como adição mineral ao cimento Portland ou como substituto parcial deste na confecção de concretos, argamassas ou pastas. Os métodos de obtenção e a quantificação do montante de CPS gerada são apresentados a seguir.

2.6 CINZA DE *Pinus spp.* - CPS

O processo de produção de energia a partir de biomassa já é amplamente utilizado e vem ganhando impulso uma vez que apresenta um impacto de emissões de CO2 quase nulo. Isso ocorre em função das emissões produzidas no processo de

combustão para a geração de energia, serem neutralizadas pelo dióxido de carbono fixado na biomassa durante o seu crescimento (GIRÓN *et ai.,* 2013). As cinzas de biomassa florestal são os resíduos resultantes do seu processo de queima. O volume de cinzas gerados em processos de combustão de material lenhoso apresenta grande variabilidade em função da parte componente e idade das árvores. As propriedades das cinzas guardam importante grau de dependência das características químicas e físicas das espécies florestais que lhe deram origem (SIDDIQUE, 2009). A constituição química e estrutural dos materiais lenhosos apresenta grande heterogeneidade, em função dos sistemas de cultivo, das características ambientais, da diversidade de espécies e de propriedades como: densidade, permeabilidade, capilaridade, condutividade térmica, difusão da água, etc. (KLOCK *et ai.,* 2013). Nos cultivas comerciais, a idade média onde se dá o maior volume de exploração da biomassa de *Pinus spp.* ocorre entre os 14 e 21 anos do plantio, período em que de acordo com a Tabela 13, há maior produção percentual de cinza residual nos processos de combustão. Na Tabela 13 são apresentados os percentuais de teores de cinzas dos diferentes componentes de *Pinus taeda* em distintas idades de plantio.

Tabela 13 - Percentual de cinzas obtidas pela queima de partes de *Pinus taeda* em diferentes idades

Componente	*Média*	*Idade em anos*				
		6	10	12	14	24
Copa	0,75%		1,09%	0,60%	**0,82%**	0,50%
Acículas	3,13%	3,36%	**3,04%**	**3,25%**	**3,94%**	1,59%
Galhos	0,90%	0,84%	0,69%	0,93%	**1,45%**	0,60%
Casca	0,85%		1,0%	0,40%	0,70%	0,30%

(BRAND, 201O)

A quantificação do volume de CPS produzida atualmente no estado do Paraná pode ser feita utilizando dados relativos às indústrias madeireiras de painéis reconstituídos e painéis de compensados, uma vez que nessas indústrias a CPS já está efetivamente sendo gerada. O mesmo método pode ser utilizado para quantificar o potencial total de produção de CPS no Brasil e ao nível global. Para o estado do Paraná, a produção de *Pinus spp.* observada no ano de 2016, foi de 23,2 milhões m^3 (APRE, 2018). Para Wiecheteck (2009), uma indústria de porte médio com consumo de 2.200 m^3 de madeira de *Pinus spp.* em tora por mês, gera um excedente de resíduos de madeira na própria indústria de aproximadamente 570 t/mês. Nessas indústrias, esses resíduos são utilizados como combustível para a

queima em caldeira. Assim, pode-se determinar a quantidade de resíduo de madeira gerado para cada m^3 de madeira industrializada conforme a equação (5):

Resíduos t/m^3 = Resíduos gerados (t) / madeira industrializada (m^3) (5)

Assim, tem-se:

Quantidade de resíduos t/m^3 = 570 t / 2.200m^3 = 0,26 t/m^3

Souza *et ai.* (2012) determinaram o teor médio de cinzas de *Pinus taeda* com procedência tanto nas florestas (resíduos da colheita) como no processamento (costaneira, cepilho, refilo e pó de serra) e obtiveram teores médios variando de 0,20% (resíduos da colheita) a 0,42% (costaneira). Os demais materiais tiveram os teores médios de cinza em aproximadamente 0,30%. Como esses materiais são os materiais efetivamente utilizados na queima em caldeira nas industriais madeireiras que trabalham no processamento de *Pinus spp.,* foi adotado nesse estudo o valor de 0,30% para o teor médio de CPS geradas em caldeira. Na Tabela 14 apresenta-se uma estimativa da geração anual de CPS no Estado do Paraná e no Brasil.

Tabela 14 - Estimativa do volu_me anual de produção de CPS no Estado do Paraná e no Brasil

	Produção anual de toras de *PI.nus spp.* (m3)	Resíduos de *Pinus spp.* (t/m3)	Total de resíduos de *p· mu /pp.*	Teor médio de CPS (%)	Quantidade total de CPS (t)
Paraná	23.200.000	0,26	6.032.000	0,30	18.096
Brasil	49.700.000	0,26	12.922.000	0,30	38.766

Do ponto de vista econômico e ambiental, faz-se necessária a busca de alternativas para a destinação da CPS produzidas, principalmente em função de seu volume, potencial de impacto ambiental e possibilidade de sua utilização como matéria prima em outros processos. Nesse aspecto, a utilização dos princípios da economia circular surge como importante alternativa para a gestão da destinação da CPS, através de suas estratégias e metodologias, conforme apresentado a seguir.

2.7 CINZAS COMO MATÉRIA-PRIMA E A ECONOMIA CIRCULAR

Segundo Ormazabal *et ai.* (2018), a Economia Circular (EC) é um conceito atualmente em grande evidência apesar de não ser novo. O termo foi usado inicialmente na literatura no início dos anos noventa por "Pearce e Turner" ao proporem fluxos circulares de valor e de recursos com efeitos ambientais restauradores, tendo como base estudos desenvolvidos anteriormente por "Boulding" em 1966 (ORMAZABAL *et ai.,* 2018). Para Santos (2019) a Economia Circular - EC propõe a mudança imediata da linearidade dos atuais padrões de produção e consumo que se iniciam na extração dos recursos naturais, manufatura, distribuição, uso ou consumo e tem seu final com o descarte para uma visão holística, pensando na totalidade do produto através da conexão do ponto final da linha de produção ao início dela. A EC entende como fundamental o planejamento estratégico sistêmico, desde o design, projeto e fabricação, até o transporte, utilização e a reinserção no processo produtivo, se propondo a mudar a forma como empresas, governo e pessoas produzem, administram e consomem produtos e serviços (SANTOS, 2019). Em termos gerais, de acordo com Ellen Macarthur Fundation (2013), na EC deve ocorrer uma recirculação de recursos dentro de um ciclo formado pelas fases de obtenção, transformação, uso e retorno, onde as indústrias pegam os recursos do ambiente e transformam em produtos e serviços que são distribuídos e utilizados por consumidores ou outras empresas como parte de outros produtos. Após seu uso, esses produtos devem retornar como matéria-prima e energia em outras cadeias produtivas (ELLEN MACARTHUR FUNDATION, 2013). Para Prieto-Sandoval *et ai.* (2018), a EC representa uma mudança de paradigma na forma como a sociedade humana se interrelaciona com a natureza e visa prevenir o esgotamento de recursos, com a recuperação de energia e de materiais e facilitar o desenvolvimento sustentável por meio de implementação em micro (empresas e consumidores), meso (agentes econômicos integrados em simbiose) e macro contextos (cidade, regiões e governos). Assim, a conquista de um modelo circular requer inovações ambientais de forma cíclica e regenerativa na forma como a sociedade legisla, produz e consome (PRIETO-SANDOVAL *et ai.,* 2018).

A indústria cimenteira é responsável por cerca de 7% das emissões mundiais de CO2 provocando um impacto ambiental significativo (POSSAN, 2019).

Além disso, a construção civil é altamente responsável pela contaminação devido à demanda de energia e emissões de CO_2 (BRÁS & FAUSTINO, 2016). Para minimizar este efeito negativo, é crucial desenvolver alternativas para o cimento convencional. Vale notar que a poluição é causada não apenas pelo consumo de energia, mas também pela alta quantidade de resíduos que são produzidos. As alternativas à produção do cimento Portland também são uma área atual de pesquisa ativa. A literatura oferece uma ampla gama de materiais de substituição orgânicos e inorgânicos, analisando diferentes características (GONZÁLEZ-KUNZ *et ai.,* 2017). Para SNIC (2019b), ao se utilizar produtos alternativos como substitutos de clínquer no cimento Portland, ocorre uma diversificação nas possibilidades de aplicações e também nas características específicas do cimento, o que geralmente traz vantagens como a maior durabilidade e vida útil de estruturas de concreto (baixa permeabilidade, resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, prevenção das reações álcali-agregado, elevada resistência à compressão em idades mais avançadas). Dentro desta perspectiva segundo a Votorantim Cimentos (2018), empresas associadas à CSI (Cement Sustainability Initiative) no ano de 2018 formaram a Global Cement and Concrete Association (GCCA), com o objetivo de ampliar para o segmento de concreto o escopo da entidade que foi criada em 1999 exclusivamente para as indústrias cimenteiras. De acordo com a Votorantim Cimentos, a GCCA mantém parceria estratégica com o Conselho Empresarial Global para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), incluindo grande parte das empresas que detém a maior capacidade de produção mundial de cimento e concreto. O programa de trabalho da GCCA se organiza em três dimensões: sustentabilidade; inovação; posicionamento do concreto. O programa tem cinco pilares: saúde e segurança; mudanças climáticas e energia; responsabilidade social; meio ambiente e natureza; Economia Circular. Ainda segundo a empresa, o setor de cimentos já incorpora diversas práticas circulares, sendo um grande consumidor de recursos derivados de resíduos.

Estudos realizados por Fairbairn *et ai.* (2012) e Rezende (2016) avaliaram a viabilidade de substituição parcial do clínquer por cinza de bagaço de cana-de-açúcar - CBCA na produção do cimento Portlad, a consequente redução da emissão de CO_2 o potencial de créditos de carbono e a configuração do projeto como mecanismo de desenvolvimento limpo - MDL. Em ambos os casos, a metodologia específica utilizada para a implantação de um projeto de MDL foi a *ACM 0005*

Approved and Consolídated Baselíne Methodology for Increasíng the Blend ín Cement Productíon.

Segundo Fairbairn *et ai.* (2012), a metodologia ACM 0005 pode ser utilizada no desenvolvimento de qualquer projeto que proporcione o aumento da quantidade de adições na produção do cimento Portland, ou seja, possibilite a redução da quantidade de clínquer na mistura. Outros pré-requisitos também são obrigatórios, como: a inexistência de escassez da adição a ser usada; inexistência de uma destinação alternativa adequada para a adição; a produção do cimento Portland deverá ser voltada apenas para o mercado interno (FAIRBAIRN *et ai.,* 2012). Os resultados obtidos nos dois estudos demonstraram uma expressiva redução das emissões de CO2, mesmo para os cenários mais desfavoráveis, onde se apresentaram as maiores distâncias entre as fontes geradoras das cinzas e as indústrias cimenteiras. As emissões relativas ao transporte das cinzas em t de CO_2 / t de cinza foram 100 vezes menores que a emissão de CO_2 decorrente da produção clínquer, adotando-se uma distância média de aproximadamente 700 km no transporte das cinzas até as indústrias cimenteiras. Para distâncias médias de transporte menores, em torno de 318 km, as emissões estimadas foram aproximadamente 200 vezes menores (FAIRBAIRN *et ai.,* 2012). No trabalho de Rezende (2016), as projeções de diminuição das emissões foram de 20 vezes para distâncias de aproximadamente 500 km e até 140 vezes para distâncias médias de 300 km.

2.8 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO - MDL

A Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (CQNUAC) criou o MDL com o objetivo de possibilitar aos países o cumprimento das metas do Protocolo de Quioto. Assim, o MDL consiste na implantação de projetos que objetivem a redução das emissões de GEEs e contribuam para o desenvolvimento sustentável local em países em desenvolvimento. Nesses projetos, cada t de CO_2 equivalente que deixa de ser emitida ou que é retirada da atmosfera, passa a ser caracterizada como uma unidade de crédito de carbono, também chamada de Redução Certificada de

Emissão (RCE) (REZENDE, 2016). Uma redução certificada de emissão ou "RCE" é uma unidade medida em conformidade com o Artigo 12 e os seus requisitos, bem como as disposições pertinentes destas modalidades e procedimentos, e é igual a uma tonelada métrica equivalente de dióxido de carbono, calculada com o uso dos potenciais de aquecimento global, definidos na Decisão 2/CP.3 ou conforme revisados subsequentemente de acordo com o Artigo 5." (UNFCCC, 2006). As RCEs podem ser comercializadas no mercado internacional, geralmente através de bolsas de valores (REZENDE, 2016). O valor pago por t de CO_2 tem variado historicamente entre€ 15 e€ 35 (FAIRBAIRN *et ai.,* 2012).

O desenvolvimento de projetos e a análise da viabilidade da utilização da CPS como matéria-prima na produção do cimento Portland ou em substituição parcial do cimento Portland, demanda a delimitação de cenários e o levantamento de dados que passem a constituir a base de informações necessárias para o desenvolvimento e análise do projeto.

O estado do Paraná é o principal estado produtor de *Pinus spp.* no Brasil. A localização tanto das florestas plantadas como das industrias madeireiras que utilizam o *Pinus spp.* como matéria-prima se dá principalmente em seis polos madeireiros: Jaguariaíva-Arapoti; Telêmaco-Borba; Ponta Grossa; Curitiba e Região Metropolitana; Guarapuava; União da Vitória (APRE, 2018). Descritos como pertencentes a região Centro-Sul, esses polos são responsáveis por aproximadamente 94% da produção e industrialização de *Pinus spp.* no Paraná (EISFELD & NASCIMENTO, 2015). Uma vez que nesses polos madeireiros as indústrias em sua totalidade utilizam queima de resíduos de *Pinus spp.* em caldeiras para a geração de vapor e energia, são também nesses polos onde ocorrem geração de CPS. Entendida como resíduo do processo de queima da biomassa em caldeira, a CPS atualmente é encaminhada em sua grande maioria para aterros industriais ou para a fertilização do solo em áreas de cultivo de florestais, geralmente de propriedade das próprias indústrias. Fairbairn *et ai.* (2012), determinou a quantidade média de emissões de CO_2 / t de cinza transportada / km, como sendo aproximadamente $7{,}456 .10^{-5}$ t CO_2/ t cinza/ km. Por outro lado, no ano de 2019, a produção mundial de cimento Portland esteve na casa de 4,1 bilhões de t. No Brasil foram produzidas aproximadamente 57 milhões de t, sendo a região Sudeste e o estado de Minas Gerais os principais produtores brasileiros. A região Sul foi responsável pela produção de aproximadamente 9,1 milhões de t, destas

aproximadamente 6,15 milhões de t foram produzidas no estado do Paraná, o que representa aproximadamente 11,0% da produção nacional (SNIC, 2019b). Do ponto de vista de emissões atmosféricas, segundo SNIC (2019a), ao nível mundial foram emitidas no ano de 2014 aproximadamente 700 kg de CO2 / t de cimento Portland produzido, sendo no Brasil esse número significativamente menor, na casa de 564 kg de CO_2/t de cimento. Estima-se que já em 2020 esse número apresentou uma queda para algo em torno de 530 kg de CO_2/t de cimento, projetando-se para 2050 uma importante diminuição para 380 kg de CO_2/t de cimento (SNIC, 2019a). Esses menores índices de emissões na indústria brasileira estão relacionados principalmente a utilização de uma matriz energética mais limpa e ao menor fator clínquer/cimento (POSSAN, 2019). Para o ano de 2020 estimou-se o teor de clínquer no cimento em torno de 66% e projeta-se uma redução para 52% em 2050 (SNIC, 2019a). Do volume total de emissões de CO_2 na produção do cimento Portland, 70% advém da produção de clínquer e os 30% restantes da obtenção de matéria prima, transporte e preparo de adições (FAIRBAIRN *et ai.,* 2012). Na produção do clínquer, 63% das emissões de CO2 ocorrem devido à calcinação do carbonato de cálcio e de magnésio, 36% na queima de combustíveis fósseis e 1% devido ao uso de eletricidade SNIC (2019b). De acordo com GNR PROJECT REPORTING CO_2 (2020), no ano de 2016 a média global de emissões de CO_2 advindas do somatório da descarbonatação e do uso de combustíveis fósseis na produção de clínquer, foi de 842 kg de CO2 / t de clínquer. No Brasil, as emissões foram em média de 866 kg de CO2 / t de clínquer, sendo 545,58 kg de CO2 / t de clínquer na calcinação, 311,76 kg na queima de combustíveis fósseis e 8,66 kg no uso de eletricidade (GNR PROJECT REPORTING CO_2, 2020). Segundo SNIC (2019) a indústria cimenteira brasileira tem hoje uma capacidade instalada de produção de aproximadamente 100 milhões de *tia*. No ano de 2014 o volume brasileiro de produção e consumo foi de 72 milhões de t de cimento Portland, com projeção de grande crescimento para o consumo até o ano de 2040, em função da comparação com o consumo per capta médio mundial de 553 kg / habitante / a com o consumo médio brasileiro de 260 kg / habitante/ a e os déficit habitacionais e de infraestrutura do país (SNIC, 2019).

Nesse cenário, evidencia-se a necessidade de um melhor gerenciamento na destinação da CPS bem como na produção do cimento Portland, atividades que além de apresentar potenciais de impactos ambientais, podem também ser complementares na busca por eficiência técnica e mitigação desses impactos.

Levando-se em consideração essa premissa, foi desenvolvido um programa experimental composto pela descrição dos materiais e métodos utilizados, onde estão detalhados todos os aspectos relacionados à natureza experimental desta pesquisa, os quais estão apresentados no capítulo 3 a seguir.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa é de natureza experimental quantitativa. Para sua realização foi elaborado um programa experimental que se encontra sintetizado nos fluxogramas das Figuras 1 e 2.

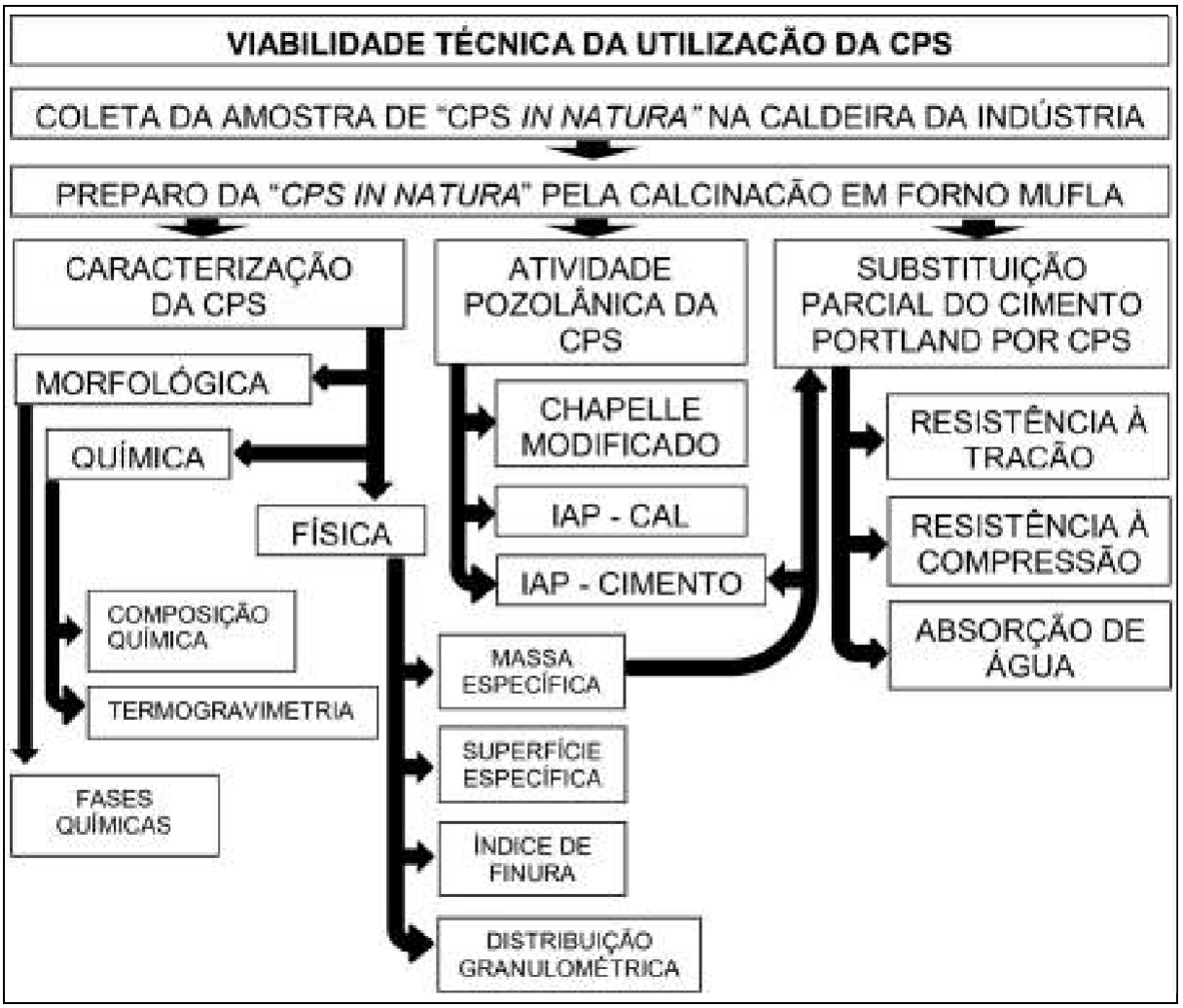


Figura 1 - Fluxograma da metodologia para a avaliação da viabilidade técnica da utilização da CPS como adição mineral ou substituição parcial ao cimento Portland

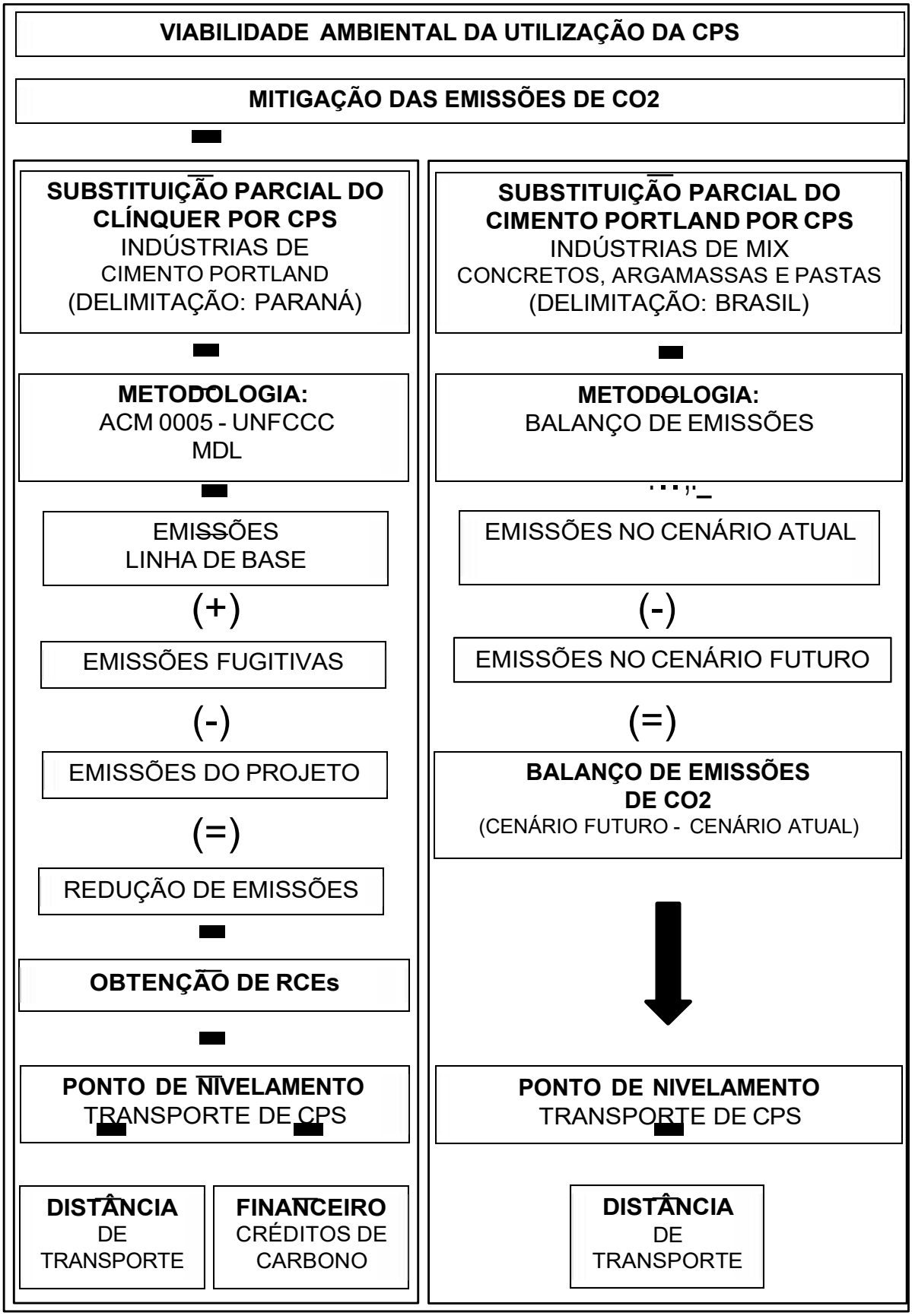


Figura 2 - Fluxograma da metodologia para a avaliação da viabilidade ambiental da utilização da CPS como adição mineral ou substituição parcial ao cimento Portland

3.1 MATERIAIS

Para a realização dos ensaios laboratoriais foram utilizados os seguintes materiais: Polpa de *Pínus spp.,* CPS (cinza de *Pínus spp.),* cal hidratada, cimento Portland, areia e água.

3.1.1 Polpa de *Pínus spp.*

A amostra de poupa de *Pínus spp.* utilizada no ensaio de termogravimetria foi obtida através de doação, na forma de cavaco, através de uma única coleta junto à Indústria de Compensados Guararapes, localizada no município de Palmas, estado do Paraná, que trabalha com o processamento do *Pínus spp.,* na produção de painéis de compensado.

3.1.2 CPS - Cinza de *Pínus spp.*

A amostra de CPS utilizada no conjunto de ensaios laboratoriais foi obtida junto à caldeira da empresa Marini Indústria de Compensados localizada no município de Palmas, estado do Paraná, que trabalha com o processamento do *Pínus spp.* na produção de painéis de compensado. A seleção por essa empresa se deu em função de que nos períodos das coletas ela se utilizava exclusivamente da queima de biomassa de resíduos de *Pínus spp.* para a alimentação de sua caldeira. A amostra foi composta por duas coletas de aproximadamente 25 kg cada, realizadas em um intervalo de aproximadamente dois meses. As coletas das cinzas de *Pínus spp.* ocorreram junto ao depósito temporário localizado no ponto de retirada das cinzas da caldeira, sendo acondicionadas em um container plástico com tampa. As cinzas coletadas foram misturadas e passaram a compor uma única "amostra de cinza" sendo denominada neste estudo como amostra de "CPS *ín natura",* uma vez que pelo seu aspecto visual de coloração e granulometria

aparentava a presença de carbono incombusto, o que foi confirmado posteriormente quando a amostra da "CPS *in natura"* foi submetida a um ensaio termogravimétrico.

3.1.3 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado na confecção dos CP (corpos de prova) para os ensaios de IAP cal e IAP cimento foi o CP Ii - F32 (amostra de referência registrada no laboratório dos institutos LACTEC). Esta escolha se deu em função desse ser o cimento padrão a ser utilizado de acordo com as normas ABNT NBR 5751 (2015) e ABNT - NBR 5752 (2014).

Para a confecção dos corpos de prova (CP) com argamassas contento a substituição parcial do cimento Portland por CPS, nas dosagens de 0,0%; 10,0%; 15,0% e 20,0% e que foram submetidos aos ensaios de resistência à tração na flexão, resistência mecânica à compressão, e absorção de água, foi utilizado o cimento Portland CP V ARI disponível nos laboratórios da Escola Politécnica da Universidade Positivo. Tal escolha se deu pelo fato desse cimento Portland não possuir em sua composição materiais pozolânicos, o que poderia mascarar a capacidade reativa da CPS nos resultados obtidos pelos ensaios. A massa específica da amostra de cimento Portland CP IV - ARI foi determinada através de ensaio realizado na Central Analítica da Universidade Positivo, de acordo com os procedimentos descritos pela norma ABNT- NBR 16605 (2017).

3.1.4 Cal hidratada

Na confecção das argamassas para os corpos de prova que continham em seu traço a presença de Cal, foi utilizada a cal hidratada, produzida conforme a ABNT NBR 7175 (2003), amostra de referência registrada junto ao laboratório dos Institutos LACTEC.

3.1.5 Agregado miúdo

Tanto para os ensaios do índice de atividade pozolânica realizados pelos laboratórios dos Institutos LACTEC como para os ensaios de viabilidade técnica na substituição parcial do cimento Portland realizados nos laboratórios da Escola Politécnica da Universidade Positivo, foram utilizados como agregado miúdo na confecção das argamassas dos corpos-de-prova (CP) a areia normal produzida pelo IPT, com quatro frações de mesma proporção em massa, sendo: fração grossa (nº 16), fração média grossa (nº 30), fração média fina (nº 50) e fração fina (nº 100). Tal escolha se deu em função desta areia atender os requisitos da norma ABNT NBR 7214: (2015) que determina a distribuição granulométrica dos agregados miúdos a serem utilizados nesses ensaios.

3.1.6 Água

Na confecção dos corpos de prova a água utilizada encontrava-se disponível no laboratório, fornecida pela rede publica, tendo como características a ausência de impurezas e sulfatos.

3.2 MÉTODOS

A metodologia adotada no desenvolvimento dessa pesquisa foi dividida em duas partes, de acordo com os objetivos propostos. A primeira parte representa a metodologia adotada para a avaliação da viabilidade técnica da utilização da GPS como material pozolânico. A segunda parte é constituída pela metodologia utilizada para a avaliação da viabilidade ambiental do uso da GPS como material pozolânico. Ambas as metodologias são detalhadas a seguir.

3.2.1 Viabilidade técnica da utilização da GPS

A avaliação da viabilidade técnica da utilização da GPS como material pozolânico requer a adoção de metodologias para a obtenção e preparo de amostras, realização de ensaios, obtenção e comparação dos resultados obtidos.

3.2.1.1 Preparo da polpa de *Pinus spp.*

A amostra de polpa de *Pinus spp.* após coletada foi exposta ao sol para uma secagem inicial. A polpa então foi transportada até a Central Analítica da Universidade Positivo onde foi seca em estufa a uma temperatura média de 120 ºC por um período de 24 h. A polpa seca foi submetida a um moinho de facas tipo *Willey* por 5 vezes, posteriormente submetida à um micro triturador de facas (ye//ow) e finalmente à uma peneira com malha 200 (abertura 0,075 mm). O material passante foi armazenado em tubo tipo *falcon* e encaminhado para o ensaio termogravimétrico.

3.2.1.2 Preparo da GPS

A amostra de "GPS *in natura"* coletada junto à caldeira da indústria de painéis de compensado foi transportada até a central analítica da Universidade Positivo onde foi armazenada. Separou-se uma pequena parcela que foi preparada para a realização do ensaio de termogravimetria, utilizando-se como preparo somente a submissão uma peneira com malha 200 (abertura 0,075 mm). O material passante foi armazenado em tubo tipo *falcon* e encaminhado para o ensaio termogravimétrico da "GPS *in natura".* O restante da amostra de GPS coletada na indústria foi armazenado até sua destinação à calcinação em mufla.

De acordo com o responsável técnico pela caldeira da indústria, o processo de queima da biomassa de *Pinus spp.* atinge temperaturas com picos entre 850 e

1000 ºC. Mesmo assim, para a definição da temperatura de calcinação levou-se em consideração as conclusões de Santos (1997), Weber (2001), Cordeiro (2006), Zain *et ai.* (2011), Tashima *et ai.* (2012), Antiohos *et ai.* (2013), que defendem que temperaturas de calcinação entre 400 e 600 ºC favorecem a obtenção de cinzas com morfologia predominantemente amorfas e grande estabilidade na formação de óxidos, uma vez que com a calcinação total do material orgânico há uma tendência na padronização das cinzas obtidas por diferentes amostragens. Além disso, utilizou-se das curvas termogravimétricas obtidas pela submissão da polpa de *Pinus spp.* e da "CPS *in natura"* ao analisador térmico simultâneo.

O tempo de permanência da "CPS *in natura"* no forno para uma calcinação final foi definido da seguinte forma: colocou-se no forno mufla aquecido previamente a 550 ºC um recipiente contendo 250 g de "CPS *in natura".* Após 60 min fez se a retirada do recipiente e utilizando-se de uma balança eletrônica, procedeu-se a determinação da massa de "CPS calcinadas", retornando imediatamente o recipiente com a CPS ao forno mufla. Repetiu-se o processo aos 80, 100, 120 e 140 min. Observou-se que não houve alteração da leitura da massa da "CPS calcinada" entre os tempos 120 e 140 min de submissão ao forno mufla. Dessa forma definiu-se pela permanência da "CPS *in natura"* no forno mufla por 120 min (2,0 h) por entender que esse período foi suficiente para uma calcinação final.

Após a definição da temperatura e tempo de exposição, iniciou-se o processo de preparo da CPS. A amostra de "CPS *in natura"* passou a ser fracionada em quantidades de aproximadamente 250 g por vez, em função da capacidade limitada pelas dimensões do forno mufla, as frações foram então colocadas em um recipiente e levadas ao forno mufla para calcinação. Em todo o processo de calcinação manteve-se a tampa do forno mufla parcialmente aberta com o auxílio de um suporte e a cada período médio de 15 min o recipiente contendo a CPS foi movimentado com o objetivo homogeneizar a CPS em calcinação, facilitar a entrada e exposição da CPS ao oxigênio e favorecer a formação dos óxidos de interesse para materiais pozolânicos. Ao final de cada período de calcinação, foram obtidos em média aproximadamente 50 g de CPS, que após resfriadas à temperatura ambiente foram armazenadas em um recipiente de vidro com tampa. O processo de preparo da CPS pela calcinação em mufla foi repetido até a obtenção da quantidade necessária para a realização do conjunto de ensaios de caracterização e viabilidade técnica de uso da CPS, ou seja, até a obtenção de aproximadamente 4,0 kg de

CPS. As frações de CPS armazenadas ao final de cada processo foram todas juntadas em um único recipiente, homogeneizadas e novamente divididas em quantidades de acordo com as demandas dos ensaios do programa experimental. Amostras foram encaminhadas a seis locais distintos: Central Analítica da Universidade Positivo (ensaio de termogravimetria); Laboratórios da Escola Politécnica da Universidade Positivo (ensaio de superfície específica da CPS e ensaios de viabilidade técnica de substituição parcial do cimento Portland por CPS: resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão, absorção de água); Central de análises - UTFPR Campus Pato Branco (análise morfológica - DRX); Laboratório de análises de minerais e rochas - LAMIR - UFPR (composição química - FRX e granulometria - difração de raios laser); Laboratórios dos Institutos LACTEC (massa específica, superfície específica, índice de finura e índices de atividade pozolânica - IAP cal e IAP cimento); Laboratório de Solos do IFPR Campus Palmas (ensaio de índice de atividade pozolânica pelo método de *Chapei/e Modificado).*

3.2.1.3 Caracterização física da CPS

Os ensaios para determinar as massas específicas das amostras de GPS e do cimento CP li - F32 foram realizados pelos laboratórios dos Institutos LACTEC de acordo com os procedimentos descritos pela norma ABNT- NBR 16605 (2017). As massas específicas determinadas foram utilizadas para o cálculo dos traços das argamassas para a confecção dos corpos de prova (CP) necessários para os ensaios de atividade pozolânica (IAP-CAL e IAP-cimento). Os ensaios para determinar as massas específicas das amostras de CPS e do cimento CP V - ARI foram realizados na Central Analítica da Universidade Positivo, de acordo com os procedimentos descritos pela norma ABNT- NBR 16605 (2017). As massas específicas determinadas foram utilizadas para o cálculo dos traços das argamassas para a confecção dos corpos-de-prova (CP) necessários para os ensaios com substituição parcial do cimento Portland CP V - ARI por CPS, nos ensaios de resistência mecânica à tração na flexão, resistência mecânica à compressão e absorção de água.

A determinação da superfície específica ou finura da amostra de GPS foi realizada pelos laboratórios dos Institutos LACTEC utilizando-se do método de permeabilidade ao ar ou método de Blaine, de acordo com os procedimentos descritos pela norma ABNT - NBR 16372 (2015). Paralelamente, nos laboratórios da Escola Politécnica da Universidade Positivo, foram realizados ensaios de determinação de superfície específica para a amostra de GPS e o do cimento Portland CP V - ARI, de acordo com os procedimentos descritos pela norma ABNT - NBR 16372 (2015).

A determinação do índice de finura da GPS foi realizada pelos laboratórios dos Institutos LACTEC por meio de peneirador aerodinâmico, utilizando-se dos procedimentos descritos pela norma ABNT NBR 12826:2014/2014.

A análise da distribuição granulométrica da amostra de GPS foi realizada pelo Laboratório de análises de minerais e rochas - LAMIR - UFPR, pela técnica de análise granulométrica por difração de raios laser. Para tanto foi utilizado um granulômetro a laser modelo CILAS 1064, que possibilita a leitura da distribuição do tamanho de partículas em uma faixa de 0,04 a 500 micras, configurado na forma líquida e utilizando o software para tratamento e integração de análises, onde uma amostra de GPS com massa inicial de 100 g foi submetida ao ensaio durante 60 s.

3.2.1.4 Caracterização química da GPS

Foi realizado o ensaio de análise química semi-quantitativa total da GPS, pelo Laboratório de análises de minerais e rochas - LAMIR da UFPR, com a utilização da técnica da espectrometria de fluorescência de raios X - FRX, onde o pó prensado de GPS foi submetido ao espectrômetro modelo PANalytical Axios Max.

Análises termogravimétricas foram realizadas para três amostras: Polpa de *Pínus spp.;* "GPS *ín natura':·* GPS calcinada em mufla. Para a realização de cada um dos três ensaios termogravimétricos, cada uma das três amostras com massa inicial de 6,0 mg foi submetida a um analisador térmico simultâneo modelo Shimadzu DTG-60, com cadinho de alumina, atmosfera de ar sintético com razão de 50 ml/min; razão de aquecimento de 1O ºC/min e temperatura máxima de 900 ºC.

3.2.1.5 Caracterização morfológica da CPS

Para a caracterização morfológica da CPS calcinada em mufla, foi utilizada a técnica de difratometria de raios X (DRX), através de ensaio realizado na Central de análises da UTFPR - Campus da Cidade de Pato Branco, estado do Paraná. O equipamento utilizado foi o Difratômetro de Raios X, modelo *Miniflex 600,* Rigaku atendendo os seguintes parâmetros: faixa de varredura 4 a 70º 20, Incremento/passo 0,02° e, com tempo de leitura de 0,3 s.

3.2.1.6 Atividade pozolânica da CPS

O ensaio para determinar a atividade pozolânica da CPS através do consumo (fixação) do Ca(OH)2, foi realizado no Laboratório de solos do Instituto Federal do Paraná - IFPR, Campus Palmas, pelo método *Chapei/e Modificado,* sendo utilizados os procedimentos descritos pela **ABNT** - **NBR** 15895 (201O).

O ensaio de determinação do Índice de atividade pozolânica com a cal - IAP-cal foi executado pelos laboratórios dos institutos LACTEC de acordo com os procedimentos descritos pela norma ABNT NBR 5751 (2015). Este ensaio determina a resistência de corpos de prova moldados com argamassa contendo CPS e traços de cal, submetidos à compressão axial aos 7 dias de cura. O resultado obtido se comparado com o requisito mínimo de 6,0 MPa definido pela da norma ABNT - NBR 12653 (2014/15) permite definir a ocorrência de atividade pozolânica do material analisado. A comparação com o resultado obtido por outras cinzas de biomassa já caracterizadas como pozolanas pela bibliografia também possibilita a determinação da viabilidade de uso do material como pozolana.

O ensaio de índice de atividade pozolânica com o cimento - IAP-Cimento, foi realizado pelos laboratórios dos Institutos LACTEC de acordo com os procedimentos descritos na norma ABNT - NBR 5752 (2014). Este ensaio determina o índice de atividade pozolânica dos corpos de prova moldados com pasta de cimento substituído parcialmente (25,0%) por CPS, submetidos à compressão axial aos 28

dias de cura úmida. Os resultados da resistência à compressão devem ser comparados percentualmente com os valores de resistência obtidos pelos corpos de prova de referência (REF.) onde não há substituição do cimento por CPS. A obtenção de resistência em valores 75,0% do obtido pela referência (REF.) determinam a ocorrência de atividade pozolânica pela CPS, podendo de acordo com os parâmetros estabelecidos na ABNT - NBR 16697 (2018) ser utilizada como adição mineral na produção do cimento Portland. Já, de acordo com a norma ABNT - NBR 12653 (2014/15), caso a resistência obtida alcance valores 90,0% do obtido pela referência (REF.) será possível determinar a viabilidade da utilização da CPS como substituto parcial do cimento Portland em concretos, argamassas ou pastas.

3.2.1.7 Substituição parcial do cimento Portland por CPS

Para determinar a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland por CPS na produção de matrizes cimentícias, tomou-se por referências os trabalhos desenvolvidos por Singh *et ai.* (2000), Weber (2001), Cordeiro (2006), Ganesan *et ai.* (2007), De Paula *et ai.* (2009), Poggiali (201O), Tashima *et ai.* (2012), Ribeiro & Morelli (2014), Rêgo *et ai.* (2015), Rezende (2016), para a definição das proporções de substituição a ser adotadas nos ensaios. Dessa forma, definiu-se pelas proporções de 0,0% (ou REF); 10%; 15%; 20% de substituição em massa do cimento Portland por CPS. Os ensaios foram realizados nos laboratórios da Escola Politécnica da Universidade Positivo, de acordo com os seguintes procedimentos:

- Os traços para a moldagem dos corpos de prova (CP) foram definidos levando-se em consideração os parâmetros descritos pela norma ABNT - NBR 7215 (2019). Dessa forma, os traços utilizados atenderam a proporção de 1:3 aglomerante (cimento) : agregado (areia) e relação água/cimento (a/c) de 0,48.
- O preparo das argamassas seguiu os procedimentos descritos na norma ABNT - NBR 13276 (2016), já a moldagem e cura dos CP foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos na norma ABNT - NBR 13279 (2005). Para cada traço de argamassa foram produzidos CP em moldes prismáticos metálicos de medidas 4,0 x 4,0 x 16,0 cm, os

quais foram submetidos aos ensaios de resistência mecânica à tração na flexão aos 7 e 28 dias de cura, resistência mecânica à compressão aos 7 e 28 dias de cura, absorção de água por imersão e fervura aos 28 dias de cura.

- Os ensaios de resistência mecânica à tração na flexão e resistência mecânica à compressão foram realizados de acordo com os procedimentos definidos pela norma ABNT - NBR 13279 (2005). Os corpos de prova prismáticos foram submetidos à máquina universal de ensaio do fabricante Emic modelo DL 30000, nas idades de 7 e 28 dias, com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min, de acordo com as recomendações da ABNT - NBR 7215 (2019).
- Os ensaios de absorção de água pelos CP foram realizados de acordo com as normas ABNT - NBR 9778 (2005/2009), pelos métodos de imersão e fervura aos 28 dias de cura úmida.

3.2.2 Viabilidade ambiental na utilização da CPS

A determinação da viabilidade ambiental da utilização da CPS demanda a adoção de metodologias que possibilitem a comparação entre os impactos ambientais atuais e futuros advindos de sua utilização. Adotando como referência e ponto de partida os trabalhos realizados por Fairbairn *et ai.* (2012), Costa (2012), Handayeni (2014) e Rezende (2016), definiu-se pela realização de dois estudos para a avaliação da viabilidade ambiental da utilização da CPS. O primeiro estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade ambiental da utilização da CPS como adição mineral ao cimento Portland, tendo como delimitação o estado do Paraná. Foi utilizada como referência metodológica os projetos dos "Mecanismos de Desenvolvimento Limpo" (MDL) propostos pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC), também conhecida como UNFCCC (do original em inglês United Nations Framework Convention on Climate Change), objetivando a obtenção de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs). O segundo estudo objetivou realizar um balanço de emissões de CO2 com delimitação para o território brasileiro, com a destinação da CPS para uso em substituição parcial do

cimento Portland na produção de concretos, argamassas ou pastas. As metodologias utilizadas para a realização de cada estudo são apresentadas a seguir.

3.2.2.1 GPS como adição mineral ao cimento Portland e a obtenção de RCEs

Visando determinar em um cenário hipotético a implementação de um projeto de MDL com vistas à obtenção de RCEs pelas indústrias cimenteiras do estado do Paraná, definiu-se pela utilização da "Metodologia de linha de base aprovada e consolidada para aumentar a mistura na produção do cimento" - ACM 0005 (UNFCCC, 2012). Para o desenvolvimento da metodologia exige-se a determinação de dois cenários distintos para o cálculo das emissões. O primeiro cenário é denominado de "Cenário de linha de base" *(Baseline Scenario)* e deve apresentar as emissões potenciais que tenderão a ocorrer em um período futuro no caso de manutenção dos atuais processos de produção. Esse cenário representa, portanto, a tendência do histórico das emissões mantendo-se os processos atuais de produção do cimento Portland. O cenário futuro é denominado "cenário do projeto" *(Project Scenario)* e deve representar as emissões que tendem a ocorrer caso efetive-se a implantação do projeto. O cálculo das emissões envolve quatro etapas principais: Emissões de linha de base *(Baseline emissions),* Emissões fugitivas *(Leakage),* Emissões do projeto *(Project emissions),* e Redução de emissões *(Emissions reduction).* Para o "Cenário da Linha de base" *(Baseline),* considera-se a adoção do sistema produtivo onde ocorram os menores níveis de emissões, objetivando conservadorismo no cálculo de redução de emissões CO_2. As emissões do cenário da linha de base *(Baseline emissions)* foram calculadas utilizando-se a equação (6):

$$BEsc\ (t/t) = (BEclínquer\ .\ BEblend) + BEele\ ADD_BC \quad (6)$$

Onde:

- BE_{8c} = emissão total de CO_2 na produção de cimento Portland no cenário da linha de base, expresso em t de CO_2 / t de cimento Portland produzido (t/t);

- $BE_{clínquer}$ = emissões totais de CO_2 na produção de clínquer no cenário da linha de base, expresso em t de CO_2 / t de clínquer (t/t);
- BE_{biend} = fração de clínquer utilizada na produção do cimento Portland no cenário da linha de base, expresso em t de clínquer / t de cimento (t/t);
- $BE_{eie\ ADD_Bc}$ = emissões de CO_2 na produção do cimento Portland, sem considerar as emissões relativas à produção do clínquer, expresso em t de CO_2 / **t** de cimento Portland (t/t).

Para o cálculo das emissões na produção de clínquer. foi utilizada a equação (7):

$$BEc1ínquer\ \mathbf{(t/t)} = BEcalcin + BEtossil_fuel + BEele_grid_CLNK + BEele_sg_CLNK \quad (7)$$

Onde:

- BE_{calcin} = quantidade de emissões advindas da calcinação do carbonato de cálcio e de magnésio na linha de base, é expresso em t de CO_2 / t de clínquer produzido.
- BE_{rossil_fuel} = quantidade de emissões ocasionadas pela queima de combustíveis fósseis utilizados como fonte de energia na produção de clínquer na linha de base. Para seu cálculo deve se somar todos os tipos de combustíveis utilizados, ponderando-se pelo fator de emissão de cada um, expresso em t de CO_2 / t de clínquer produzido;
- $BE_{eie_grid_CLNK}$ = quantidade de emissões de CO_2 pelo uso de energia elétrica obtida junto à rede de transmissão e utilizada na produção de clínquer na linha de base. Para seu cálculo utiliza-se a quantidade total de energia ponderada em função do fator de emissão da rede, é expresso em t de CO_2 / t de clínquer;
- $BE_{eie_sg_CLNK}$ = quantidade de emissões de CO2 ocasionadas pela autogeração de energia elétrica que é utilizada na produção de clínquer na linha de base, seu cálculo se dá de forma similar da $BE_{eie_grid_CLNK}$, é expresso em t de CO_2 / t de clínquer;

Sendo:

- Para a realização dos cálculos de emissões de CO_2 do presente estudo utilizados os percentuais de emissões de acordo com SNIC (2019b): 70,0% advindos da produção de clínquer e os 30,0% restantes emitidos na obtenção das matérias-primas, transporte e preparo das adições. Na produção do clínquer, 63,0% advindo da calcinação dos carbonatos de cálcio e magnésio, 36,0% da queima de combustíveis fósseis e 1,0% do uso da eletricidade da rede.

- Que de acordo com Fairbairn *et ai.* (2012) a metodologia ACM 0005 determina que as emissões de CO_2 relativas à rede elétrica devem ser calculadas adotando-se a metodologia denominada "Ferramenta para calcular o fator de emissão para um sistema elétrico" *(Too/ to calculate the emission factor for an e/ectricity system),* da UNFCCC ou utilizados valores locais pré-determinados se forem precisos e confiáveis. Nesse estudo foi utilizado o valor proposto por GNR project reporting CO_2 (2020) e SNIC (2019b) correspondendo a 1,0% do total de emissões na produção de clínquer.
- Para os volumes totais médios de emissões de CO_2 na produção de cimento Portland no Brasil, utilizado o valor de 0,530 t de CO_2 / t de cimento Portland, de acordo com o estimado para o ano de 2020 por SNIC (2019b);
- Considerada as emissões na autogeração de eletricidade utilizada na produção de clínquer igual a zero, por não terem sido encontrados registros de autogeração e uso dessa energia pelas as indústrias cimenteiras do estado do Paraná.

O cálculo das "Emissões Fugitivas" *(Leakage)* corresponde à segunda etapa do cálculo das emissões. Essas emissões ocorrem fora do processo produtivo de uma indústria de cimento Portland e são caracterizadas pela queima de combustíveis fósseis durante o transporte de insumos para a indústria. Dentro da metodologia adotada, as emissões fugitivas foram calculadas pela equação (8):

$$L = Ladd_trans\ (Ablend - Pblend)\ ,\ Bc \qquad (8)$$

Onde:

- L = Total de emissões de CO_2 fugitivas relacionadas ao transporte de adições (nesse caso a CPS), para a produção do cimento Portland, expressa em (t);
- Ladd_t,ans = emissões de CO_2 obtidas pelo sistema de transporte de adições até as indústrias cimenteiras, expresso em t de CO_2 / t de adição (Ut);
- Ablend = Fração de adição mineral ao cimento Portland no cenário da linha de base, expresso em t de adição mineral / t de cimento Portland (Ut);
- Pbiend = Fração da adição mineral ao cimento Portland no cenário do projeto de emissões, expresso em t de adição mineral / t de cimento Portland (Ut);

- Bc = Produção anual de cimento Portland no cenário do projeto de emissões, expresso em (Ua)

Sendo:

- Para o cálculo das emissões fugitivas desse estudo, considerado somente àquelas relacionadas aos sistemas de transporte da CPS, seja no cenário da linha de base (à distâncias médias menores, até a sua disposição final em solos de cultivas florestais ou aterros sanitários) ou no cenário do projeto de emissões (à distâncias médias maiores, até as indústrias cimenteiras);
- O cálculo das emissões foi feito somente para o transporte da CPS a ser usada no cenário do projeto de emissões, mesmo sabendo que as emissões no transporte de outras possíveis adições presentes no cenário da linha de base tendam a diminuir com a redução da fração de clínquer no cimento Portland;
- Entendido como destinação final da CPS no cenário da linha de base o encaminhamento da CPS como resíduos para a disposição final em aterros industriais ou em solos de cultivas florestais, normalmente localizados no mesmo município onde se encontra a indústria geradora da CPS, ou em municípios próximos;
- Considerado que as distâncias de transporte para destinação final da CPS no cenário da linha de base não é constante para uma mesma indústria nem para indústrias diferentes ao longo do tempo;
- No cenário da linha de base, considerado o custo de transporte da CPS como resíduo, como elevado, dando-se preferência para a disposição final em locais mais próximos como forma de minimizá-los;
- Pelos motivos apontados, adotado para o cenário da linha de base uma distância média de 100 km para o transporte da CPS até o local da disposição final, já considerado trajetos de ida e volta para o caso de não haver transporte de outros produtos no retorno dos caminhões. Justifica-se a adoção da distância média de 100 km, pois tende a contemplar o que ocorre atualmente no transporte das cinzas até a sua disposição final. Além disso, a fixação da distância média em 100 km teve por objetivo

facilitar a comparação de emissões no transporte a outras distâncias, bastando realizar divisões ou multiplicações decimais ou centesimais;

- Proposta a alteração do destino do transporte da CPS no cenário do projeto de emissões, até as indústrias cimenteiras, para substituição parcial ao clínquer na produção do cimento Portland. Assim, a distância de transporte considerada para o cálculo das emissões fugitivas se deu pela diferença entre a distância do cenário da linha de base (disposição final da CPS) e distância do cenário do projeto de emissões (substituição parcial ao clínquer);
- Para a estimativa das emissões no transporte da CPS, utilizado o valor unitário médio de 7,456 .10-^{5} (t CO_2 / t cinza / km) obtido por Fairbairn *et ai.* (2012) que realizou o cálculo das médias de emissões de CO_2, assumido a utilização de um caminhão movido a diesel cujas características de capacidade de carga e consumo específico de combustível se assemelhavam aos dos veículos mais vendidos para este tipo de transporte, de acordo com dados da Associação dos Fabricantes de Veículos Automotores.

O cálculo das "Emissões do Projeto" corresponde à terceira etapa da metodologia. Nessa etapa foram calculadas as emissões de CO_2 na produção do cimento Portland de acordo com o cenário do projeto de emissões. Para o cálculo foram utilizadas equações idênticas às da primeira etapa ou do cenário da linha de base, com a alteração dos termos de BE para PE. De acordo com Fairbairn *et ai.* (2012), os termos BEc1inker e PEc1inker são iguais para o caso do clínquer a ser utilizado no cenário do projeto de emissões ter as mesmas características do clínquer produzido no cenário da linha de base, alterando-se apenas as frações de clínquer no cimento Portland no cenário do projeto de emissões. Da mesma forma, os termos BEe1e_Aoo_sc e PEe1e_Aoo_sc são também idênticos pois não foi considerada a ocorrência de emissões de CO_2 relacionadas ao preparo da CPS para seu uso como adição. O cálculo da fração de CPS a ser utilizada em substituição parcial ao clínquer foi obtida com a utilização da quantidade de CPS e de Cimento Portland produzida anualmente no estado do Paraná, de acordo com a Equação (1O). Assim, os valores obtidos na Equação (7) foram utilizados no cálculo das emissões do cenário do projeto de emissões, utilizando-se as Equações (9) a (11):

$$PEsc = (PEc1ínquer \ . \ PEblend\} + PEele_{ADD_BC} \quad (9)$$

$$CPS_{_BLEND} = CPS_{_PA}\ (t) / BC\ (t) \quad (10)$$

$$PEblend = BEblend - \mathbf{CPS}_{_BLEND} \quad (11)$$

Onde,

- PE_8c = emissão total de CO_2 na produção de cimento Portland no cenário do projeto de emissões, expresso em t de CO_2 / t de cimento Portland produzido (Ut);
- PEc1ínquer = BEclínquer: emissões totais de CO_2 na produção de clínquer no cenário da linha de base, expresso em t de CO_2 / t de clínquer (Ut)
- PEblend = fração de clínquer utilizada na produção do cimento Portland no cenário do projeto de emissões, expresso em t de clínquer / t de cimento (t/t)
- PEe1e_Aoo_sc = $BEe1e_Aoo_{_8}c$: emissões de CO_2 na produção do cimento Portland, sem considerar as emissões relativas à produção do clínquer, expresso em t de CO_2 / t de cimento Portland (Ut).
- $CPS_{_BLEND}$ = fração de CPS no cimento Portland, expresso em porcentagem;
- CPS_PA = produção anual de CPS, expresso em (t);
- BC = produção de cimento para cada ano do projeto, expresso em (t).

O cálculo da redução das emissões corresponde a quarta etapa da metodologia e foi calculada pela Equação (12):

$$ER = [(BE_8c - PEac) \times BC + L] \times (1 - a) \quad (12)$$

Onde:

- ER = redução anual de emissões de CO_2, expresso em kt de CO_2;
- BE_8c e = emissões totais anuais de CO_2 na produção do cimento Portland na Linha de Base, expresso em t de CO_2 / t de cimento Portland produzido;
- PE_8c = emissões totais anuais de CO_2 na produção do cimento Portland no Projeto de Emissões, expresso em t de CO_2 / t de cimento Portland produzido;
- BC= produção total de cimento Portland para cada ano do projeto, expresso em (t);
- L = emissões fugitivas totais de CO_2 relativas ao transporte de adições (nesse caso a CPS) até as cimenteiras, expresso em (t CO_2);
- a = emissão extra de CO_2 proporcionada pela diversificação do uso da CPS. Isto ocorreria caso a quantidade efetivamente excedente de CPS após sua destinação ao uso da Linha de Base não fosse suficiente para alimentar o projeto de emissões. Nesse caso, o cálculo seria feito pela ponderação das reduções de emissões de CO_2 pelo fator

"a" dividindo-se a quantidade de CPS não excedentes pela quantidade total de CPS usada no projeto. Porém, no caso da CPS, até o presente momento não existe nenhuma alternativa adequada de uso, apenas em alguns casos acaba sendo utilizada como adubo no cultivo florestal, mais como forma de destinação final do que para aproveitamento de suas propriedades nutritivas. Assim, como a quantidade de CPS terá a capacidade de suprir a demanda do Projeto de Emissões, o fator "a" pode ser considerado nulo.

Sendo:

- Para a realização dos cálculos de emissões, admitido hipoteticamente o uso de CPS residual coletada diretamente de caldeiras de indústrias madeireiras sem sofrer nenhum tratamento posterior, somente o transporte até as cimenteiras em substituição ao transporte para disposição final. Evidentemente que para o caso de uma efetiva aplicação industrial da CPS, será necessário o desenvolvimento de uma metodologia para a sua obtenção.
- Para o cálculo das reduções de emissões não foram determinadas as emissões relativas aos aditivos e à gipsita, representadas pelos termos BEe1e_Aoo_sc e PEe1e_Aoo_sc das Equações (6) e (9), como estes termos são equivalentes tanto na "Linha de Base" quanto no "Projeto de Emissões", acabam por se anular no cálculo da redução de emissões, pois a quantidade de aditivo e gipsita em ambas as situações será igual.

Para o cálculo da distância de transporte da CPS para o uso em substituição parcial ao clínquer no cenário do projeto de emissões, foi preciso avaliar a distribuição geográfica das madeireiras que produzem CPS e das indústrias cimenteiras do estado do Paraná. Segundo Eisfeld & Nascimento (2015), aproximadamente 94% da produção e industrialização de *Pínus spp.* no Paraná se encontra na região Centro-Sul, que compreende as regiões de Jaguariaíva-Arapoti, Telêmaco Borba, Ponta Grossa, Curitiba, Guarapuava e União da Vitória. Para determinar a distância média para o transporte da CPS até as indústrias cimenteiras, foi calculada uma média das distâncias dos seis polos madeireiros do estado do Paraná (Jaguariaíva-Arapoti, Telêmaco Borba, Ponta Grossa, Curitiba, Guarapuava e União da Vitória) até cada uma das três plantas industriais produtoras de cimento

Portland no Paraná: Itambé (Balsa Nova); Votorantim (Rio Branco do Sul); Supremo (Adrianópolis).

Do ponto de vista econômico, utilizando-se de conceitos ligados à Economia Circular - EC, desenvolveu-se uma metodologia para esse trabalho objetivando calcular dois "Pontos de Equilíbrio - PE". O primeiro PE foi calculado em função das distâncias de transporte da GPS e das quantidades de emissões de CO_2 advindas desse transporte. O segundo PE foi calculado em função dos custos de transporte da GPS e das receitas advindas da obtenção e venda de RCEs. Tanto a distância como o custo de transporte são fatores potencialmente limitantes para o uso da GPS em substituição parcial ao clínquer em uma Economia Circular. O Ponto de Equilíbrio de emissões de CO_2 em relação à distância de transporte ocorre quando as emissões geradas em t de CO_2 / t de GPS transportada se igualam às emissões de CO_2 mitigadas por t de clínquer não produzido (por ter sido substituído por GPS). Para o cálculo do ponto de equilíbrio na emissão de CO_2 no transporte, ou seja, a "Distância de Equilíbrio de Emissões de CO_2 no Transporte de GPS" foi deduzida a Equação (13):

DE_C02_T **(km)** = BEclínquer **(t/t)** / CO2_T_CPS **(t/t/km)** (13)

Onde:

- (DE_c02_T) = Distância de equilíbrio de emissões de C02no transporte da CPS, expressa em (km);
- BEc1ínquer = emissões em t de C02 / t de clínquer na linha de base (t/t);
- C02_T_cPs = emissões de C02no transporte da CPS, expresso em **t** de C02 / **t** de CPS transportada a cada km de transporte **(t** C02/ t CPS / km);

O Ponto de Equilíbrio "Financeiro" em relação a "Distância de Transporte" ocorre quando o valor médio obtido pela venda de RCEs relativas à substituição de clínquer por GPS se iguala ao custo total de transporte da GPS até a indústria cimenteira. Para o cálculo da "Distância de Equilíbrio Financeiro no Transporte de GPS" foram deduzidas as Equações (14) e (15):

DE_F_T(km) = RCEs_s_clinquer (R$/t) / [(V_RCE (R$). C02_T_cps(Ut/km)) + CT_cps(R$/t/km)] (14)

RCEs_S_Clinquer (R$/t) = V_RCE (R$) . BEc1inquer (t) (15)

Onde:

- (DE_{F}_T) = Distância de equilíbrio financeiro no transporte da CPS, expressa em (km);
- RCEs_s_clínquer = Receita da venda de RCEs obtidas pela substituição de uma t de clínquer por uma t de CPS, expresso em (R$/t);
- V_RcE = valor médio de venda de uma RCE (correspondente a mitigação de uma t de emissões de $CO_{2)}$, expresso em R$;
- CO_2_T_cPs = emissões de CO_2 no transporte da CPS, expresso em t de CO_2 / t de CPS transportada a cada km de transporte (t CO_2 / t CPS / km);
- CT_cPs = custo de transporte da CPS, expresso em (R$ / t / km);
- BEclinquer = emissões de $CO_{2,}$ na produção de clínquer na linha de base, expresso em t de CO_2 / t de clínquer (t/t);

Sendo:

- Determinado o custo de transporte, pela análise dos diferentes valores de frete constantes nas tabelas da Agência Nacional de Transportes Terrestre - ANTT. Os valores para transporte variam principalmente em função da distância, tamanho do veículo de transporte e tipo de carga. Simulando o custo de transporte a granel, em veículos de 3 eixos, com capacidade mínima de transporte de 20 t, para distâncias médias de 300 km, obteve-se valores médios de aproximadamente R$ O,16/t/km. Para esse estudo foi adotado um valor médio de R$ 0,20 /t/km de forma mais conservadora;
- Para os valores de mercado relativos à comercialização das RCEs obtidos através de pesquisa em Investing.com (2020), obtendo-se se o valor médio para o mês de outubro de 2020 de aproximadamente 25,00 Euros por RCE, ou na conversão do dia 24 de outubro de 2020, R$ 166,00. De forma conservadora, foi adotado o valor de R$ 140,00 por RCE.

3.2.2.2 CPS em substituição parcial ao cimento Portland e as emissões de CO_2

Para a análise da viabilidade ambiental da utilização da CPS em substituição parcial ao cimento Portland, delimitou-se o estudo para o território brasileiro, abrangendo os volumes totais médios anuais de produção e consumo de

cimento Portland e de geração de GPS. Para o estudo foi desenvolvida uma metodologia, baseada nos trabalhos realizados por Fairbairn *et ai.* (2012); Costa (2012); Handayeni (2014), Rezende (2016) e a metodologia ACM 0005 (UNFCCC, 2012). Definiu-se pela realização de um "Balanço de Emissões", comparado às emissões de CO_2 observadas no "Cenário Atual", com as potenciais emissões em um "Cenário Futuro", com a GPS sendo encaminhadas para utilização na confecção de concretos, argamassas ou pastas. Definiu-se como "Cenário Atual" os padrões atuais de emissões anuais de CO_2 pela cadeia produtiva tradicional do cimento Portland, somadas às emissões anuais de CO_2 no transporte, relacionadas ao modelo atual de destinação da GPS, conforme descrito nas Equações (16) a (18):

$$CO2_A_CA\ (t) = CO2_A_CP\ (t) + CO2_A_T_CPS_D\ (t) \quad (16)$$

$$CO2_A_CP\ (t) = CPPA\ (t) \times CO2_E_CP\ (Ut\ \text{de cimento}) \quad (17)$$

$$CO2_A_T_cPs_o\ (t) = GPS_PA\ (t) \times DT_o\ (km) \times CO2_ET\ (t\ CO2/\ t\ CPS/km) \quad (18)$$

Onde,

- CO_2_A_cA = emissões anuais de CO_2 no cenário atual, expresso em **(t);**
- CO_2_A_cP= emissões anuais de CO_2 na produção do cimento Portland, expresso em (t);
- CO_2_A_T_cPs_o = emissões anuais de CO_2 no transporte da CPS para a disposição final, expresso em (t);
- CPPA = produção anual de cimento Portland, expresso em (t);
- CO_2_E_CP= emissões de CO_2 na produção do cimento Portland, expresso em t de CO_2 / **t** de cimento Portland produzido (t/t);
- CPS_PA = produção anual de CPS, expresso em (t);
- DT_0 = distância do transporte da CPS até a disposição final, expresso em (km);
- CO_2_ET = emissões totais médias de CO_2 no transporte da CPS, expresso em t de CO_2 / **t** de CPS transportada / km de transporte (t/t/km).

Para o cálculo das emissões atuais de CO_2 no transporte da GPS, utilizou-se o mesmo método adotado para o cálculo das emissões do transporte da GPS produzida no estado do Paraná que objetivou a análise da viabilidade da obtenção de RCEs. Porém, extrapolou-se o cálculo, considerando o transporte da GPS produzida em todo o Brasil. Pelas mesmas razões apontadas no cálculo das emissões para a obtenção de RCEs, admitiu-se hipoteticamente uma distância média de 100 km para o transporte da GPS até o local da disposição final no

"Cenário Atual", já considerando os trajetos de ida e volta. Calculou-se as emissões em t de CO_2 / t de cinza transportada por km, sendo utilizada a estimativa feita por Fairbairn *et ai.* (2012) em 7,456 $.10^{-5}$ t CO_2/t cinza/km.

Definiu-se como "Cenário Futuro" as emissões de CO2 no Brasil no caso hipotético da utilização do total de CPS em substituição parcial do cimento Portland em concretos, argamassas ou pastas em uma proporção de até 10,0%. Para o cálculo das emissões do "Cenário Futuro", considerou-se que qualquer quantidade de CPS utilizada determina uma diminuição na produção de cimento Portland na mesma quantidade, uma vez que a CPS irá substituí-lo parcialmente e as quantidades disponíveis são pequenas se comparadas à demanda anual de cimento Portland. Para o cálculo de emissões considerou-se uma quantidade menor de cimento Portland a ser produzido, obtida pela diferença da quantidade de produção no cenário atual descontando-se a quantidade estimada de produção anual de CPS no Brasil. A essas emissões foram somadas às emissões no transporte da CPS até as indústrias de concretos, argamassas e pastas ou "indústrias de mix", conforme as equações (19) a (21):

$$CO2_A_CF\ (t) = CO2_A_CP_CF\ (t) + CO2_A_T_CPS_S\ (t) \quad (19)$$

$$CO2_A_cP_cF\ (t) = CPPA_cF\ (t) \times CO2_E_cP\ (t/t\ de\ cimento) \quad (20)$$

$$CO2_A_r_cPs_s\ (t) = CPS_PA\ (t) \times DT_s\ (km) \times CO2_ET\ (t\ CO2/\ t\ CPS/km) \quad (21)$$

Onde,

- CO_2_A_cF= emissões anuais de CO_2 no cenário futuro, expresso em (t);
- CO_2_A_CP_cF = emissões anuais de CO_2 na produção do cimento Portland no cenário futuro, expresso em (t);
- CO_2_A_T_cPs_s= emissões anuais de CO_2 no transporte da CPS para a substituição parcial do cimento Portland, expresso em (t);
- CPPA_cF = produção anual de cimento Portland no cenário futuro, expresso em (t);
- CO_2_E_cP= emissões de CO_2 na produção do cimento Portland, expresso em t de CO_2 / t de cimento Portland produzido *(Ut);*
- CPS_PA = produção anual de CPS, expresso em (t);
- DT_s = distância média do transporte da CPS para a substituição parcial do cimento Portland, expresso em (km);
- CO_2_ET = emissões totais médias de CO_2 no transporte da CPS, expresso em t de CO_2 / t de CPS transportada / km de transporte. Para esse cálculo, foi utilizado o valor unitário determinado por Fairbairn *et ai.* (2012).

Para o cálculo do total de emissões de CO_2 no "Cenário Futuro", fez-se necessário a definição de uma distância média do transporte da CPS até as "indústrias de mix". Como existe também uma grande variação nas distâncias das indústrias madeireiras geradoras de CPS até as "indústrias de mix', adotou-se hipoteticamente uma distância média de 200 km entre as empresas madeireiras geradoras de CPS e as "indústrias de mix", potenciais empresas usuárias da CPS, já considerando distâncias de ida e volta dos veículos transportadores. Observa-se ainda, que de forma conservadora, não foram consideradas no cálculo as mitigações de emissões de CO_2 pelo transporte não realizado do cimento Portland das indústrias cimenteiras até as "indústrias de mix", correspondente a parcela de substituição do cimento Portland por CPS.

O cálculo do "Balanços de Emissões de CO_2", foi realizado através da comparação das emissões no "Cenário Atual" ou "linha de base" com o "Cenário Futuro" ou "Projeto de Emissões", conforme a equação (22):

$$CO2_BAE\ (t) = CO2_A_CF\ (t) - CO2_A_CA\ (t) \quad (22)$$

Onde,

- $CO2_{_sAE}$ (t) = balanço anual de emissões de CO_2, expresso em (t CO_2);
- $CO_{2_A_cF}$ = emissões anuais de CO_2 no cenário futuro, expresso em (t);
- $CO_{2_A_cA}$ = emissões anuais de CO_2 no cenário atual, expresso em (t).

A obtenção de um resultado negativo no balanço evidencia a mitigação de emissões de CO2, possibilitando inferir-se pela viabilidade ambiental do projeto e a determinação do potencial de mitigação de CO_2 no cenário futuro proposto.

Do ponto de vista da Economia Circular - EC, assim como proposto na metodologia para a análise de viabilidade ambiental na obtenção de RCEs, o "Ponto de Equilíbrio de emissões de CO_2" em relação à distância de transporte ocorre quando as emissões geradas em t de CO_2 / t de CPS transportada se iguala às mitigações de emissões de CO_2 / t de clínquer não produzido (por ter sido substituído por CPS). O ponto de equilíbrio na emissão de CO2 no transporte, ou seja, a "Distância de Equilíbrio de Emissões de CO_2 no Transporte" ($DE_{_co2_r}$) foi calculada utilizando-se a Equação (13) já apresentada anteriormente.

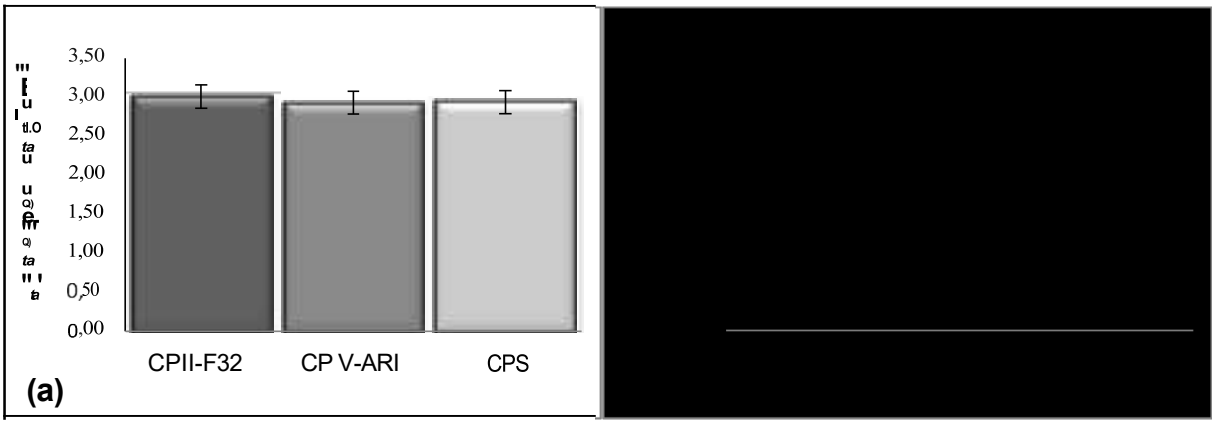
As metodologias adotadas para a presente pesquisa e que foram acima descritas possibilitaram a obtenção, a discussão dos resultados e as análises das viabilidades técnicas e ambientais do uso da CPS, na perspectiva de uma "Economia Circular - EC", as quais são apresentadas de maneira detalhada no Capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia do programa experimental descrita no capítulo 3. Os resultados são analisados e discutidos em função da literatura consultada e dos parâmetros pré-determinados nas normas de referência.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA CPS

Os resultados obtidos para as massas específicas dos Cimentos Portland CP Ii - F32, CP V - ARI e para a CPS estão apresentados na Figura 3 (a) e (b).



(a) Valor absoluto g/cm^3; (b) Percentual em relação ao cimento CP Ii - F32

Figura 3 - Massa específica dos cimentos Portland e da CPS

Observa-se que o valor obtido para a massa específica da CPS (2,94 g/cm^3) se assemelha aos resultados das massas específicas do CP Ii - F32 (3,01 g/cm^3) e do CP V - ARI (2,93 g/cm^3). Na Tabela 5 foram apresentados valores obtidos em diversos estudos para a massa específica das cinzas de casca de arroz, variando entre 1,76 g/cm^3 (POUEY, 2006) e 2,29 g/cm^3 (CORDEIRO, 2006). Estudos sobre a massa específica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram apresentados na Tabela 9, com resultados apresentando uma variação entre 0,56 g/cm^3 (POGGIALI, 201O) e 3,78 g/cm^3 (ANDRADE NETO *et ai.,* 2021). Ao estudar as cinzas de folha de bananeira, Kanning (201O) obteve massa específica variando entre 2,38 g/cm^3 e

2,53 g/cm^3, em diferentes tempos de moagem. Estudando as cinzas de eucalipto, Vaske (2012) obteve resultado de 2,47 g/cm^3 e Resende (2013) 2,38 g/cm^3. Comparando a massa específica da CPS com as demais encontradas na literatura, observa-se que a CPS apresenta um valor relativamente maior às demais, com exceção às obtidas por Andrade Neto *et ai.* (2021), para as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. A determinação de massas específicas das cinzas provenientes das diferentes biomassas encontradas na literatura, se deram, após diferentes processos de preparo que incluíram em alguns casos, nova submissão à calcinação e moagem. Assim, os resultados obtidos para a massa específica de cada material analisado podem ter sofrido influência desse preparo. Mesmo assim, os resultados obtidos para a CPS demonstram correlação com os resultados de outras cinzas pozolânicas encontradas na literatura, indicando que sua massa específica apresenta-se adequada para ser utilizada como material pozolânicos. Os resultados obtidos para a massa específica da CPS e do cimento Portland CP Ii - F32 e CP V - ARI foram utilizados na determinação da dosagem (traço) das argamassas para os ensaios de avaliação de atividade pozolânica e de viabilidade técnica de substituição parcial do cimento Portland. Os valores semelhantes entre a massa específica da CPS e do CP V - ARI tornam possível inclusive, o cálculo da dosagem na substituição parcial do cimento Portland por CPS tanto em massa como em volume.

Os índices de finura ou superfícies específicas obtidos pelo método de permeabilidade ao ar ou método de Blaine (ABNT - NBR 16372, 2015), são apresentados na Figura 4.

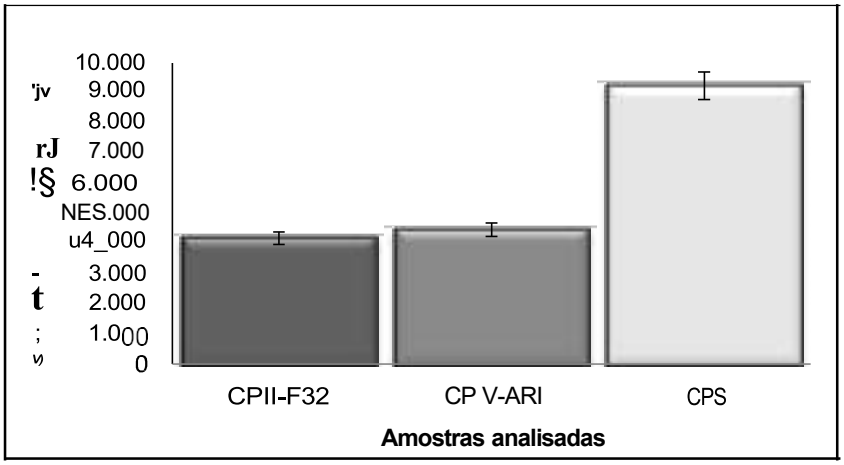


Figura 4 - Superfície específica (Blaine) dos cimentos Portland e da CPS

A amostra de CPS apresentou finura (Blaine) de 9.240 cm^2/g. Esse valor é 221,05% e 207,22% maior respectivamente em relação às amostras de cimentos Portland analisadas (CP Ii - F 32 4,180 cm^2/g; CP 5 - ARI 4,459 cm^2/g). No ensaio realizado no laboratório da Escola Politécnica da Universidade Positivo, foram obtidos resultados de Blaine para a CPS com valores superiores (11.719 cm^2/g). Na bibliografia consultada, foram encontrados resultados para as cinzas de casca de arroz, conforme descritos na Tabela 5, com valores variando entre 3.947 cm^2/g (TASHIMA *et ai.,* 2012) e 46.310 cm^2/g (POUEY, 2006). Para as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar os resultados apresentados na Tabela 9 apresentaram variação entre 2.600 cm^2/g (ZAREEI *et ai.,* 2018) e 11.120 cm^2/g (POGGIALI, 201O). As cinzas obtidas a partir de folhas de bananeira apresentaram valores variando de 8.350 cm^2/g a 15.400 cm^2/g, em função dos diferentes tempos de moagem (KANNING, 201O). A sílica ativa apresenta valores variando entre 13.000 cm^2/g e 25.000 cm^2/g, já a cinza volante variação entre 3.000 cm^2/g e 4.000 cm^2/g (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Observa-se assim, que a CPS apresenta superfície específica elevada, semelhante às obtidas para outras pozolanas oriundas da queima de biomassa. Para as adições minerais o ideal é que se obtenha uma elevada superfície específica, como é o caso das obtidas para a sílica (10.840 cm^2/g) (KANNING, 2013). Quanto maior a finura (Blaine) do material, maior tende ser sua reatividade, em consequência do maior número de pontos de nucleação da reação com os compostos do cimento Portland, principalmente o (Ca(OH)2), tendo relação direta com os índices de atividade pozolânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, materiais com elevado grau de finura, mesmo com estruturas cristalinas, tendem a apresentar melhores sistemas de empacotamento em matrizes cimentícias, por seu efeito de preenchimento ou *fíller,* conferindo-lhes características superiores de resistência e de menor permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os resultados obtidos para o índice de finura das amostras de cimento CP Ii - F32, CP V - ARI e CPS por meio de peneirador aerodinâmico ABNT - NBR 12826 (2014), são apresentados na Tabela 15.

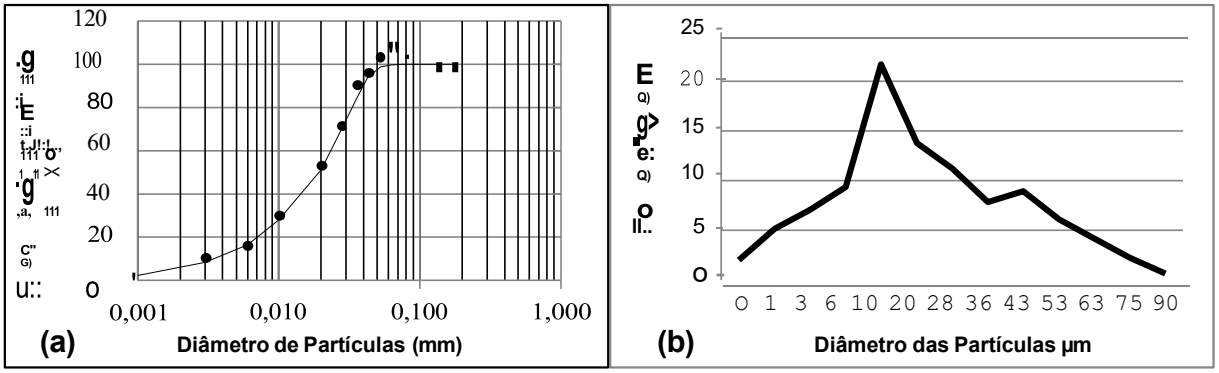
Tabela 15 - Índice de finura dos cimentos Portland e da Cinza de *Pinus spp.*

Material	**Índice de Finura** (%)	**Comparação CPS x cimentos Portland** * (%)
Cimento Portland CP Ii - F32	8,2	68,29
Cimento Portland CP V -ARI	7,9	70,89
CPS - Cinza de *Pinus spp.*	5,6	

*Percentual do volume de CPS retidas em comparação aos volumes de cimentos Portland retidos.

A realização deste ensaio foi necessário para possibilitar a avaliação do atendimento ao parâmetro máximo de 20,0% de resíduos retidos na peneira com malha de abertura 45 µm (nº 325), um dos critérios para a classificação de materiais como pozolânicos, conforme descrito na norma ABNT - NBR 12653 (2014/2015). Ao analisar os dados apresentados, verificam-se percentuais de material retido, inferiores ao requisito máximo de 20,0% definido pela norma para materiais pozolânicos. A amostra de CPS apresentou volumes inferiores de materiais retidos, em relação aos dos cimentos Portland (68,29% e 70,89%). Na bibliografia consultada, os valores obtidos para as cinzas de casca de arroz variaram de 0,97% Gava (1999) a 41,13% Silveira (1996), conforme dados apresentados na Tabela 5. Já para as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, os resultados obtidos demonstram uma variação entre 1,00% Ganesan *et ai.* (2007) e 22,00% Cordeiro (2006), conforme apresentado na Tabela 9. As cinzas de folha de bananeira obtiveram resultados variando entre 10,87 % e 24,07%, em função da variação no tempo de moagem no preparo das cinzas (KANNING, 2010). Nos trabalhos consultados observou-se que os materiais que apresentaram porcentagens menores de materiais retidos, portanto maiores finuras, também obtiveram melhores resultados de resistência mecânica quando utilizados como adição mineral ou como substituto parcial do cimento Portland. Para Mehta; Monteiro (2014), a finura observada, além de favorecer a reatividade do material, pode contribuir no processo de hidratação do cimento Portland e melhorar o preenchimento de micro espaços, diminuindo a porosidade, elevando a resistência e durabilidade de matrizes cimentícias.

O ensaio para a determinação da distribuição granulométrica realizado utilizando-se o método de difração a laser e os resultados são apresentados na Figura 5 (a) e (b).



(a) Frequência acumulada das partículas em função de seu diâmetro (mm)
(b) Distribuição percentual das partículas em função de seu diâmetro (µm)

Figura 5 - Distribuição granulométrica da GPS.

A distribuição granulométrica da amostra de CPS analisada apresentou um diâmetro médio de 27,30 µm, variando entre O,1 e 90 µm. Aproximadamente 50 % das partículas apresentaram diâmetro menor que 22,6 µm. A realização deste ensaio visou determinar a distribuição granulométrica e os diâmetros médios das partículas da CPS e possibilitar a comparação com o diâmetro médio de partículas de outras adições minerais pozolânicas descritas na literatura. Ensaios realizados para cinzas de casca de arroz obtiveram resultados variando entre 0,68 µm Della *et ai.* (2005) e 73,28 µm Pouey (2006), conforme apresentado na Tabela 5. Para as cinzas de cana-de-açúcar, foram obtidos resultados variando entre 5,40 µm Ganesan *et ai.* (2007) e 36,68 µm Andrade Neto *et ai.* (2021), conforme apresentado na Tabela 9. Vaske (2012) obteve um valor médio de 32,59 µm para as cinzas de eucalipto. Mehta; Monteiro (2014) obtiveram valores variando entre 1,0 µma 150,0 µm para a cinza volante e 10,0 µm a 45,0 µm para a escória de alto forno. Quanto menor o diâmetro médio das partículas de um material, mais adequado seu uso como adição mineral ao cimento Portland, seja como pela sua reatividade como pozolana, ou por sua capacidade de preenchimento de espaços de maneira inerte como *fíller* (DAL MOLIN, 2011). Sendo uma das principais características físicas benéficas às pozolanas, a CPS ao apresentar uma distribuição granulométrica compatível com outros materiais já caracterizados como pozolanas, demonstra do ponto de vista físico, seu potencial para o preenchimento de vazios contribuindo para a obtenção de sistemas de empacotamento de partículas com menor porosidade, ampliando os pontos de nucleação com favorecimento do processo de hidratação do cimento Portland, de acordo com o preconizado por (DAL MOLIN, 2011) e (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

O Quadro 3 apresenta o resumo dos resultados para os ensaios de caracterização física da CPS, suas respectivas comparações e avaliações.

Ensaio	Resultados	Comparações	Avaliações
Massa específica	CPS = (2,94 g/cm3); CP **Ii** - F32 (3,01 g/cm^3) CP V - ARI (2,93 g/cm^3)	Cinza casca de arroz: 1,76 g/cm^3 (POUEY, 2006) 2,29 g/cm^3 (CORDEIRO, 2006) Cinza ba aço cana-de-açúcar: 0,56 g/cm (POGGIALI, 2010) 3,78 g/cm^3 (ANDRADE NETO *et ai.,* 2021) Cinza folha de bananeira: ẋ= 2,45g/cm^{31}KANNING, 2010)	A Massa específica da CPS é relativamente superior às obtidas pela maioria das outras cinzas de biomassa.
Superfície específica: (Método de Blaine)	CPS (9.240 cm^2/) CPS (11.719 cm /g) CP **11** - F32 (4.180 cm^2/g) CP V - ARI (4459 cm /g)	Cinza casca de arroz: 3.947 cm^2/ (TASHIMA *et* ai., 2012); 6.31O cm /g (POUEY, 2006) Cinza bagaço cana-de-açúcar: 2.600 cm^2/ (ZAREEI *et ai.,* 2018); 11.120 cm /g (POGGIALI, 2010) Cinza folha de bananeira: 8.350 cm^2/g a 15.400 cm^2/g (KANNING, 2010); Sílica ativa: 13.000 cm^2/g a 25.000 cm^2/g (MEHTA & MONTEIRO, 2014) Cinza volante: 3.000 cm^2/g a 4.000 cm^2/g (MEHTA & MONTEIRO, 2014)	CPS apresenta superfície específica similar à sílica e a outras cinzas de biomassa classificadas como pozolanas e maior que a cinza volante. Quanto maior a superfície específica, maior tende a ser sua reatividade.
Índice de finura: (Resíduo retido na peneira 45 µm)	CPS (5,6%) CP **Ii** - F32 (8,2%) CP V-ARI (7,9%)	ABNT - NBR 12653 (2014/15). Parâmetro s; 20 %; Cinza casca de arroz: 0,97% (GAVA, 1999) 1,13% (SILVEIRA, 1996) Cinza bagaço cana-de-açúcar: 1,0% (GANESAN *et ai.,* 2007) 22,0% (CORDEIRO, 2006) Cinzas folhas de bananeira: 10,87% a 24,07% (KANNING, 2010)	A tende ao parâmetro limite da norma ABNT para pozolanas; Quanto menor o percentual retido, maior a finura. A CPS apresenta finura maior em relação aos Cimentos Portland e a obtida por outras cinzas de biomassa classificadas como pozolanas.
Distribuição Granulométrica	Diâmetro médio da CPS ± 27,30 µm Variação = O,1 a 90 µm 50,0% < 22,6 µm	Cinza casca de arroz: 0,68 µm (DELLA *et ai.,* 2005) 73,28 µm (POUEY, 2006) Cinza bagaço cana-de-açúcar: 5,40 µm (GANESAN *et ai.,* 2007) 36,68 µm (ANDRADE NETO *et ai.,* 2021). Cinza volante: 1,0 µm a 150,0 µm (MEHTA & MONTEIRO, 2014) Escória de alto forno: 10,0 µm a 45,0 µm (MEHTA & MONTEIRO, 2014)	Diâmetro médio similar ao obtido por outras cinzas de biomassa caracterizadas como pozolanas, com a cinza volante e com escória de alto forno.

Quadro 3 - Caracterização física da CPS: resultados, comparações e avaliações

Observou-se na bibliografia uma grande variação nas características físicas das cinzas de biomassa estudadas pelos diferentes autores, principalmente em

função das metodologias utilizadas para a obtenção e preparo das cinzas. Do ponto de vista das características físicas da CPS, analisando os resultados obtidos, comparando com os parâmetros da normatização vigente e com as características de outras cinzas já classificadas como pozolanas, observa-se viabilidade na sua utilização como adição mineral pozolânica ou em substituição parcial ao cimento Portland, em função do sua elevada superfície específica e finura.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CPS

A análise química da amostra de CPS realizada por Fluorescência de Raios X (FRX) determinou os teores de óxidos Si02+ Al203+ Fe203; Na20eq; S03 e perda ao fogo da CPS. Seus resultados apresentam-se listados na Tabela 16.

Tabela 16 - Composição química da CPS

Teor de óxidos	%
SiOi*	**35,4**
CaO	14,9
MgO	8,4
Al20l	**15,4**
K2O ***	5,4
P2O5	1,4
SO_3**	0,3
Fe20l	**12,0**
MnO	0,9
Cl	< O,l
Na2O***	1,6
TiO_2	**2,2**
SrO	< O,l
Rb2O	< O,l
ZnO	< O,l
ZrO_2	< O,**1**
Perda ao Fogo****	1,9

* óxidos de interesse para as reações pozolânicas;

** óxido com característica de retardar o tempo de pega e causar expansão das massas de cimento Portland;

*** Álcalis responsáveis pelas reações álcali-agregados.

**** Material não calcinado no processo de combustão.

A análise semiquantitativa possui certo caráter subjetivo e interpretativo. São aceitáveis variações significativas nas concentrações indicadas, assim como falsas indicações positivas e/ou negativas de elementos em baixas concentrações.

Tais informações foram utilizadas para comparar os resultados da composição química da CPS com os requisitos normativos da ABNT - NBR 12653 (2014/2015) e determinar seu enquadramento como uma pozolana de acordo com os critérios de composição química estabelecidos na norma. Na Tabela 17, apresenta-se uma comparação das propriedades químicas da CPS com os padrões de referência para materiais pozolânicos da "classe E" descritos na norma ABNT - NBR 12653 (2014/15).

Tabela 17 - Propriedades químicas da CPS e os parâmetros da ABNT - NBR 12653 (2014/15)

Composto	**ABNT NBR 12653:2014/15** (%)	**Composição da CPS** (%)
$Si0_2 + Al_20_3 + Fe_20_3$	50,00	62,80
$S0_3$	5,00	0,30
Álcalis disponíveis em Na_20	1,50	5,15
Perda ao fogo	10,00	1,90

Os valores encontrados na bibliografia em trabalhos realizados por diferentes autores utilizando as cinzas de casca-de-arroz foram listados na Tabela 6 e apresentaram uma variação entre 62,73% Pouey (2006) e 98,40% Santos (1997) para o somatório de ($SiO2 + AbO_3 + Fe2O_{3)}$. Resultados para as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram apresentados na Tabela 1O com valores entre 41,75% (REZENDE, 2016) e 98,1% (LIMA *et ai.,* 2010). A CPS mesmo apresentando porcentagem menor (62,80%) se comparado a valores encontrados para outras cinzas, principalmente de casca de arroz, apresenta-se superior ao parâmetro mínimo (50,0%) definido na norma ABNT - NBR 12653 (2014/15) para materiais pozolânicos. Obviamente que quanto maior o percentual, maior tende a ser a reatividade do material. Em relação ao SO_3, observou-se a presença de um pequeno percentual (0,30%) na CPS, bem abaixo do limite máximo estabelecido pela norma (5,0%). Vaske (2012), verificou-se em média 1,67% de SO_3 nas cinzas de eucalipto, Resende (2013) relatou também valores entre 1,85% e 10,50% para as cinzas de eucalipto. Kanning (201O) obteve 1,59% de SO_3 para as cinzas de folhas de bananeira. As cinzas de casca de arroz normalmente não apresentam SO_3 em sua composição, ou apresentam percentuais mínimos como o descrito por Zerbino *et ai.* (2011) que encontrou 0,01%. Nas cinzas de bagaço de cana-de-açúcar normalmente observa-se a presença de SO_3, como relatado por Andrade Neto *et ai.* (2021) que encontrou 3,40%. A presença de SO_3 nos materiais cimentícios tende a retardar o tempo de pega e causar a expansão das argamassas, sendo importante

que esse óxido não ultrapasse o limite de 5,0% definido pela norma para seus efeitos não serem observados. A Perda ao Fogo indica a presença de materiais não totalmente calcinados e o valor obtido pela CPS de 1,90% indica uma pequena quantidade desses materiais. Resultados obtidos em análises de cinzas de casca de arroz apresentados na Tabela 6 apresentam uma variação para a perda ao fogo entre 0,25% (ZERBINO *et ai.,* 2011) e 22,97% (GAVA, 1999). Análises de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar apresentados na Tabela 1O também demonstraram grande variação na perda ao fogo entre 0,34% (LIMA *et ai.,* 201O) e 49,16% (Rezende, 2016). Se por um lado a presença de carbono não calcinado tende a elevar a demanda de água para a hidratação do cimento, por outro lado, esses materiais tendem a ter uma granulometria extremamente fina, o que favorece o preenchimento de espaços vazios proporcionando resistência às matrizes cimentícias no estado endurecido. A quantidade de equivalente alcalino em Na_2O (0,658 x K_2O% + Na_2O%), óxido relacionado à ocorrência da reação álcali agregado apresenta-se superior ao parâmetro máximo definido pela norma. Nos estudos sobre cinzas de casca de arroz apresentados na Tabela 6 pode se observar variações entre 0,42% (GAVA, 1999) e 3,21% (ZUNINO & LOPEZ, 2016). Para cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, observaram-se valores entre 0,50% Cordeiro (2006) e 7,40% Lima *et ai.* (201O) conforme descrito na Tabela 1O. Observa-se assim que a CPS apresentou valor superior também a algumas cinzas analisadas. Porém, como se está avaliando a utilização da CPS como adição mineral a ser feita no processo de produção das indústrias cimenteiras ou sua utilização em substituição parcial do cimento Portland por CPS na proporção de no máximo 20,0%, para ambos os casos poderão ser calculadas dosagens máximas de CPS que proporcionem o atendimento do limite máximo de 1,5% definido pela norma.

Com o objetivo de analisar o comportamento da calcinação da polpa de *Pinus spp.,* bem como avaliar o nível de calcinação da "CPS *in natura"* e da "CPS calcinada em mufla", foram realizadas análises térmicas das três amostras, sendo:

- Amostra A - Polpa de *Pinus spp.* triturada e peneirada;
- Amostra B - "CPS *in natura"* peneirada;
- Amostra C - "CPS calcinada em forno mufla".

A Figura 6 representa a curva termogravimétrica obtida pela submissão da "Amostra A" - polpa de *Pinus spp.* ao ensaio de termogravimetria.

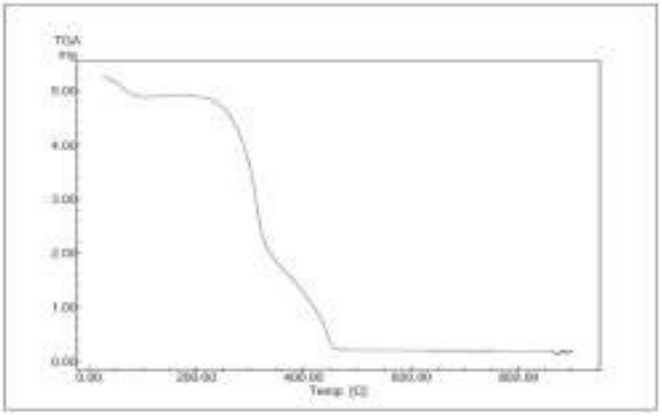


Figura 6 - Curva termogravimétrica da Polpa de *Pinus spp.*

Observa-se que até aproximadamente 100 ºC há uma perda de massa relativa à umidade presente na amostra, a partir de aproximadamente 250 ºC, inicia-se o processo de calcinação que perdura até aproximadamente 450 ºC, a partir de então, mesmo com a elevação da temperatura, observa-se a manutenção da massa, indicando uma calcinação total da amostra de polpa de *Pinus spp.* A Figura 7 representa a curva termogravimétrica obtida pela submissão da "Amostra B - "CPS *in natura"* ao ensaio de termogravimetria.

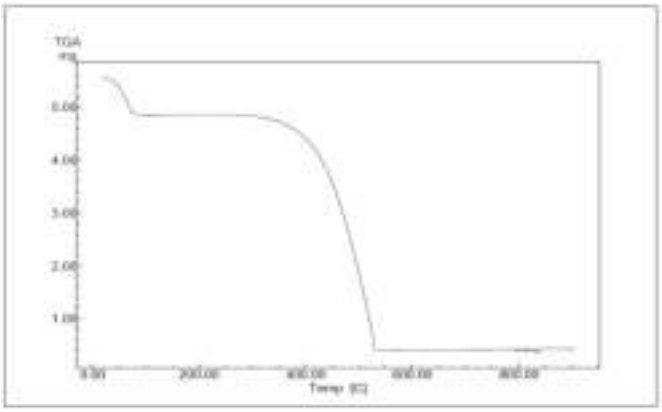


Figura 7 - Curva termogravimétrica da "CPS *in natura"*

Observa-se que até 100 ºC há uma perda de massa relativa à umidade presente na amostra, a partir de 350 ºC, inicia-se o processo de calcinação que perdura até aproximadamente 520 ºC. A partir de então, mesmo com a elevação da temperatura, observa-se a manutenção da massa, indicando o final da calcinação total da amostra. Comparando-se a curva termogravimétrica da polpa de *Pinus spp.* com a curva termogravimétrica da "CPS in natura", observam-se semelhanças entre

elas, o que sugere baixa eficiência da caldeira utilizada pela madeireira, em função da presença importante de material incombusto. Um melhor controle no processo de combustão nas caldeiras, além de maior eficiência energética no uso da biomassa proporciona também cinzas residuais com graus de calcinação mais elevados, elevando também seu potencial de uso. A análise do comportamento das curvas termogravimétricas obtidas pelas amostras de polpa de *Pinus spp.* e da "CPS *in natura",* em conjunto com as conclusões obtidas por Santos (1997), Weber (2001), Cordeiro (2006), Paula (2006), Zain *et ai.* (2011), Tashima *et ai.* (2012), Antiohos *et ai.* (2013), que defendem que temperaturas de calcinação entre 400 e 600 ºC favorecem a obtenção de cinzas com morfologia predominantemente amorfas, foram utilizadas para a definição da temperatura mais adequada para a calcinação da "CPS *in natura".* A Figura 8 representa a curva termogravimétrica obtida pela submissão da "Amostra C" - "CPS calcinada em mufla" ao ensaio de termogravimetria.

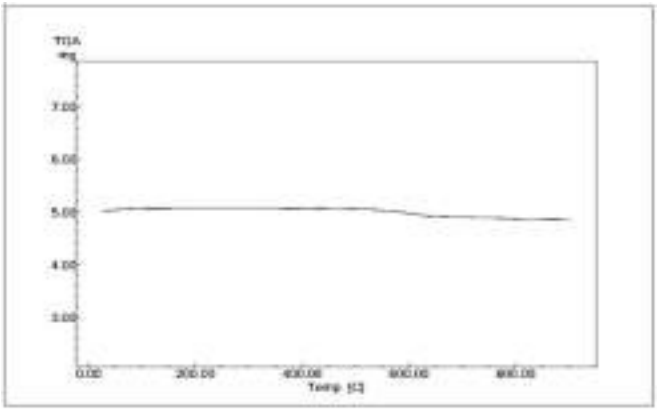


Figura 8 - Curva termogravimétrica da "CPS calcinada em mufla"

Observa-se pouca variação de massa com a elevação de temperatura, indicando que a amostra submetida ao ensaio apresentava-se com elevado grau de calcinação. Esse resultado indica a eficiência obtida na calcinação da "CPS *in natura",* com a submissão a calcinação em forno mufla a uma temperatura média de 550 ºC por um período de 2,0 h. A inexistência ou a baixa existência de carbono na CPS obtida pela calcinação em mufla é um indicativo importante para um material a ser utilizado como pozolana. Com a realização destes ensaios foi possível determinar as características do processo de calcinação da polpa de *Pinus spp.* em termos de temperatura, o grau de calcinação da CPS *in natura* e a eficiência da

calcinação da GPS submetidas ao forno mufla. A eficiência do processo de calcinação pode ser determinada pela magnitude da presença de carbono incombusto nas amostras. A eficiência no processo de calcinação tem uma relação direta com a qualidade de materiais pozolânicos, uma vez que segundo Cordeiro (2006) a presença do carbono pode exigir uma maior quantidade de água no processo de hidratação do cimento Portland, diminuindo a qualidade de suas propriedades. Por outro lado, como a granulometria dos materiais com alguma presença de carbono tende a apresentar diâmetros muito pequenos, pode também proporcionar melhoria no sistema de empacotamento pela ocupação de espaços vazios, aumentando a resistência de matrizes cimentícias pelo seu efeito *"fílller'* (CORDEIRO, 2006).

O Quadro 4 apresenta um resumo do conjunto de ensaios para a caracterização química da GPS, os resultados obtidos, as comparações e as avaliações realizadas.

Ensaio	Resultado	Comparações	Avaliações
Composição química	Teor de **(SiO_2+** Al203+ Fe203) 62,80%	ABNT - NBR 12653 (2014): Parâmetro 5 0,0% Cinza casca de arroz: 62, 73% (POUEY, 2006) 98 ' 40% (SANTOS, 1997) Cinza bagaço cana-de-açúcar: 41,75% (REZENDE, 2016) 98, 1 % (LIMA *et ai.,* 2010)	Teor de óxidos reativos acima do parâmetro mínimo norma1vo. por esse cn_ena a CPS pode ser classificada como pozolana da classe E;
	Teor de S03 0,3%	ABNT - NBR 12653 (2014/15): Parâmetro :5 5,% Cinza de casca de arroz: 0,01%(ZERBIN0etal.,2011) Cinza bagaço cana-de-açúcar: 3,4% (ANDRADE NETO *etal.,* 2021 Cinza de folha de bananeira: 1,58% KANNING (2010)	Teor de SO_3 abaixo do parâmetro máximo, conforme IVO.
	Álcalis disponíveis $Na_2$0eq(5, 15%)	ABNT- NBR 12653 (2014): Parâmetro :5 1,5% Cinza de casca dearroz: 4,2% (GAVA 1999) 3°21% (ZUNI O& LOPEZ, 2016) Cinza bagaço cana-de-açucar: O.5 0 10 (CORDEIRO, 2006) 7,40% (LIMA *etai.,* 2010)	Teor de álcalis disponíveis acima do parâmetro máximo. Para a utilização da CPS sua fração no produto final deve ser dosada para atender parâmetroe evitar as reações álcali-agregados.

Quadro 4 - Caracterização química da CPS: resultados, comparações e avaliações

(Continua)

Ensaio	Resultado	Comparações	Avaliações
	Perda ao fogo 1,9%	ABNT - NBR 12653 (2014/15): Parâmetro s; 10,0% Cinza de casca de arroz: 0,25% (ZERBINO *et ai.*, 2011) 22,97% (GAVA, 1999) Cinza bagaço cana-de-açúcar: 0,34% (LIMA *et* ai., 2010) 49,16% (REZENDE, 2016)	Pequena presença de materiais não totalmente calcinados, abaixo do parâmetro máximo normativo.
Termogravi-metria	Pequena variação	Termogravimetria da "CPS *in natura"* Cinza de casca de arroz: 0, 14% (DELLAeta/. , 2005) Cinza bagaço cana-de-açucar: 5,0% a 14,0% (CORDEIRO, 2006)	Apresentou pequena variação demonstran o um elevado grau de calc1nação.

Quadro 4 - Caracterização química da CPS: resultados, comparações e avaliações
(Conclusão)

O conjunto de características químicas da CPS, obtido pela realização dos ensaios previstos no programa experimental, demonstra que a CPS pode ser classificada como uma pozolana por se enquadrar nos parâmetros definidos pelas normas para essa classificação, além de apresentar características semelhantes a outras cinzas de biomassa classificadas como pozolanas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA CPS

A caracterização das fases químicas presentes na amostra de CPS, obtida por difratometria de raios X (DRX), pode ser observada na Figura 9.

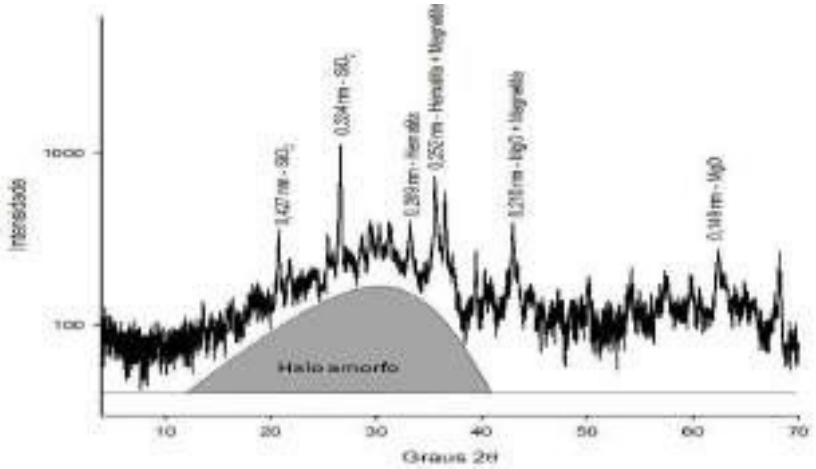


Figura 9 - Difratograma da amostra de CPS

A caracterização morfológica teve como objetivo avaliar de forma qualitativa a presença de óxidos na fase amorfa. A verificação da ocorrência de um halo amorfo na linha de base do difratograma indica a tendência de que a amostra apresente capacidade reativa, uma característica presente em cinzas de biomassa classificadas na literatura como pozolanas. No difratograma observa-se a presença do halo amorfo característico de estruturas amorfas (reativas). Observam-se também picos de quartzo, hematita e hematita + magnetita característicos da fase cristalina e comumente presente nas adições minerais. Baseando-se na visão de Walker & Pavía (2011), que entendem que quanto maior a presença da fase amorfa, mais reativa é uma pozolana, sendo essa uma das principais propriedades de uma pozolana, pode se afirmar que a amostra de CPS tende a apresentar reatividade. As formas cristalinas por apresentarem-se em sua forma fundamental em estado de menor energia, apresentam pouca ou nenhuma reatividade. Gava (1999) e Cordeiro (2006) observaram em cinzas de casca de arroz a presença das fases amorfa e cristalina. Santos (1997), Weber (2001), Zain *et ai.* (2011), Tashima *et ai.* (2012), Antiohos *et ai.* (2013) observaram a predominância das cinzas de casca de arroz na fase amorfa. As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar analisadas por Poggiali (2010) e Rezende (2016) observaram a presença de cinzas na fase amorfa e picos cristalinos, já Ganesan *et ai.* (2007) e Andrade Neto *et ai.* (2021) observaram a predominância de cinzas na fase amorfa, assim como Cordeiro (2006) que concluiu que cinzas obtidas pela calcinação do bagaço de cana-de-açúcar em temperaturas de até 600 ºC, apresentaram-se de forma predominantemente amorfa. Mesmo a parcela das cinzas que se apresentam em estado cristalino, portanto pouco reativas, por seu diâmetro reduzido tendem a contribuir na melhoria das características de matrizes cimentícias em função do "efeito *fíller"* e na melhoria do processo de hidratação do cimento Portland.

4.4 POTENCIAL POZOLÂNICO DA CPS

O ensaio para a determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado, realizado pelo método de *Chapei/e Modificado,* tem o resultado apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Índice de atividade pozolânica da CPS - método de *Chapei/e modificado*

ABNT NBR 15895:201O	Raverdy *et* a/(1980)	CPS
436 mg/g	330mg/g	528 mg/g

Realizou-se o ensaio com o objetivo de verificar o atendimento do requisito mínimo definido pela norma ABNT - NBR 15895 (201O), para materiais pozolânicos, que é de 436 mg de Ca(OH)2 /g de pozolana. O resultado obtido possibilita também a comparação com o desempenho de outras cinzas de biomassa descritas na literatura e com o limite mínimo definido por *Raverdy et ai.* (1980), como critério de determinação de pozolanicidade. Resultados foram obtidos para os ensaios com cinzas de cascas de arroz feitos por Gava (1999) 717 mg/g, Cordeiro (2006) 543 mg/g a 736 mg/g, Antiohos *et ai.* (2013) 480 mg/g a 51O mg/g, Rêgo *et ai.* (2015) 450 mg/g a 657 mg/g. Da mesma forma as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram estudadas obtendo-se resultados como de Cordeiro (2006) 173 mg/g; Andrade Neto *et ai.* (2021) 1.023,96 mg/g. Resende (2013) estudando cinzas requeimadas de eucalipto obteve resultado de 116 mg/g A amostra de GPS ensaiada pelo método de *Chapei/e Modificado,* apresentou valores do consumo de Ca(OH)2 inferiores aos obtidos por algumas cinzas de biomassa, porém superiores ao parâmetro mínimo definido pela norma ABNT - NBR 15895 (201O) e o defendido por Raverdy *et ai.* (1980). O resultado obtido indica a sua capacidade reativa com o hidróxido de cálcio e, portanto, seu potencial de atuação como um material pozolânico.

Foi realizado o ensaio para a determinação do índice e atividade pozolânica da GPS com a cal (IAP - cal) (ABNT NBR 5751, 2015). Na Figura 1O apresenta-se o resultado obtido para os corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência mecânica à compressão aos 7 dias de cura.

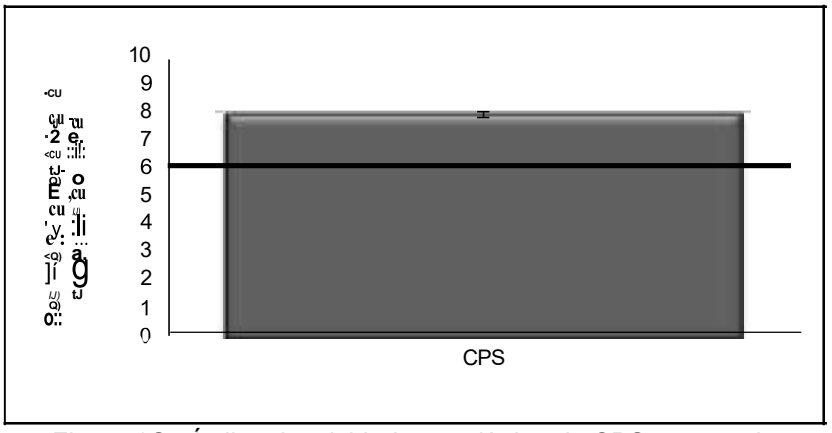


Figura 1O - Índice de atividade pozolânica da CPS com a cal

O resultado obtido evidencia um índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias de cura, 33,33% acima do requisito mínimo definido pela norma, conforme disposto na Tabela 19.

Tabela 19 - Índice de atividade pozolânica da CPS com a cal -ABNT NBR 5751 (2015)

ABNT - NBR 12653 (2014/15)	CPS	
	Resistência Média	Desvio relativo máximo
;::: 6,0 MPa	8,0 MPa	1,25%

Na literatura, observou-se que o IAP-cal foi determinado para outras cinzas de biomassa, como para cinzas de casca de arroz, 4,96 MPa a 8,66 MPa Guerdert (1989) e 13,11 MPa Gava (1999), cinzas de cana-de-açúcar 5,20 MPa Cordeiro (2006), cinzas de folha de bananeira 3,39 MPa a 8,61 MPa (KANNING, 2010). Observa-se que o resultado obtido pela CPS correlaciona-se aos obtidos por outras cinzas que foram classificadas como pozolanas, sendo possível por esse critério, classificar a CPS como uma pozolana.

Os resultados dos ensaios para determinação dos índices de atividade pozolânica da CPS com o cimento Portland (IAP- cimento) ABNT - NBR 5752 (2014), são apresentados na Tabela 20 e referem-se aos resultados obtidos da submissão de corpos de prova de referência (REF.) e corpos de prova com substituição parcial de 25% do cimento Portland por CPS à ensaios de resistência mecânica à compressão, aos 28 dias de cura úmida.

Tabela 20 - Índice de atividade pozolânica da GPS com o cimento Portland - ABNT NBR 5752 (2014)

Materiais	Resistência Média (MPa)	Desvio relativo máximo (%)	Índice de atividade (%)
Cimento Portland (100,0% - REF.)	32,7	1,25	100
GPS (25%)	26,8	5,47	82

Os corpos de prova com GPS apresentaram índice de atividade pozolânica de 82% em relação a REF. De acordo com a norma ABNT - NBR 16697 (2018) um material pozolânico para ser utilizado como adição mineral na produção de cimento Portland deve atingir no ensaio de IAP-cimento um valor igual ou superior a 75% da resistência obtida pela REF. Portanto, em relação a este parâmetro, a GPS apresentou índice de atividade pozolânica que a permite ser classificada como uma pozolana, podendo ser utilizada como adição mineral pozolânica na produção de cimento Portland. A Figura 11 apresenta a relação percentual entre as resistências à compressão obtidas pelos corpos de prova de referência (REF.) e os corpos de prova com 25,0% de substituição do cimento Portland por GPS aos 28 dias de cura.

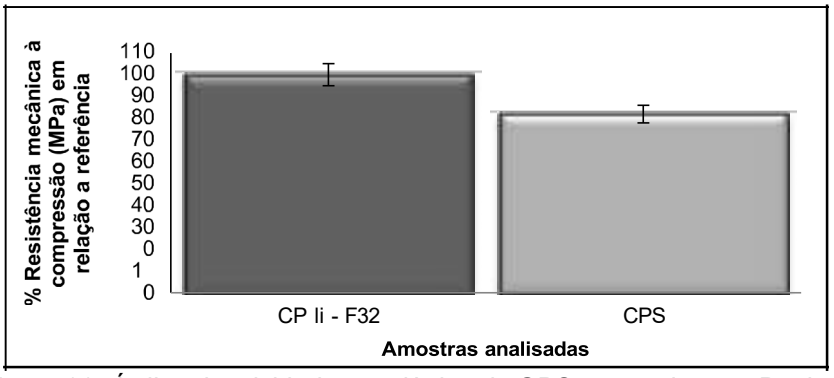


Figura 11 - Índice de atividade pozolânica da GPS com o cimento Portland

A ABNT - NBR 12653 (2014/15) estabelece os requisitos para a classificação de materiais pozolânicos a serem utilizados em substituição parcial ao cimento Portland em concretos, argamassas e pastas. Essa norma determina que corpos de prova contendo 25% de material pozolânico em substituição parcial ao cimento Portland, devem apresentar resistência à compressão igual ou superior a 90,0% da resistência obtida pelos corpos de prova de referência, com 0,0% de substituição (REF.), em ensaios realizados aos 28 dias de cura úmida. Não houve, nesse caso, o atendimento ao parâmetro mínimo definido pela norma para o uso de GPS. Mesmo assim, o resultado obtido não inviabiliza a utilização da GPS nesse percentual ou em percentuais menores de substituição, caso sejam obtidas

resistências à compressão compatíveis com as normatizadas para cada uso específico da matriz cimentícia. Do ponto de vista bibliográfico, resultados de IAP-Cimento foram obtidos para outras cinzas de biomassa, como casca de arroz 66,0% Silveira (1996), 104,0% e 111,0% Gava (1999), 79,75% a 101,50% Weber (2001), 80,0% a 110,0% Cordeiro (2006), 72,9% a 120,7% Pouey (2006), 71,5% a 85,6% (RÊGO *et ai.,* 2015). Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar obtiveram resultados como 81,0% Cordeiro (2006), 79,25% a 82,84% (POGGIALI, 201O). Cinzas da folha de bananeira 82,23% a 96,41% (KANNING, 201O). Cinzas de eucalipto 75,5% a 97,98% (RESENDE, 2013). Importante ressaltar que para os estudos realizados antes de 2014, quando ouve a alteração das normas ABNT - NBR 5752 (2014) e ABNT - NBR 12653 (2014/15), a fração de substituição do cimento por material pozolânico era de 35,0% e a resistência mínima a ser alcançada era de 75,0% da REF. A partir do ano de 2014, com a alteração das normas, a fração de substituição do cimento Portland por material pozolânico, passou a ser de 25,0% e a resistência mínima a ser alcançada para 90,0% da REF. Assim, faz se importante comparar os resultados obtidos pela CPS com estudos de IAP-Cimento realizados após a alteração das normas no ano de 2014. Na bibliografia foi encontrado o resultado obtido para as cinzas de bambu entre 75,93% e 93,51%, que variaram de acordo com a temperatura de queima (MENDONÇA, 2018). Do ponto de vista da resistência física à compressão, quanto maior a resistência obtida por um material, maior tende a ser a confiabilidade e segurança de seu uso, principalmente se se estiver relacionada a estruturas dimensionadas com o objetivo de suportar cargas, como o concreto estrutural. De acordo com González-Kunz *et ai.* (2017) o potencial pozolânico de um material, nem sempre está ligado ao melhoramento mecânico, podendo conferir outras características de interesse como a durabilidade em função da resistência ao cloreto e sulfatos. Outras matrizes cimentícias como argamassas e pastas, na grande maioria das vezes não são expostas à resistência à compressão, sendo essa uma característica secundária para esses compósitos.

O Quadro 5 apresenta um resumo dos ensaios realizados para a avaliação da atividade pozolânica da CPS, os resultados, comparações e avaliações.

Ensaio	Resultado	Comparações	Avaliações
Atividade pozolânica *(Chapei/e modificado)*	Consumo de Ca(OH)2 maior que 528 mg/g;	**ABNT NBR** 15895:201O: 2: 436 mg/g Raverdy *et a*/(1980): 2: 330mg/g Cinzas de casca de arroz: 450 a 657 (RÊGO *et ai.,* 2015) 543 a 736 (CORDEIRO, 2006) Cinzas bagaço cana-de-açúcar: 173,00 (CORDEIRO, 2006) 1.023,96 (ANDRADE NETO *et ai.,* 2021)	Atividade pozolânica acima do parâmetro mínimo definido pela norma e também acima do mínimo recomendado pela literatura. Intermediário entres os valore alcançados pelas cinzas de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar.
IAP-Cal	R . tA . esis_ encia a _ compressão = 8,O MPa	ABNT NBR 12653(2014/15): 2: 6,0 MPa Cinzas de casca de arroz: 4,96 - 8,66 MPa (GUERDERT, 1989) 13,11 MPa (GAVA, 1999) Cinzas bagaço cana-de-açucar: 5,20 (CORDEIRO, 2006)	Índice de atividade pozolânica 33,3% acima do parâmetro mínimo definido pela norma. Intermediário entre os valores alcançados pela cinza de casca de arroz, e maior que de bagaço de cana de açúcar.
IAP-Cimento	Resis_encia a c 7;o!s :o REF.	ABNT - NBR 16697 (2018): Resistência 2: 75,0% da REF. p/ uso na produção do cimento Portland ABNT - NBR 12653 (2014/15): Resistência 2: 90,0% da REF. p/ substituição parcial ao cimento Portland Cinzas de casca de arroz: 72,90 a 120,70 (POUEY, 2006) Cinzas bagaço cana-de-açúcar: 79,25 a 82,84 (POGGIALI, 2010)	Índice de atividade pozolânica supera o parâmetro mínimo de resistência definido pela norma, podendo ser utilizada na produção do cimento Portland. Em substituição parcial ao cimento Portland deverá ser dosada para atende à resistência à compressão definida em norma para cada matriz cimentícia. Intermediário entres os valores alcançados pelas cinzas de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar.

Quadro 5 - Índices de atividade pozolânica da CPS: resultados, comparações e avaliações

Todos os resultados obtidos nos diferentes ensaios de atividade pozolânica a que foram submetidas as amostras de GPS, demonstraram a ocorrência de atividade pozolânica superior aos parâmetros mínimos definidos em normas, podendo por esses critérios a GPS ser classificada como pozolana e utilizada na produção do cimento Portland em substituição parcial ao clínquer. Para o uso da GPS em substituição parcial ao cimento Portland na produção de concretos, argamassas e pastas, a proporção de substituição deverá ser dosada em função do atendimento dos parâmetros de resistência definidos em norma para cada tipo de material ou estrutura, em função de suas aplicações.

4.5 GPS EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND

Com o objetivo de avaliar a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland por CPS em matrizes cimentícias, foram realizados ensaios com argamassas através da confecção de corpos de prova com substituição parcial do cimento Portland por CPS nas proporções de 0,0% (REF.), 10,0%, 15,0% e 20,0% em massa. Os traços das argamassas foram calculados de acordo com os parâmetros da norma ABNT - NBR 7215 (2019) e estão representados na Tabela 21.

Tabela 21 - Traços das argamassas com a substituição parcial do cimento Portland por CPS

***Substituição** (%)*	**Cimento Portland CP V ARI (g)**	**CPS (g)**	**Areia IPT (g)**	**Agua (g)**
0,00	625,00	0,00	1.875,00	300,00
10,00	562,50	62,50	1.875,00	300,00
15,00	531,25	93,75	1.875,00	300,00
20,00	500,00	125,00	1.875,00	300,00

Os ensaios de resistência mecânica à tração na flexão foram realizados de acordo com a norma ABNT - NBR 13279 (2005) aos 7 e 28 dias de cura úmida e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resistência mecânica à tração na flexão de corpos de prova contendo CPS

Substituição (%)	7 dias de cura			28 dias de cura		
	Resistência (MPa)	Resistência (%)	Desvio relativo máximo	Resistência (MPa)	Resistência (%)	Desvio relativo máximo
0	5,57	100,00	2,03	7,35	100,00	1,90
10	6,12	109,81	4,9	7,50	102,04	0,67
15	6,35	113,88	5,3	6,69	90,98	3,94
20	5,64	101,20	4,96	5,70	77,60	2,05

Na bibliografia foram encontrados resultados obtidos para as cinzas de casca de arroz com substituições parciais variando em proporções de até 35,0% Zhang *et ai.* (2020), em ensaios realizados aos 28 dias de cura. Em todos os casos foram obtidas resistências à tração na flexão superiores à referência, contorne relatado na Tabela 8. Da mesma forma, cinzas de bagaço de cana-de-açúcar foram analisadas em proporções de até 20,0% Srinivasan & Santhiya (2010), obtendo-se resistências superiores à referência, conforme relatado na Tabela 12. A Figura 12 apresenta a comparação percentual da resistência à tração na flexão inicial (?dias) e final (28 dias) para as diferentes proporções de CPS.

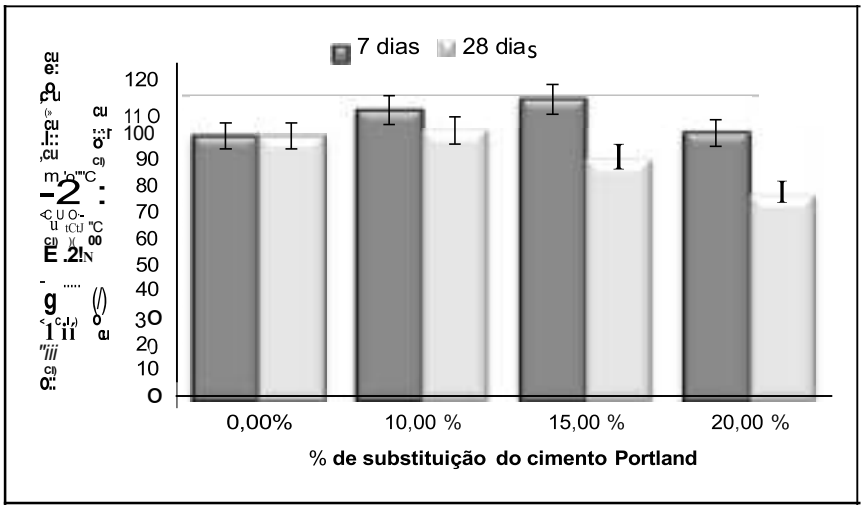


Figura 12 - Comparação da resistência mecânica à tração na flexão de corpos de prova contendo substituição parcial do cimento Portland por CPS

Os resultados obtidos para todas as proporções de GPS aos 7 dias de cura demonstram resistências à tração na flexão superiores à obtida pela referência. Conclui-se portanto que o uso da GPS na proporção de até 20,0% proporcionou a elevação da resistência inicial em relação à REF. Aos 28 dias de cura a proporção de 10,0% de GPS também demonstrou elvação da reistência final em comparação à REF. Assim como as cinzas de casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar, a GPS em dosagens de até 10,0% de substituição apresenta potencial para ser utilizada em estruturas de concreto que trabalhem sob o esforço de tração na flexão e demandem essa resistência. Apesar de os resultados obtidos mostrarem uma menor resistência nas dosagens de 15,0% e 20,0% de substituição, não existe comprometimento no uso dessas dosagens na produção de argamassa ou pasta, uma vez que estas não costumam trabalhar sobre o esforço de tração na flexão. Ressalta-se que para esse ensaio foi utilizado o cimento Portland CP V - ARI, que não apresenta pozolanas em sua constituição e se caracteriza por sua elevada resistência inicial.

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão (ABNT - NBR 13279, 2005) realizados aos 7 e 28 dias de cura úmida são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resistência mecânica à compressão de corpos de prova contendo GPS

Substituição (%)	7 dias de cura			28 dias de cura		
	Resistência (MPa)	Resistência (%)	Desvio relativo máximo	Resistência (MPa)	Resistência (%)	Desvio relativo máximo
0	23,56	100,00	2,21	34,84	100,00	5,40
10	26,86	114,01	5,04	39,54	113,49	2,60
15	24,17	102,59	5,41	32,58	93,52	4,58
20	23,73	100,72	1,57	29,59	84,95	4,58

A Figura 13 apresenta uma comparação percentual do desempenho da resistência inicial (7 dias) e final (28 dias) dos corpos de prova contendo frações de CPS em relação a resistência dos corpos de prova de referência (REF.)

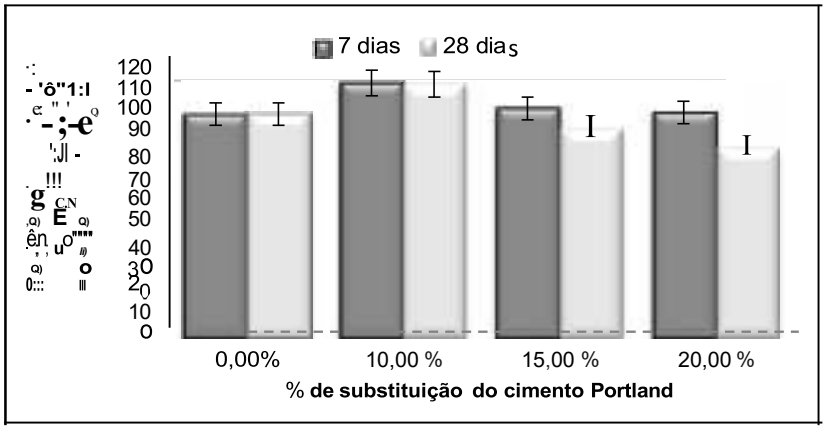


Figura 13 - Comparação da resistência mecânica à compressão de corpos de prova contendo substituição parcial do cimento Portland por GPS

Dados da resistência inicial (aos 7 dias de cura), demonstraram que todas os corpos de prova com proporções de substituição do cimento por CPS apresentaram resistência à compressão igual ou superior a obtida pela REF. Para a resistência final (aos 28 dias de cura), os corpos de prova contendo 10% de substituição por CPS apresentaram resistência superior à referência REF. Na literatura foram encontrados resultados obtidos por outras cinzas de biomassa quando utilizadas em substituição parcial ao cimento Portland e avaliadas quanto a sua resistência final (aos 28 dias de cura). Corpos de prova contendo proporções de substituições de até 35,0% cinzas de casca de arroz apresentam resultados superiores aos obtidos pelos corpos de prova de referencia, como relatado na Tabela 8, ressaltando-se os resultados obtidos por Rêgo *et ai.* (2015) e Zhang *et ai.* (2020) que com 20,0% e 35,0% de substituição respectivamente, obtiveram resistências superiores às referências. Corpos de prova contendo proporções de até 20,0% de cinzas de

bagaço de cana-de açúcar também apresentaram resultados de resistência superiores à referência, conforme relatado na Tabela 12, destacando-se os resultados obtidos por De Paula *et ai.* (2009), Poggiali (201O), Srinivasan & Santhiya (201O) que utilizaram proporções de até 20,0% de cinzas e Andrade Neto *et ai.* (2021) que utilizou até 15,% de cinzas, todos obtendo resultados de resistência à compressão iguais ou superiores aos obtidos pelas referências. Em relação aos resultados obtidos pela CPS, a adoção de proporções de substituição de 15,0% e 20,0% mesmo tendo apresentado resistências inferiores à referência, não devem ser descartadas. No caso do uso em concretos, a proporção de substituição do cimento Portland por CPS deve ser analisada em função da resistência mínima à compressão definida em norma específica para cada artefato ou estrutura. Para a utilização da CPS em argamassas ou pastas, o uso em proporções de até 20,0% tende a não apresentar restrições, uma vez que normalmente não são expostas à cargas de resistência à compressão, devendo também a definição pelo seu uso levar em consideração a normatização específica.

Os resultados dos ensaios de absorção de água ABNT - NBR 9778 (2005/2009), são apresentados na Figura 14.

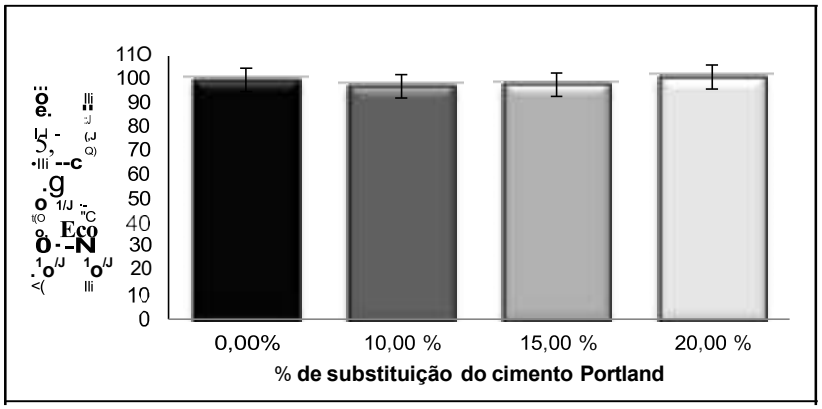


Figura 14 - Comparação da absorção de água por corpos de prova contendo a substituição parcial do cimento Portland por CPS

Os ensaios de absorção de água são utilizados para avaliar a durabilidade do concreto e de argamassas, uma vez que existe uma relação direta entre os índices de absorção de água e o envelhecimento de matrizes cimentícias. Observa-se que houve uma similaridade nos percentuais de absorção de água pelos corpos de prova contendo as diferentes proporções de substituição parcial do cimento Portland pela CPS em relação à REF. Corpos de prova contendo 10,0% e 15,0% de

CPS apresentaram uma menor absorção de água em ralação à **REF.** Já, com de 20% de CPS, houve uma maior absorção de água em relação à **REF.,** conforme apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Comparação da absorção de água por corpos de prova contendo substituição parcial do cimento Portland por CPS

Substituição (%)	% de absorção de água	Desvio relativo máximo	Absorção de água(%)
0	6,59	0,91	100,00
10	6,41	1,48	97,27
15	6,46	1,62	98,03
20	6,67	0,75	101,21

Em ensaios realizados com cinzas de casca de arroz, Antiohos *et ai.* (2013) ao utilizar 15,0% de cinzas, obteve 65% de diminuição na absorção de água, Saraswathy & Song (2007) e Kartini (2011) ao utilizarem até 25,0% de cinzas, também obtiveram diminuição no volume de absorção de água em relação a referência. Nos trabalhos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, De Paula *et ai.* (2009) utilizando proporções de 10,0% a 30,0% de cinzas obtiveram um aumento crescente na absorção de água em relação à referência, Ganesan *et ai.* (2007) estudou proporções de cinzas variando de 5,0% a 30,0% e observou elevações na absorção de água aos 28 dias de cura, por todas as proporções em relação a referência, fator que se inverteu mostrando redução na absorção de água aos 90 dias de cura para proporções de até 25,0% de cinzas. Comparando os resultados da absorção de água obtidos para os corpos de prova com frações de CPS, com os resultados relatados na literatura para corpos de prova com cinzas de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar, pode se concluir que corpos de prova com CPS apresentaram semelhança com os produzidos com cinzas de casca de arroz, em relação à porosidade, responsável pela absorção de água. A durabilidade dos concretos, argamassas ou pastas está associada, entre outros fatores, à sua porosidade, uma vez que os agentes deletérios do ambiente utilizam-se da porosidade das estruturas para causar danos através de infiltrações. Do ponto de vista da utilização da CPS, em função dos resultados obtidos para a absorção de água, pode-se concluir que a sua utilização nas diferentes dosagens estudadas (10,0%, 15,0% e 20,0%) tende a não alterar a durabilidade em relação à **REF.**

O Quadro 6 apresenta um resumo dos ensaios de viabilidade técnica do uso da CPS, os resultados, as comparações e as avaliações.

Ensaio	Resultados	Comparações	Avaliações
Resistência à tração na flexão	Ensaios de resistência inicial (7 dias de cura): 109,81%; 113,88% e 101,20% da REF. Ensaios de resistência final (28 dias de cura): 102,04%; 90,98% e 77,60% da REF.	Resistência inicial: 1O, 15 e 20% de substituição com resistência superior à REF. Resistência final: 10% de substituição com resistência superior à REF. Cinzas de casca de arroz: Até 35,0% >REF. (ZHANG *et ai.,* 2020) Cinzas bagaço cana-de-açúcar: Até 20,0% >REF. (SRINIVASAN & SANTHIYA, 2010)	Adequado para uso em condições que exijam elevada resistência inicial; Verificou-se uma diminuição da resistência final nas substituições parciais por CPS a partir de 15,0%; Até 10% de substituição, adequado para concreto; até 20% de substituição pode ser usado em argamassas e pastas, de acordo com os parâmetros normativos de resistência para cada material em função de sua aplicação.
Resistência à compressão	Ensaios de resistência inicial (7 dias de cura): 114,01%; 102,59% e 100,72% da REF. Ensaios de resistência inal (28 dias de cura): 113,49%; 93,52% e 84,95% da REF.	Resistência inicial: 1O, 15 e 20% de substituição com resistência superior à REF. Resistência final: 10% de substituição com resistência superior à REF. Cinzas de casca de arroz: 20,0% >REF. (RÊGO *et ai.* 2015); 35,0% >REF. (ZHANG *et ai,* 2020) Cinzas bagaço cana-de-açúcar: 20,0% >REF. (SRINIVASAN & SANTHIYA, 2010) 15,0% >REF. Andrade Neto *et ai.* (2021)	
Absorção de água	10,0% de CPS = 97,27% 15,0% de CPS = 98,03% 20,0% de CPS = 101,21%	Menor que a REF.; Menor que a REF.; Maior que a REF. Cinzas de casca de arroz: 15,0%: 65,0% menor que a REF. (ANTIOHOS *et ai.,* 2013) até 25,0% <REF. (KARTINI, 2011) Cinzas bagaço cana-de-açúcar: 10,0% a 30,0% >REF. (DE PAULA *et ai.,* 2009); 5,0% a 30,0% >REF. aos 28 dias e < REF. aos 90 dias GANESAN *et ai.,* 2007)	Até 15,0% de substituição observou-se leve diminuição na absorção de água em relação á REF., pressupondo menor porosidade e maior durabilidade. Com 20,0% de substituição, leve elevação da absorção em relação à REF.

Quadro 6 - Resistências e absorção de água de argamassas com CPS: resultados, comparações e avaliações

Os resultados obtidos indicam viabilidade técnica na utilização da CPS em substituição parcial do cimento Portland. A proporção de 10,0% de substituição apresentou resultados superiores à REF. (0,0% de substituição) para todos os ensaios realizados, sendo possível inferir pela sua viabilidade de uso em concretos, argamassas e pastas, proporcionando-lhes melhores características técnicas. As

proporções de 15,0% e 20,0% de substituição por GPS, também se apresentaram viáveis para o uso em argamassas e pastas, uma vez que estas, normalmente não demandam de elevadas resistências à tração e à flexão, devendo para o seu uso, serem dosadas as proporção de GPS, para atender as demandas e aos parâmetros normativos relativos a cada produto ou estrutura.

4.6 IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETO DE MDL E OBTENÇÃO DE RCE

A simulação da implementação de um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL, com vistas à obtenção de RCEs, teve por objetivo avaliar a viabilidade ambiental da utilização da GPS em substituição parcial ao cimento Portland, tendo sido definido sua abrangência para o estado do Paraná, que de acordo com SNIC (2019b) apresenta uma produção de cimento Portland de 6.150.000 t anuais. Na Tabela 14 foi apresentada uma estimativa da quantidade de GPS gerada anualmente em todo o Estado do Paraná em aproximadamente 18.096 t. Para a realização dos cálculos do presente estudo foi admitido a quantidade total de GPS gerada anualmente como sendo 18.000 t, conforme descrito na Tabela 25.

Tabela 25 - Emissões de CO_2 no transporte CPS para destinação final no Estado do Paraná

Produça-o anua1d e CPS no estado do Paraná (t)	Distância média de transporte (km)	Em·isso~es (t CO2/t cinza/km)	Emissões anuais p/ transporte da CPS (t)
18.000	100	$7{,}456 \cdot 10^{-5}$	134,208

Na Tabela 26 são apresentadas as distâncias entre os seis principais polos madeireiros que trabalham na industrialização do *Pinus spp.* e por consequência apresentam geração de GPS, e as três plantas Industriais produtoras de Cimento Portland no Estado do Paraná.

Tabela 26 - Distâncias médias entre polos geradores de CPS e cimenteiras no Estado do Paraná

Região geradora de CPS	Localização da Indústria Cimenteira	Distância (km)
Jaguariaíva-Arapoti	Balsa Nova (Itambé)	236
Telêmaco Borba		237
Ponta Grossa		104
Curitiba - Região metropolitana		51
Guarapuava		241
União da Vitória		193
Jaguariaíva-Arapoti	Rio Branco do Sul (Votorantim)	274
Telêmaco Borba		275
Ponta Grossa		142
Curitiba - Região metropolitana		31
Guarapuava		279
União da Vitória		265
Jaguariaíva-Arapoti	Adrianópolis (Supremo)	243
Telêmaco Borba		383
Ponta Grossa		250
Curitiba - Região metropolitana		131
Guarapuava		387
União da Vitória		372
Distância média aproximada*		228*

*Média aritmética das distâncias

Visando adotar uma distância média de forma conservadora, optou-se por utilizar como referência a distância média geral de 228 km, mesmo sabendo que em uma eventual implementação do projeto, deva ser dada preferência para o transporte da fonte geradora de CPS até a indústria cimenteira mais próxima, o que provavelmente resultará em menores distâncias de transporte.

Para avaliar possíveis mitigações nas emissões de CO_2 com a implementação de um hipotético projeto de MDL com vistas à obtenção de "Reduções Certificadas de Emissões" - RCEs pelas indústrias cimenteiras do Estado do Paraná, baseando-se nos trabalhos desenvolvidos por Fairbairn *et ai.* (2012) e Rezende (2016), definiu-se pela utilização da "Metodologia de linha de base aprovada e consolidada para aumentar a mistura na produção do cimento" - ACM 0005 (UNFCCC, 2012). Essa metodologia determina que a análise das emissões deva ser feita somente para o CO_2 e não para todos os GEEs, isso porque se entende que as reduções nas emissões de CH_4 e N_2O por alterações no processo

de combustão não se apresentam significativas. Na Tabela 27 apresentam-se os resultados obtidos por essa simulação.

Tabela 27 - Obtenção de RCEs com o uso da CPS em substituição parcial ao clínquer

Termo	Significado	Resultado	Unidade
LINHA DE BASE E PROJETO DE EMISSÕES *(BASELINE ANO PROJECT EMISSIONS)*			
BEBc	Emissões totais de C02 na produção do cimento Portland no cenário da linha de base, descontada as emissões relativas à moagem e preparo de aditivos	$5{,}30 .10^{-1}$	tC02/t cimento
PEBc	Emissões totais de C02 na produção do cimento Portland no cenário do projeto de emissões, descontada as emissões relativas à moagem e preparo de aditivos	$5{,}28 .10^{-1}$	
BEblend	Fração de clínquer no cimento no cenário da linha de base.	$6{,}70 .10^{-1}$	t clínquer / t cimento
PEblend	Fração de clínquer no cimento no cenário do projeto de emissões.	$6{,}67 .10^{-1}$	
BEeleADD BC	Emissões relativas à eletricidade para moagem e preparo de aditivos no cenário da linha de base.	Não Calculado*	tC02 /t cimento
PEeleADD BC	Emissões relativas à eletricidade para moagem e preparo de aditivos no cenário do projeto de emissões.		
BEclínquer	Emissões de C02 / t de clínquer no cenário da linha de base.	$5{,}54 .10^{-1}$	tC02 /t clínquer
PEclínquer	Emissões de C02 / t de clínquer no cenário do projeto de emissões	$5{,}54 .10^{-1}$	
BEcalcin	Emissões de C02 / **t** de clínquer devido à calcinação do carbonato de cálcio e de magnésio no cenário da linha de base.	$3{,}49 .10^{-1}$	IC02/1 clínquer
PEcalcin	Emissões de C02 / **t** de clínquer devido à calcinação do carbonato de cálcio e de magnésio no cenário do projeto de emissões	$3{,}49 .10^{-1}$	
BE fossil fuel	Emissões de C02 / t de clínquer devido à queima de combustíveis fósseis para produção de clínquer no cenário da linha de base.	$1{,}99 .10^{-1}$	IC02/t clínquer
PE fossil fuel	Emissões de C02 / t de clínquer devido à queima de combustíveis fósseis para produção de clínquer no cenário do projeto de emissões	$1{,}99 .10^{-1}$	
BEele_grid CLNK	Emissões de C02/ t de clínquer devido ao uso de eletricidade da rede para produção de clínquer no cenário da linha de base.	$5{,}54 .10^{-3}$	IC02 /t clínquer
PEele_grid CLNK	Emissões de C02 / t de clínquer devido ao uso de eletricidade da rede para produção de clínquer no cenário do projeto de emissões.	$5{,}54 .10^{-3}$	
BEele_sg CLNK	Emissões de C02/ **t** de clínquer devido à autogeração de eletricidade para produção de clínquer no cenário da linha de base	Não Calculado**	IC02 /t clínquer
PEele_sg CLNK	Emissões de C02/ **t** de clínquer devido à autogeração de eletricidade para produção de clínquer no cenário do projeto de emissões		
EMISSÕES FUGITIVAS *(LEAKAGE)*			
Dadd_source	Distância média de transporte intermunicipal.	128,00*	Km
Ladd_trans	Emissões relativas ao transporte / t de CPS no cenário do projeto de emissões	$9{,}54 .10^{-3}$	t C02/t CPS
Ablend	Fração de CPS no cimento no cenário da linha de base	0,00	tCPS /t cimento
pblend	Fração de CPS no cimento no cenário do projeto de emissões	$2{,}93.10^{-3}$	
L	Emissões fugitivas totais relativas ao transporte de GPS	$-1{,}72 .10^{-1}$	
REDUÇÃO DE EMISSÕES (EMISSIONS REDUCTIONS)			
Bc	Produção anual total de cimento do cenário do projeto de emissões	$6{,}15 .10^{3}$	Kt
A	Fração de CPS não excedente usada no cenário do projeto de emissões	0	t CPS não excedente / t deCPS utilizada
	Redução anual de emissões de C02 para o cenário do projeto de emissões.	9,79	

*Não ocorreram alterações entre os cenários da linha de base e do projeto de emissões, anulando-se.
**Não foram encontrados registros de autogeração, sendo considerado inexistentes.
***Diferença entre as distâncias de transporte da CPS nos cenários da linha de base e do projeto de emissões.

No cenário do projeto de emissões foi admitida a utilização de 18 kt de GPS produzidas anualmente no estado do Paraná, em substituição parcial ao clínquer na produção de 6.150 kt de cimento Portland. Obteve-se a redução de aproximadamente 0,3% na fração de clínquer na composição do cimento, observando-se aproximadamente 0,3% de reduções nas emissões de CO_2. Os resultados obtido no cálculo de redução de emissões demostram que com o encaminhamento da GPS para as indústrias de cimento Portland, localizadas a distâncias médias de 228 km do seu local de geração, foi possível obter a mitigação de aproximadamente 9.795,38 t de emissões de CO2. Como cada t de CO2 que deixa de ser emitida pode ser certificada como uma RCE, podem ser obtidas para este exemplo hipotético 9.795,38 RCEs. Fairbairn *et ai.* (2012) realizou um estudo utilizando se a metodologia ACM 0005 UNFCCC (2012), analisando dois diferentes cenários de cálculo de redução de emissões, com a utilização das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial ao clínquer na produção de cimento Portland. No primeiro cenário, utilizou uma fração de 7,5% de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial ao clínquer, com distância entre a fonte geradora das cinzas e a indústria cimenteira de 318 km. Obteve nesse cenário uma redução de emissões de CO_2 na produção de cimento Portland de aproximadamente 9,0%. No segundo cenário, utilizou uma fração de 7,5% de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial ao clínquer, com distância média entre as fontes geradoras das cinzas e a indústria cimenteira de 721 km. Obteve nesse cenário uma redução de emissões de CO2 na produção de cimento Portland de aproximadamente 8,3%. Rezende (2016) estudando a viabilidade ambiental da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial ao clínquer, utilizando a metodologia ACM 0005 analisou nove diferentes cenários que variaram em função das distâncias médias de transporte das cinzas (300, 500 e 600 km) e das proporções de substituição parcial do clínquer (1O, 20 e 30%) no cálculo de reduções de emissões. Obteve como resultado para 10% de substituição 9,58%; 9,27% e 9,07% para as distâncias e 300, 500 e 600 km respectivamente. Para 20% de substituição 19,32%; 18,75% e 18,35% respectivamente. Para 30,0% de substituição 28,85%; 28,02% e 27,42% respectivamente. Nos resultados obtidos pelos dois autores se observa importantes reduções nas emissões de CO_2, variando em função das frações de substituições do clínquer e das distâncias de transporte das cinzas, em proporções semelhantes às frações de substituição do clínquer por

cinzas, sendo possível concluir que quanto maior a fração de substituição do clínquer por cinzas e menores as distâncias de transporte, maior será a quantidade de mitigação de emissões de CO_2.

Na simulação realizada para a CPS, para 228 km de distância até a cimenteira, descontando 100 km até a disposição final que deixariam de ocorrer, o projeto de emissões apresentou viabilidade ambiental. Porém, para analisar o comportamento das emissões de CO_2 para o transporte da CPS a outras distâncias, foram feitas novas simulações. Realizou-se também o cálculo do ponto de equilíbrio das emissões de CO2 em função da distância de transporte, utilizando-se da Equação (12) deduzida para esse estudo. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 28.

Tabela 28 - Mitigação das emissões de CO_2 com o uso da CPS em substituição ao clínquer, em função das distâncias de transporte da CPS até cimenteiras

Produção anual de CPS (t)	Distância média de transporte (km)	Emissões de CO_2 no transporte de CPS (t CO_2/t CPS/km)	Emissões anuais de CO_2 no transporte de CPS (t)	Mitigação das emissões anuais de CO_2 com o uso da CPS em substituição parcial ao clínquer (t)
18.000	0,00	$7,456 .10^{-5}$	0,00	9.967,16
	1,00		1,34	9.965,82
	10,00		13,42	9.953,74
	100,00		134,21	9.832,96
	128,00*		171,79	9.795,38
	1.000,00		1.342,08	8.625,08
	7.426,65**		9.967,16	0,00
	10.000,00		13.420,80	(-3.453,64)

*Distância do cenário do projeto de emissões
**Distância de transporte de equilíbrio em relação à mitigação das emissões de CO_2

Observa-se que a viabilidade ambiental da utilização da CPS como adição mineral está relacionada às distâncias de transporte. Longas distâncias tendem a diminuir o potencial de reduções de emissões de CO_2, podendo até proporcionar aumento do total de emissões, em função da queima de combustíveis fósseis pelos veículos responsáveis pelo seu transporte. Por outro lado, a viabilidade ambiental tende a se ampliar nas regiões que abriguem tanto indústrias geradoras de CPS, como as potenciais consumidoras. Para o caso do estado do Paraná, por existir importante proximidade entre os polos de geração de CPS e as indústrias cimenteiras, observa-se benefícios ambientais na mitigação das emissões de CO2 e

obtenção de RCEs. De acordo com os dados da Tabela 29, mesmo para longas distâncias no transporte da CPS, foi possível obter reduções das emissões de $C0_2$, em função do expressivo potencial de mitigação na substituição do clínquer por **CPS.**

Em uma análise pelo viés econômico financeiro, buscou-se realizar uma simulação simplificada para avaliar a viabilidade do encaminhamento da CPS para as indústrias cimenteiras. Para essa análise foi considerado apenas os custos de transporte da CPS até as indústrias cimenteiras e os valor obtido pela venda de créditos de carbono relativos às RCEs. Na Tabela 29 apresenta-se uma simulação comparando os valores obtidos com a venda de RCEs e o custo de transporte da CPS a diferentes distâncias até as indústrias cimenteiras, além do cálculo da "distância de equilíbrio financeiro" em função dos custos de transporte.

Tabela 29 - Balanço financeiro das receitas de venda de RCEs e dos custos anuais de transporte da CPS, em função da distância até as cimenteiras

Produção anual de GPS (t)	Distância média de transporte (km)	Custo médio de transporte R$/t/km	Custo total de transporte R$	Quantidade de RCEs	Valor unitário Médio R$/RCEs	Valor total venda de RCEs R$	Balanço: receitas de RCEs (-) custos de transporte (R$)
18.000	0	$2,0.\ 10^{-1}$	0,00	9.967,16	140,00	1.395.402,99	1.395.402,99
	1		3.600,00	9.965,82		1.395.215,09	1.391.615,09
	10		36.000,00	9.953,74		1.393.525,07	1.357.524,07
	100		360.000,00	9.832,96		1.376.613,87	1.016.613,87
	128		460.800,00	9.795,38		1.371.352,91	910.552,91
	368,39*		1.326.186,65	9.472,76		1.326.186,65	0,0
	500		1.800.000,00	9.296,12		1.301.457,39	(-498.542,61)

*Distância de transporte no cenário do projeto de emissões
*Distância de transporte de equilíbrio em relação ao custo de transporte da CPS

Observa-se nos resultados obtidos na Tabela 29 que ao se utilizar dos valores admitidos para essa simulação, o ponto de equilíbrio entre receitas obtidas pela venda de RCEs e as despesas incorridas pelo custo do transporte da CPS até as indústrias cimenteiras se dá para uma distância de 368,39 km. Mesmo para essa "distância de equilíbrio financeiro", obtém-se a mitigação de 9.472,76 t de emissões de $C0_2$. Para distâncias inferiores à de equilíbrio, além da mitigação de emissões de $C0_2$ observam-se balanços financeiros positivos. Para a distância média de transporte no cenário do projeto de emissões (128 km) calculada entre os polos de produção e de utilização da CPS, descontada a distância média do cenário da linha

de base, é possível observar a mitigação de 9.795,38 t de CO_2 com um balanço financeiro positivo de R$ 910.552,91 anuais, demostrando também aspectos de viabilidade econômica.

4.7 BALANÇO DAS EMISSÕES DE CO_2

Com o objetivo de analisar a viabilidade ambiental do uso da CPS em substituição parcial do cimento Portland na produção de concretos, argamassa ou pastas, realizou-se um balanço de emissões de CO_2 abrangendo as quantidades totais de CPS e cimento Portland produzido anualmente no Brasil. As emissões anuais de CO_2 na produção do cimento Portland no Brasil foram obtidas utilizando-se dos dados médios e projeções realizadas por SNIC (2019b) e apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Emissões anuais de CO_2 na produção de cimento Portland no Brasil

Produção anual de cimento Portland (t)	Emissões de CO_2 (t/t de cimento Portland)	Total de geração de$C0^2$ na produção de cimento Portland (t)
72.000.000	0,530	38.160.000

A Tabela 31 apresenta uma estimativa anual de emissões de CO_2 para o transporte da CPS em todo o Brasil, até a sua disposição final, se considerada uma distância média de 100 km.

Tabela 31 - Emissõe.sde CO_2 no transporte da CPS para destinação final no Brasil

Produção anual de CPS no Brasil (t)	Distância média de transporte (km)	Emissões (tCO_2/t cinza/km)	Emissões anuais p/ transporte da CPS (t)
38.766	100	7,456. 10-o	289,04

A Tabela 32 apresenta uma estimativa anual de emissões de CO_2 para o transporte da CPS em todo o Brasil, até as "indústrias de mix" para seu uso em substituição parcial ao cimento Portland, se considerada uma distância média de 200 km.

Tabela 32 - Emissões de CO_2 no transporte de CPS para indústrias de mix no Brasil

Produção anual de CPS no Brasil (t)	Distância média de transporte (km)	Emissões (tCO_2/t cinza/km)	Emissões anuais p/ transporte da CPS (t)
38.766	200	$7,456.\ 10^{-5}$	578,08

Na Tabela 33 apresenta-se um balanço de mitigação de emissões de CO2 com a utilização da CPS em substituição parcial ao cimento Portland pelas indústrias de mix.

Tabela 33 - Balanço das emissões anuais de CO_2 com a substituição parcial do cimento Portland por CPS

Termo	Significado	Resultado	Unidade
	LINHA DE BASE - CENÁRIO ATUAL		
Cimento Portland	Produção anual brasileira estimada com base nos resultados do ano de 2016	72.000.000	
CPS	Estimativa da produção anual pelas indústrias madeireiras brasileiras	38.766	
CO_2	Emissões de GO2 / t de cimento Portland produzido no Brasil	$5,3.10^{-1}$	
CO_2	Emissões anuais de GO2 na produção do cimento Portland	38.160.000	
CO_2	Emissões de GO2 no transporte / t de GPS / km de transporte	$7,456\ .10^{-5}$	
	Emissões anuais de GO2 no transporte da GPS até a disposição final em aterros industriais ou solos de cultivas florestais, considerando uma distância média de 100 km.	289	t CO2
Total de CO2	Emissões anuais de GO2 na Produção do cimento Portland (+) emissões anuais no transporte de GPS para a disposição final.	38.160.289	
	LINHA DO PROJETO - CENÁRIO FUTURO		
Cimento Portland	Produção anual brasileira estimada com base nos resultados do ano de 2016	71.961.234	
CPS	Estimativa da produção anual pelas indústrias madeireiras brasileiras	38.766	
CO_2	Emissões de GO2 / t de cimento Portland produzido no Brasil	$5,3.\ 10^{-1}$	
CO_2	Emissões anuais de GO2 na produção do cimento Portland	38.139.454	
CO_2	Emissões de GO2 no transporte / t de GPS / km de transporte	$7,456\ .10^{-5}$	
	Emissões anuais de GO2 no transporte da GPS até as indústrias de mix, considerando uma distância média de 200 km.	578	
Total de CO2	Emissões anuais de GO2 na Produção do cimento Portland (+) emissões anuais no transporte de GPS até as indústrias de mix	38.140.032	
	BALANÇO DE EMISSÕES		
CO2	Emissões anuais projetadas na linha de projeto = cenário futuro	38.140.032	
CO2	Emissões anuais projetadas na linha de base = cenário atual	38.160.289	
RESULTADO	Emissões na linha do projeto(-) emissões na linha de base	(-20.257)	

Observa-se que com o encaminhamento da CPS para as indústrias de mix, localizadas ao dobro da distância dos locais atuais de disposição da CPS, foi possível obter mitigações nas emissões de CO_2 de 20.257 t/a, o que corresponde a aproximadamente 0,053% de redução do total das emissões, valor diretamente proporcional ao percentual de CPS utilizado em substituição parcial do cimento Portland. Outro aspecto importante a ser analisado refere-se ao balanço de emissões CO_2 entre àquelas relativas ao transporte da CPS a diferentes distâncias e as emissões mitigadas pela substituição parcial do cimento Portland por CPS. A Tabela 34 apresenta uma simulação para avaliar do ponto de vista da mitigação das emissões de CO_2, a viabilidade de transporte da CPS até as indústrias de mix a diferentes distâncias. Apresenta também o ponto de equilíbrio das emissões no transporte em função da distância.

Tabela 34 - Mitigação anual das emissões de CO_2 com a substituição parcial do cimento Portland por CPS, em função das distâncias de transporte até as indústrias de mix

Produção anual de **CPS** (t)	Distância média de transporte (km)	Emissões de CO2 no transporte de CPS (t CO_2/t CPS/km)	Emissões anuais de CO2 no transporte de CPS (t)	Mitigação das emissões anuais de CO_2 na produção de 38.766 t de cimento Portland **(t)**	Balanço de mitigação de emissões de CO_2 pelo uso da CPS em substituição parcial do cimento Portland em função das distâncias de transporte da CPS (t)
38.766	0,00	$7{,}456 \cdot 10^{-5}$	0	20.545,98	20.545,98
	1,00		2,89		20.543,09
	10,00		28,90		20.517,08
	100,00		289,00		20.256,94
	200,00		578,00		19.967,98
	1.000,00		2.890,00		17.655,59
	7.108,37*		20.545,98		0,00
	10.000,00		28.903.93		(-8.357,95)

*Distância de equilíbrio para a mitigação de emissões no transporte da CPS

Observa-se que mesmo para longas distâncias de transporte da CPS até indústrias de mix ocorrem diminuições nas emissões de CO_2, em função do expressivo potencial de mitigação de emissões na substituição do cimento Portland por CPS. No balanço de emissões apresentado na Tabela 34 admitiu-se a distância de transporte da CPS de 200 km no cenário da linha de projeto, devendo ser subtraída a distância de 100 km para o transporte da CPS no cenário da linha de base, resultando em uma distância final de 100 km para o balanço de emissões.

Assim, conforme apresentado na Tabela 34, com uma distância de transporte de 100 km, obtêm-se a mitigação de 20.256,94 t de emissões de CO_2 anualmente. Mesmo a GPS apresentado viabilidade técnica quando utilizada em 10,0% de substituição parcial do cimento Portland, conforme já apresentado nesse estudo, a quantidade de GPS produzida anualmente representa somente 0,05% do total de cimento Portland produzido atualmente no Brasil, não apresentando capacidade de suprir totalmente futuras demandas para substituições parciais ao cimento Portland, de maneira semelhante ao que ocorre com outras cinzas de biomassa já estudadas. Além disso, a utilização das diferentes cinzas de biomassa tende a apresentar maiores viabilidades ambientais quando utilizadas próximas à sua região de geração, pois além dos expressivos potenciais de mitigações das emissões de CO2 na redução da produção do cimento Portland, apresentarão também pequenas alterações nos níveis de emissões de CO_2 relacionadas ao seu transporte. Do ponto de vista econômico financeiro, indústrias de mix ao utilizar proporções de 10,0% de GPS em substituição ao cimento Portland na produção de concretos, argamassas e pastas, tenderão a ter reduções proporcionais na compra de cimento Portland, o que representa um importante potencial de diminuição de custos e, por consequência, elevação da competitividade das empresas, indo de acordo com os princípios da Economia Circular.

5 CONCLUSÕES

Todas as características físicas da GPS determinadas pelos ensaios de massa específica (2,94 g/cm^3), superfície específica - Blaine (9.240 cm^2/g), índice de finura (5,6%) e distribuição granulométrica (diâmetro médio 27,30 µm, variação entre O,1 e 90 µm, 50 % diâmetro inferior a 22,6 µm), além de apresentar similaridade como outras cinzas de biomassa já caracterizadas domo pozolanas, demonstraram atender aos parâmetros normativos necessários para o seu uso como adição mineral pozolânica ou em substituição parcial ao cimento Portland.

Em termos de composição química, a soma dos teores médios de SiO2, Fe2Ü3 e Al2O3 representou 62,8% da concentração da GPS, sendo portanto superior ao mínimo de 50% definido por norma para pozolanas classe E. A concentração de álcalis disponíveis em Na2Oeq (5,15%) foi superior ao máximo determinado (1,5%) determinado por norma para evitar manifestações patológicas por reações álcali agregados. Dessa forma, a GPS quando utilizada como adição mineral ou substituição parcial ao cimento Portland deverá ser dosada para concentrações de até 0,6% de Na2Oeq no produto final, em atendimento aos padrões internacionais. A submissão de amostras de GPS à análise termogravimétrica observou a baixa presença de carbono não calcinado, demonstrando serem eficientes os métodos utilizados para a calcinação final da GPS. A difratometria de raios X demonstrou a presença do halo amorfo característico de estruturas amorfas (reativas), picos de quartzo, hematita e hematita + magnetita característicos da fase cristalina presente nas adições minerais. Conclui-se do ponto de vista químico que a amostra de GPS demonstrou atender aos parâmetros definidos em norma para materiais pozolânicos além de apresentar grau de calcinação e capacidade reativa compatível com outras pozolanas originárias da queima de biomassa, podendo ser classificada como um material pozolânico.

O conjunto de resultados obtido pelos ensaio de atividade pozolânica: *Chapei/e Modificado* com consumo de 528 mg de Ca(OH)2 / g de GPS acima dos parâmetros mínimos determinados pela bibliografia (330 mg/g) e pela normatização vigente (436 mg/g); índice de atividade pozolânica com a cal (IAP-Cal) com resistência de 8,0 MPa, acima do parâmetro mínimo normativo (6,0 MPa); índice de atividade pozolânica com o cimento (IAP-Cimento) com resistência de 82,0% da

REF., acima do parâmetro mínimo normativo (75,0% da REF.) para adições minerais, permitem concluir que a amostra de CPS apresenta a ocorrência de atividade pozolânica compatível com os parâmetros normativos e com outras pozolanas já caracterizadas.

Nos ensaios de resistência mecânica à tração na flexão, resistência à compressão e de absorção de água, observou-se que a substituição do cimento Portland por CPS na proporção de 10,0% apresentou resultados superiores à referência, tanto na resistência à tração na flexão (109,81% aos 7 dias e 102,04% aos 28 dias), resistência à compressão (114,01% aos 7 dias e 113,49% aos 28 dias), e de absorção de água (97,27% em relação a REF.). Conclui-se que a substituição de 10,0% do cimento Portland por CPS apresenta viabilidade técnica pela melhoria do desempenho da resistência inicial e final à tração na flexão, da resistência inicial e final à compressão e de absorção de água. Percentuais maiores de substituição deverão ser avaliados quanto ao atendimento aos padrões de resistência definidos em norma para cada matriz cimentícia.

Os resultados obtidos para a simulação feita para um projeto de MDL visando a obtenção de RCEs, através do encaminhamento da CPS produzida no Estado do Paraná para sua utilização em substituição parcial ao clínquer, demonstrou potencial de mitigação de emissões de CO_2 e a possibilidade da obtenção e venda de RCEs. O balanço brasileiro de emissões de CO2 relacionado à produção e consumo do cimento Portland, realizado pela comparação do cenário atual da linha de base e o cenário futuro da linha de projeto com a utilização da CPS em substituição parcial ao cimento Portland, também demonstrou potencial de mitigações nas emissões de CO2. Em função dos resultados obtidos, conclui-se que em função do potencial de mitigação de emissões de CO_2 e da possibilidade da aplicação dos princípios da Economia Circular, o uso da CPS em substituição parcial ao clínquer e ao cimento Portland, apresenta viabilidade ambiental.

Diante do conjunto de resultados obtidos pelo programa experimental, conclui-se pela viabilidade técnica e ambiental da utilização da CPS como material pozolânico em substituição parcial ao clínquer ou em substituição parcial ao cimento Portland.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. V. DE; SOUSA, V. A. DE; SHIMIZU, J. Y. Cultivo de Pínus. **Sistemas de Produção. Versão eletrônica. 2º ed. Brasília: EMBRAPA,** 2014. Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p _p_col_id=colu mn-2&p_r_p_-996514994_topicold=3228&p_r_p_-76293187_sistemaProducaold=3715&p_p_lifecycle=0&p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_col_count=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view. Acesso em 16 jan. 2021.

AL-KHALAF, M. N.; YOUSIF, H. A. Use of rice husk ash in concrete. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete,** v. 6, n. 4, p. 241-248, 1984.

ANDRADE NETO, J. DAS.; DE FRANÇA, M. J. S.; AMORIM JÚNIOR, N. S. DE; RIBEIRO, D. V. Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. **Construction and Building Materiais,** v. 266, 2021.

ANTIOHOS, S. K.; TAPALI, J. G.; ZERVAKI, M. Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability study. **Construction and Building Materiais,** v. 49, p. 455-463, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas:** requisitos. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos:** classificação. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos:** determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos:** determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895: Materiais pozolânicos:** determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. 201O.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Requisitos para a areia destinada à execução do ensaio de determinação da resistência à compressão de cimento Portland,** de acordo com a ABNT NBR 7215 e outros métodos de ensaios nos quais esteja especificada. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8451-1 Versão corrigida: Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 1:** Requisitos. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos:** Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos:** requisitos. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12826: Cimento Portland e outros materiais em pó:** determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Materiais pozolânicos:** determinação da atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal - Método de ensaio. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1: Concreto:** extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto - Parte 1: resistência à compressão axial. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland:** preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó:** determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos:** determinação do índice de consistência. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó:** Determinação da massa específica. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland:** requisitos. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland:** determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE - ABIMCI. **Estudo Setorial 2019:** ano base 2018. Curitiba: Kaygangue, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia básico de utilização do cimento Portland.** 10º ed. São Paulo: ABCP, 2018.

ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESAS DE BASE FLORESTAL - APRE. **Estudo setorial -APRE.** Curitiba, 2018. Disponível em: https://www.apreflorestas.com.br/wp-content/uploads/2018/02/Estudo-Setorial-2018_APRE.pdf. Acesso em 28 out. 2020.

BAIN, A.; SHENOY, M.; ASNTON, W.; CHERTOW, M. Industrial symbiosis and waste recovery in an Indian industrial area. **Resources, Conservation and Recycling,** v. 54, n. 12, p. 1278-1287, 2010.

BARDINI, V. S. DOS S. **Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de pinus em obras de pavimentação asfáltica,** 2009. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universiade de São Paulo, São Carlos, 2008.

BOATENG, A. A.; SKEETE, D. A. Incineration of rice h u 11 for use as a cementitious material: the Guyana experience. **Cement and Concrete Research.** v. 20, p. 795-802, 1990.

BONATO, M. M. **Desempenho mecânico e ambiental de concretos e argamassas de cimento Portland com substâncias minerais, orgânicas e fotocatalíticas,** 2014. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal.** Rio de Janeiro: Interciência, 201O.

BRÁS, A.; FAUSTINO, P. Repair mortars and new concretes with coai bottom and biomass ashes using rheological optimisation. **International Journal of Environmental Research,** v. 10, n. 2, p. 203-216, 2016.

CHEAH, C. B.; RAMLI, M. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. **Resources, Conservation and Recycling,** v. 55, n. 7, p. 669-685, 2011.

CHOWDHURY, S.; MISHRA, M.; SUGANYA, O. The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview. **Ain Shams Engineering Journal,** v. 6, n. 2, p. 429-437, 2015. Faculty of Engineering, Ain Shams University.

CINCOTTO, M. A. **Tecnologia de Edificações:** utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. São Paulo: PINI / IPT, 1988.

COELHO, C. A. **Estudo da viabilidade técnica e econômica da utilização da cinza da casca do arroz como material pozolânico para concreto dosado em central,** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução Nº 313: Inventário nacional de resíduos sólidos industriais.** Brasília, 2002.

COOK, D. J.; PAMA, R. P.; PAUL, B. K. Rice husk ash-lime-cement mixes for use in masonry units. **Building and Environment,** v. 12, n. 4, p. 281-288, 1977.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto,** 2006. 585 f. Tese (Ciências - Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da Variação do Índice de Amorfismo da Cinza de Casca de Arroz Sobre a Atividade Pozolânica,** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

COSTA, B. L. DE C. DA. **Quantificação das emissões de CO_2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil,** 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

DAL MOLIN, D. C. C. Capítulo 8 - Adições Minerais. In: G. C. ISAIA (Org.); **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 3º ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. **Cerâmica Industrial,** v. 1O, n. 2, p. 22-25, 2005.

DONG, H.; OHNISHI, S.; FUJITA, T. Achieving carbon emission reduction through industrial & urban symbiosis: A case of Kawasaki. **Energy,** v. 64, p. 277-286, 2014.

EISFELD, R. D. L.; NASCIMENTO, F. A. F. **Mapemaneto dos plantios florestais do estado do Paraná:** Pinus e Eucalyptus. Curitiba: Instituto de Florestas do Paraná, 2015.

ELINWA, A. U.; MAHMOOD, Y. A. Ash from timber waste as cement replacement material. **Cement and Concrete Composites,** v. 24, n. 2, p. 219-222, 2002.

ELLEN MACARTHUR FUNDATION. **Towards the circular economy.** 2013. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf. Acesso em: 18 dez. 2020.

FAIRBAIRN, E. M. R.; DE PAULA, T. P.; CORDEIRO, G. C.; AMERICANO, B. B.; TOLEDO FILHO, R. D. Evaluation of partial clinker replacement by sugar cane bagasse ash: CO_2 emission reductions and potential for carbon credits. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais,** v. 5, n. 2, p. 229-251, 2012.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020.** 2020. Disponível em: http://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020. Acesso em 15 dez. 2020.

FONSECA, G. C. DA. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção do concreto no Brasil:** uma abordagem epistêmica, 201O. 106 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Mestrado em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 201O.

FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. **Tecnologias e materiais alternativos de construção:** cinzas e aglomerantes alternativos. Campinas: UNICAMP, 2013.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites,** v. 29, n. 6, p. 515-524, 2007.

GAVA, G. P. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para a avaliação da atividade pozolânica,** 1999. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

GIRÓN, R. P.; RUIZ, B.; FUENTE, E.; GIL, R. R. Properties of fly ash from forest biomass combustion. **Fuel,** v. 114, p. 71-77, 2013.

GNR PROJECT REPORTING CO_2. **Total production volumes of clinker.** Disponível em: http://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/index.html. Acesso em 17 jan. 2021.

GONZÁLEZ-KUNZ, R. N.; PINEDA, P.; BRAS, A.; MORILLAS, L. Plant biomass ashes in cement-based building materiais. Feasibility as eco-efficient structural mortars and grouts. **Sustainable Cities and Society,** v. 31, p. 151-172, 2017.

GUERDERT, L. O. **Estudo de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozolânico,** 1989. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

HANDAYENI, K. D. M. E. Lesson Learned for GHG Mitigation on Transportation Sector in Surabaya City, Indonesia. **Procedia - Social and Behavioral Sciences,** v. 135, p. 152-158, 2014.

HOUSTON, D.. Rice Hulls, Rice Chemistry and Technology. **American Association of Ceveral Chemistry.** p.301-352, St. Paul, MN, 1972.

HWANG, C. L; WO. D. S. Properties of cement paste containing rice husk ash. **In: American Concrete Institute.** v. 114, p. 733-765, 1989.

IBÁ- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório 2019. Disponível em: https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf. Acesso em 22 jan. 2021.

IBGE. **PEVS 2018.** 2019. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2018_v33_informativo.pdf. Acesso em 18 jan. 2021.

IKEMATSU, P.; LAGUNA, L. A. **Influência da temperatura na desforma do concreto.** ed.150, set. São Paulo: Techne, 2009.

INVESTING.COM. **Crédito Carbono Futuros.** Disponível em: https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data. Acesso em 24 out. 2020.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho:** um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura, 1995. 280p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JAHANZAIB KHALIL, M.; ASLAM, M.; AHMAD, S. Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete -A review. **Construction and Building Materiais.** n. xxxx, 2020.

KANNING, R. C. **Caracterização da cinza da folha de bananeira (Musa spp):** avaliação do potencial pozolânico, 201O. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

KANNING, R. C. **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland,** 2013. 192 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2013.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; BONATO, M. M.; SANTOS, J. C. M. DOS. No Title. **Construction and Building Materiais,** v. 54, n. March, p. 460-465, 2014.

KARTINI, K. RICE HUSK ASH - POZZOLANIC MATERIAL FOR SUSTAINABILITY Faculty of Civil Engineering Universiti Teknologi MARA 40450 Shah Alam , Selangor Malaysia Abstract machine (RHA). **International Journal of Applied Science and Technology,** v. 1, n. 6, p. 169-178, 2011.

KAWABATA, C. Y. **Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na composição de compostos fibrosos e concreto leve para construção rural,** 2008. 181 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Programa de Pós-graduação em Zootecnia, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

KHAN, R.; JABBAR, A.; AHMAD, 1. Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. **Construction and Building Materiais,** v. 30, p. 360-365, 2012.

KLOCK, U.; MUNIZ, G. 1. B. DE; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. DE. **Química da madeira.** 4º ed. Curitiba: UFPR, 2013.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos do desdobro de toras de *Pínus spp.,* sílica ativa e cinza de casca de arroz em compósito cimento-madeira. **Scientia Forestalis/Forest Sciences,** n. 87, p. 459-469, Piracicaba, 201O.

LIMA, J. A. M. DE; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de madeira de *Pínus spp.* cinza volante e escória de alto-forno em compósitos cimento-madeira. **Floresta,** p. 639-650, Curitiba: PPGEF - UFPR, 2011.

LIMA, S. A.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; ALMEIDA, F. DO C. R.; SANTOS, T. J. DOS. Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. **VI Congresso internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas.** Córdoba, Argentina. 201O.

LIMA, S. DE A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias:** estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju, 2008. 160 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MADALENA, L. M. **Influência do teor em pozolana na reatividade e nas características mecânicas de argamassas,** 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Perfil de Construção) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

MANSANEIRA, E. C. **Verificação da potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em cimento Portland,** 2013. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 201O.

MAPA, M. D. A. P. E. A. **Plano nacional de desenvolvimento de florestas plantadas:** Plantar Florestas. 2018. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/documentos/PlanoPlantarFlorestasversoconsultapblicaset.pdf. Acesso em 23 nov. 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 2º ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MEHTA, P. K.; PITT, N. A new process of rice husk utilization. **In: Rice By-products Utilization - International Conference.** p. 46-58, 1974.

MEHTA, P. K.; PITT, N. Energy and industrial materiais from crop residues. **Resource Recovery and Conservation,** v. 2, n. 1, p. 23-38, 1976.

MENDONÇA, M. DE F. **Substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bambu:** Bambusa vulgaris, 2018. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

MESQUITA, A. S. G. Análise da geração de resíduos sólidos da construção civil em Teresina, Piauí. **Holos,** v. 2, p. 58-65, 2012.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Publishing Group,** v. 16, n. 7, p. 698-699, 2017.

ORMAZABAL, M.; PRIETO-SANDOVAL, V.; PUGA-LEAL, R.; JACA, C. Circular economy in Spanish SMEs: challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production,** v. 185, p. 157-167, 2018.

PAULA, M. O. DE. **Potencial da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland,** 2006. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

DE PAULA, M. O.; TINÔCO, 1. DE F. F.; RODRIGUES, C. DE S.; DA SILVA, E. N.; SOUZA, C. DE F. Potential of sugarcane bagasse ash as a partial replacement material for Portland cement. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental,** v. 13, n. 3, p. 353-357, Campina Grande, 2009.

POGGIALI, F. S. J. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar,** 201O. Dissertação - Pós Graduação em Construção Civil - Univerrsidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

POSSAN, E. Captura de CO_2 em materiais cimentícios. **Concreto** & **Construções,** n 95. jul-set, p. 72-78. São Paulo: IBRACON, 2019.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamentos da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. 345 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PRIETO-SANDOVAL, V.; JACA, C.; ORMAZABAL, M. Towards a consensus on the circular economy. **Journal of Cleaner Production,** v. 179, p. 605-615, 2018.

PRUDENCIO JR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. D. A. **Utilização de resíduos na construção habitacional:** cinza de casca de arroz. v4 ed. Porto Alegre: ANTAC, 2003.

RAVERDY M., BRIVOT F., PAILLERE A.M., D. R. Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires. **Congres International de la Chimie des Ciments. Vol.** Ili, IV, p. 36-41. Paris, 1980.

RÊGO, J. H. S.; NEPUMUCENO, A. A.; FIGUEIREDO, E. P.; HASPARYK, N. P. Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content. **Construction and Building Materiais,** v. 80, p. 56-68, 2015.

RESENDE, D. S. DE. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar,** 2013. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materias da Rede Temática de Engenharia de Materiais - UFOP - CETEC - UEMG, Ouro Preto, 2013.

REZENDE, M. F. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland como mecanismo de desenvolvimento limpo,** 2016. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materias da Rede Temática de Engenharia de Materiais - UFOP - CETEC - UEMG, Ouro Preto 2016.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. Effect of calcination temperature on the Pozzolanic activity of brazilian sugar cane Bagasse ash (SCBA). **Materiais Research,** v. 17, n. 4, p. 974-981, 2014.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos na construção civil. **Coletânea habitare:** utiliação de resíduos na construção habitacional. p.65-127, Porto Alegre: ANTAC, 2003.

SANTOS, G. **Economia circular,** 2019. Rio de Janeiro: Conselho empresaria Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável - CBDS. Disponível em: https://cebds.org/publicacoes/quebrando-muros-economia-circular/. Acesso em 26 ago. 2020.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos,** 1997. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SARASWATHY, V.; SONG, H. W. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materiais,** v. 21, n. 8, p. 1779-1784, 2007.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas do Brasil em resumo.** Brasilia: SFB, 2019a. Disponível em: https://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/4261-florestas-do-brasil-em-resumo-digital/file. Acesso em 24 fev. 2021.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Boletim ISNIF 2019: Ed 1.** Brasilia: SFB, 2019b. Disponível em https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim-SNIF_Ed1_2019.pdf. Acesso em 24 fev. 2021.

SIDDIQUE, R. Utilization of waste materiais and by-products in producing controlled low-strength materiais. **Resources, Conservation and Recycling.** v. 54, n. 1, p. 1-8, 2009.

SIDDIQUE, R. Utilization of wood ash in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling,** v. 67, p. 27-33, 2012.

SILVEIRA, A. A. **Utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos:** estudo do ataque por sulfatos, 1996. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Relatório anual 2019.** São Paulo, 2019a. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf. Acesso em 23 out. 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Roadmap tecnológico do cimento:** potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, 2019b. Disponível em http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28. Acesso em 23 out. 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Produção anual de cimento Portland.** Disponível em: http://snic.org.br/numeros-industria.php. Acesso em 23 out. 2020.

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research,** v. 30, n. 9, p. 1485-1488, 2000.

SOUTO, J. M. F. **Avaliação do desempenho da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de concretos,** 201O. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 201O.

SOUZA, M. M. DE; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. DOS. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheira e do processamento de *Pínus taeda.* **Floresta,** v. 42, n. 2, p. 325-334, Curitiba, 2012.

SRINIVASAN, R.; SANTHIYA, K. Experimental Study on Bagasse Ash in Concrete. **International Journal for Service Learning in Engineering, Humanitarian Engineering and Social Entrepreneurship,** v. 5, n. 2, p. 60-66, 201O.

SUGITA, S.; SHOYA, M.; TOKUDA, H. Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash. **In: American Concrete Institute** (Org.); Proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. **Anais....** p.495-512, 1992.

TASHIMA, M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland,** 2006. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Program ade Pós-graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha solteira, 2006.

TASHIMA, M. M.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambiente Construído,** v. 12, n. 2, p. 151-163, 2012.

VAN TUAN, N.; YE, G.; VAN BREUGEL, K.; FRAAIJ, A. L. A.; BUI, D. D. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. **Construction and Building Materiais,** v. 25, n. 4, p. 2030-2035, 2011.

TUOTO, M. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado.** Curitiba: PNEUD, 2009.

UMAR, U. A.; SHAFIQ, N.; AHMAD, F. A. A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia. **Ain Shams Engineering Journal,** n. xxxx, 2020.

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its first session.** 2006. Disponível em: https://unfccc.int/resource/docs/2006/cmp2/eng/10a01.pdf. Acesso em 18 já. 2021.

UNFCCC. **ACM0005 - Approved consolidated baseline and monitoring methodology - Increasing the blend in cement production.** 2012. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/1AG8O523O2UQD01BAID55YT2LZZ6R0. Acesso em 18 jan. 2021.

VASKE, N. R. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição em concreto,** 2012. 325 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. **Fuel,** v. 105, p. 40-76, 2013.

VENKATANARAYANAN, H. K.; RANGARAJU, P. R. Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete. **Cement and Concrete Composites,** v. 55, p. 348-363, 2015.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Relatório integrado 2018.** São Paulo, 2018. Disponível em: https://www.votorantimcimentas.com.br/download/br/integrated-report.pdf. Acesso em 23 out. 2020.

WALKER, R.; PAVÍA, S. Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes. **Materiais and Structures/Materiaux et Constructions,** v. 44, n. 6, p. 1139-1150, 2011.

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em conceto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz,** 2001. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenhari Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

WIECHETECK, M. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnologicas e propostas de políticas ao uso de resíduoas florestais para fins energéticos. Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental,** Curitiba: MMA, 2009.

WINCKLER, J. R.; PORTELLA, K. F. **Caracterização física e química de cinza de *Pinus spp.* para a adição em produto de cimento Portland:** concreto e argamassa, 2015. 99 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Institutos de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Curitiba, 2015.

ZAIN, M. F. M.; ISLAM, M. N.; MAHMUD, F.; JAMIL, M. Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materiais,** v. 25, n. 2, p. 798-805, 2011.

ZAREEI, S. A.; AMERI, F.; BAHRAMI, N. Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materiais,** v. 184, p. 258-268, 2018.

ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; BATIC, O. R.; ISAIA, G. C. Alkali-silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash. **Construction and Building Materiais,** v. 36, p. 796-806, 2012.

ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; ISAIA, G. C. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. **Construction and Building Materiais,** v. 25, n. 1, p. 371-378, 2011.

ZHANG, Z.; YANG, F.; LIU, J. C.; WANG, S. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash. **Cement and Concrete Research,** v. 137, n. August, 2020.

ZUNINO, F.; LOPEZ, M. Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materiais on strength and permeability: A multi-levei approach. **Cement and Concrete Composites,** v. 65, p. 19-28, 2016.

ANEXOS

lactec

Relatório
RELEC 12800/20.20

Tilru1o:	RE:L.ATÓRIO.DEENSA.IOS
Ob)e tiJ ;	nsaios para determinação de atividade pozolânica
e nto:	ORÇ OC 14051_2019
J,do:	–/–
Sollcilt.m	1019 1089110 WINC W!
	f:
	oo«EÇO:
	Ddilde: i:>almas• PR
	Ef:85• 000
	A/O.mó
	Tel.:
	E-mail: j
A:m <15,	Cinza de Pinus
E.xeQUtanm:	lactoc
	Rodovia E!R;-UG, km 9-8; n'il Ml.3 1!larclm dla.s M'ré lca:s
	Cai!@ Pfiltai 19067 1 CEF' 61531-980 1 Guriitiiba-Paranlâ- Blfasll

É i,pe tkníca:

BirendlaMar'.iiíRud ik
EC/Á«:.ãd ESttl'!.!tY:f'ãi Ü'll'i

I.e.an.d':ro iJlres Oà'aviano
E.C/Area d1e Estrflut'Uras□vis

remando MeíldiesBrito
EC/Âma d!B EstirutimisOlv,is

Danlele 'Vildlíll-F'erelra
EC/Áirea de Emti,rurasCl'llls

ilerer:Son Lt1il. ronho
C/Árna df! mll,JrasOv

Aprovaç:So:

tiloà l.e;pretti Med:eiro5
Gerente
C/An a de E!itn1tlJJas dvis

Relatórn.J•
REl..OC 12.89'9{,202.0

:l:de7
:11.:C Ó

t. AMOSmAS

A amostra foi en e ao LA CTEC/EC, on:de foi registrada na data 18.11.2019 conforme o Quadro 1.

Quadro l • ltdemHicação da **11mosu-a**

RegISWQ'IAC"m:	kgitl ão do$ nli õ!I	Or1gêrn
l.M7&.19	□nza d'.e,nl.lll	Cima Fl llil • 1 d'Úi 1:ria+M0rri

lactec

Il!elatório
RE EC 128911/2020

SUMÁRIO

I, A!MOSTII!AS 2
I. PaocmM . IO 111N 4
PR **A!MÇ.ÃOOA**MiOOIRA **5**
RE:SULr·.-OOSOO'IilDOS ..... **S**
4.1 - Ir.J!)I *O* **pmc,** ,ÀiNI **5**
4 ·O.. **MINA.CÃO**O M ESIPI!<:ilFIICA **6**
4 ;3I • liNDICE E f:I/\IIJR/1.•., ... 6
4.4 O· INIIMot.MNI ..... -
5. HISTÓRICDQASIRMSÕ:g; 7

L TA OEQ;UAOROS

QLI O 1-IDBN1ilf;'ICAçruJDAAIMQS1'RA ..... *1.*
Q.UA!. R02 •IDETEIRMII\IAÇÃOOIEATI\I'jDAOEP Ot **ICA-1.fl878.19** ..... **S**
QU.! -liO -OE11:RMJ1NAÇÃOIO MASSA [Sp[OÍfIIC - LOS9S.19 6
QUADR04 =OETEIRI,;IliNAÇÃOIOO MOICEOERN'URA - I.III595.19 6
QUADROS -OfImMI!NAÇÃOIDA fIINUAA ffl.AINiE -1.C69'5.I9 ..... ,7

lactec

Relatôrio

Rl:I. OC 1-2899/202.0

4d•7
;111,li;J!lfmo

2. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

AB T NBR 57'5,l!'2015 Mate,ilai. po:zolániWlõ~ 0ere11f1Jll naç:ãoda atiivldade pmo'lãrí'ic.i wm cal ao:s 7 dlas;

ASNT NBR 57 .2:2014 - Materiah; p,oloffInkos - oeienrnina do,nd'ice·d c'1:l&em;penbo comelmento 11ort1,md am 2.8dlas;

ABNf NBR 16005!2011 • Mate11 is em pó- Oêtérrrnin.Jç!lo fiíllíJSsa e pedi'ic:a;

;iD,BNT Nl3R i.rn2;lOJS.- meoto Po.rtil,md l;l Q!Jtr0$ fia: 1;1m pó-]e rmln d!il flm1.ralP-é rmêtotj)o pe«ne bilidade ao ar (rmétod'ode Bl 10,ei, •ali:.açáo*d,e* en;l;ilio com oirnento reter ,nola•

./ ABNT NBR: 72tS,2019 • C1Í'!i\e1nto fto.rtfand • DBterrn 111:a(ão resisMn a pres o*d.e* oorpa; *de* rova C!lil ndrja;B.

p;tpa d,7
1 1 O

3. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

ara a twieu,ção d)i},s errsaim relaCilonado.:sà inwstiiea o da atiividade 1pmo1 nli;ada a1111,0;"Stlra, fal fe;ilizad,aa sec_.eigemem estufa a iOO..C

4. RE:SULTAOOS ObfiDOS

4.1 |w |1b:ilce, de Atlii'1d!Kie|Pom nlca.

A.!Hl!gu ão a msil;!nt.-idns os re$Ultacflo.s ob do:s r3m r'Claçlo à tí/11' diade 1poWl n rn da moo'lir.a ip: 1parada ronmme oitem 3 deste relatório;

Quadro :Z. De-tmn!Mç'ão de tivJdiide:pcndàolca -UBl 19

MATERIAL:	Cinza de Pinus		REGISTRO: 1.0878.19			
ENSAIOS FÍSICOS			ÍNPJCE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA - CAL			
xloo li',2.00"	-	%	Cifll_,.	7,'90	Mi>,a	
11 : e 11l.- 5 =	5,6	%	CPl■	H,00	.P.a	Desvio relativo
Blaine =	9240	cm²/g	CP 3 =	8, to	Pa	máximo =
Massa específica =	2,94	g/cm3	Média =	8,00	M,p.;j	
ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA - C						
IRE,FE.RbNCl.\			REGISTRO; F-1-67			
CPl■	3.iJc	MPa	0P l.■	i6,!'.>	Mi>,a	
GP =	32,7	MPa	CP2:	i!6,íl	Ml"il	
c,p =	32,9	MPa m	(ii' :			Desvio relativo
CP4=	33,2	MPa rn .iios	c;p.q.• =		li/1,	máximo =
W-cla	32,7	MPa	'Média,.	2..6,.11,	l'.a	

RESULTA:qos

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA - CAL			ÍNDICE DE ATIVII .POZ0 L>\NICA. CIM N O	
Água requerillà	1,	l!	Média dos resultados (referência)	p
Médla dos;edl do.s	:a,.00	MI>,a	Média dos resultados (amostra)	MP
Requisito mínimo i1Hili:SiSL: IOi!i	6,00	M	Índice de desempenho	%
			Para produção de cimento - mínimo 75% N	8lí: 1&6M:20:!i:í
* Cp eliminado conforme NBR 7215:2019			Para uso em concreto, argamassa e pasta - 12653:2014	iJi,11 ,,c,00')!.j _fi;

111',:i,i;i "'i"li:i:lilífi!I!), -IIU,.,t,..ro I,I\I'q"",r .:k!!lj;ll'AUOC: ,
Oil! l'nllf .lk/,;k "i,'11oM!tw,i<MIfffll<'iS ,.
'1kili ft&i ir. /M.'lálloMi, olii ; - ólj,iN _ ■ ■ <miiii:

DCIÇ-IIIII Data: Jul/2018

!lda'l'
: i,l.o o

4.2 - Cimento – Determinação da massa específica

O ef!s.aio par.;i ad:ete,rrniflli,;Jo d!a nmsa e,1;pe,ef;tca da amrutra d:e dméflto CP 11 - -*32* {amam-a H.lffi radia 1.0595.19 refü<-ê n:da foJ realuadof:tJndo as d'i1retrizes d!a Nli!R 16'605ABNT. ,20171, il3ifldo o resu'lmd'o ap.reSentãdo rHHtwci'rõ ã x– • ri'<

Q\.ladro 3 =Démmlnad'o **da ma a** espe:íftea = Ul.595'.19

A.foostra	M- **iiea** Wi'cm")	Data
1.0595.19		27/12/2019

U-lndlceide **finura**

O en iõ pã@ a dl 'niii: nàção d'o ín 1ced'e tlnu p0r melo d'e péíi-ifãdo.rãer • miõõ em c1fi'lõSt ra drne nto CI) 11- 2 regls'llrad\1 LO .19- *refu* da}, 'f'ol re, llzad o sogund'a as dl, trilzesdla NBR12825{ABNT20141 u:nd\;Iornatii!ria1!Etiid'ona pene ra N 3- , sendo o r Ylti'ldl;ioa?f nt!clo1rwq;u droa segu:ir,

Quadro 4 – Determinação do índice de finura – 1.0595.19

,Regi.stro da mostra: 1-	1.0695.19
Índice de Finura (%) (If)	ℓ

4.4 lfndlce de tlm.ll'il 81

O@, lo para adlE1.fl, nação dofndloo d'.e liJnura peilo m.Hodo 'EM *ne* em amostra d-t1 dffl()n:toCP **li**• Fl2 (rf18ílU!': **a l** .ns9i5.19 • 1ref.erénda), fol reali..id.o sq1.rnd.o as dretr,lies dlil lNEIR 1637.2(AEINT01.5), sen:do o 1re:i1.11t o apreslln do oo quadro .**ti**:sie-g'lirr,

-P -On . motót'm - M - - •'JIJI; l.!!l P!'ÃI:!L
QI .- altllll:,; ¸ — .. - /lw.d ;o.fj f.
O,\iiIi ,Iffl1i- – 'p,:8; QS <Mi,ðlffi""il/Ímiiil'<l,;/lmm<lw.ã N
;,_...,y"111 "Mikll2

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA

UFPR

SETOR DE TEER. ..... \

DE OLOGIA

"vLAMIl.R

LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2015-000

1. SOLICITANTE
José Roberto W r

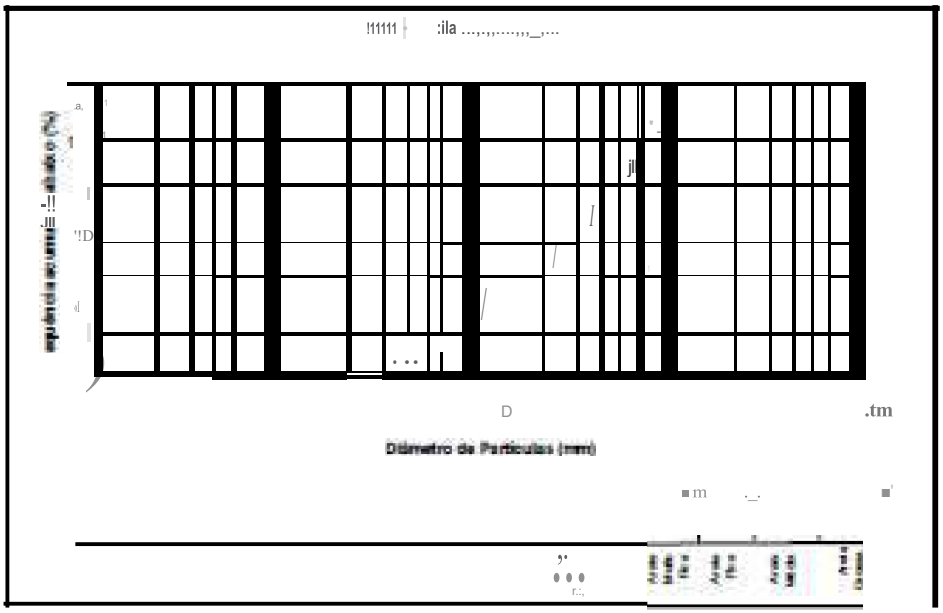
DATA DE EMISSÃO
09/01/2015

TIPO DE ENSAIO
Análise granulomét pm çiD **d n** los –,–

IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S)
Pelo solicitante
Cinza de Pinus

Nfi. UMilR.
616/14 1

!i. RESULTADOS
Gráfico da distribuição 111:1!Qm&riç;a m



OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E DOS CARIMBOS E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico: Elisiane Röper Pescini
Técnica Laboratorista
LAMIR - UFPR

Coordenadora: Drª. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos
LAMIR - UFPR

Dml,i'EKSID f.EDER..'U. DO P.ih-L

UFPR

SETOR DE CIENCIAS DA Tll.!.U

D .11 \ D:E G:E 11\

LA IR

LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS

Caixa Postal 19062 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3281 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE

Nº. 2015-0000

UFPR

RiES[ILJMOS li E "MlítilSE
G.RJ\NULOME . C
PORmFRAÇÃO D E,RWros LAS:BR

lAMJI

Cliente:	LAME	Peneiramento:	Laser
li"ll.ano,,	IAll,ll 1	T EIII ll.....	- Cll.illi mN D
Nome da Amostra:	1,1302.14	Técnico:	Elisiane R. Peschl
Massa inicial (g):	100,00	Data:	1.llill

MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	PORCENTAGEM RETIDA (%)	% EQUIVALENTE	ACUMULADA ACIMA	ACUMULADA ABAIXO
HI	t•	1,1!!1			
t:Z	51	il,111			IEe,N
!IJI	1,[91	tPJI			'l:N,,l,J
Lll	t, M	Í,1!11			
	l;f_N	11,n;l		lo"	'fllt;tG
m	UM	il,llZ		iUli	
l'»m		i,111	!,fl		
	IJIII'	il;'II	4,11	6,91	na
(',PI	.IIi	tpJ'	6,67	12,58	l'l',f.11
nJ	1,11d.	11,EI	8,93	21,91	
'–	]!	:r.–	7,85	29,76	i i i i
nm	t,1[!11	'11,.U	n.?J	40,50	
!.OI	IÇIIH	El,ZI	13,71	54,71	
	t,IIN	:n,a	21,76	;ra,411	H,I_I
		li.ili!	9,31	85,87	
	,IH]	1',N	,IU	92,91	;r,.
	1	11,'D		99,04	
·!LNI	'.MI				1,96
	r-.r;1,	'11 .IH	.1 .u,	llin:11!1:-Z"L	1 lt".B
		Collmml	1s-,1	1 21',,X,	

- FINAL DO CERTIFICADO -

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS AS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E DOS CARIMBOS E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

esponsável Técnico: Elisiane Ribeir Peschl
Técnica Laboratorista
LAMIR - UFPR

Coordenadora: Drª. Eleonora Maria Gouvêa Vasconcelos
LAMIR - UFPR

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS
Caixa Postal 19002 • 81.531-980 • Curitiba – PR • Tel. (41) 3361-3251 • Fax (41) 3361-3671 • www.lamir.ufpr.br • lamir@ufpr.br

CERTIFICADO DE ANÁLISE
Nº. 2019.317 FRX

Análise química semiquantitativa total por espectrometria de fluorescência de raios X, pó prensado

Equipamento: Espectrômetro PANalytical Axios Max.

Solicitante: José Roberto Winckler	**Data de entrada:**	02/10/2019
	Data de emissão:	05/11/2019
Identificação da(s) amostra(s) pelo solicitante:	**Nº LAMIR:**	
Cinza de Pinus - Fração Maior		317/19.02

	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	K_2O (%)	TiO_2 (%)	Na_2O (%)	P_2O_5 (%)
Fl rnó-tra	35,4	15,4	14,9	12,0	8,4	5,4	2,2	1,6	1,4

MnO (%)	SO_3 (%)	ZrO_2 (%)	Rb_2O (%)	SO (%)	CUD (%)	ZnO (%)	Cl (%)	P.F. (%)
0,9	0,3	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	1,90

P.F. - perda ao fogo

Obs.: A análise semiquantitativa possui certo caráter subjetivo e interpretativo. São aceitáveis variações significativas nas concentrações indicadas acima, como falsas indicações positivas e/ou negativas de elemen

FINAL 00 CERIlf[r.w.[ID -

PÁGINA 1 de 1

OS RESULTADOS ANALÍTICOS REFEREM-SE APENAS ÀS AMOSTRAS ANALISADAS PELO LAMIR. REPRODUÇÕES DEVEM SER TOTAIS, REFERENCIANDO O NÚMERO DO CERTIFICADO. ESTA VIA ORIGINAL SÓ TEM VALIDADE QUANDO ACOMPANHADA DA CHANCELA DO LAMIR E RUBRICAS DO RESPONSÁVEL TÉCNICO E DO COORDENADOR DO LABORATÓRIO.

Responsável Técnico: Coordenadora Técnica:

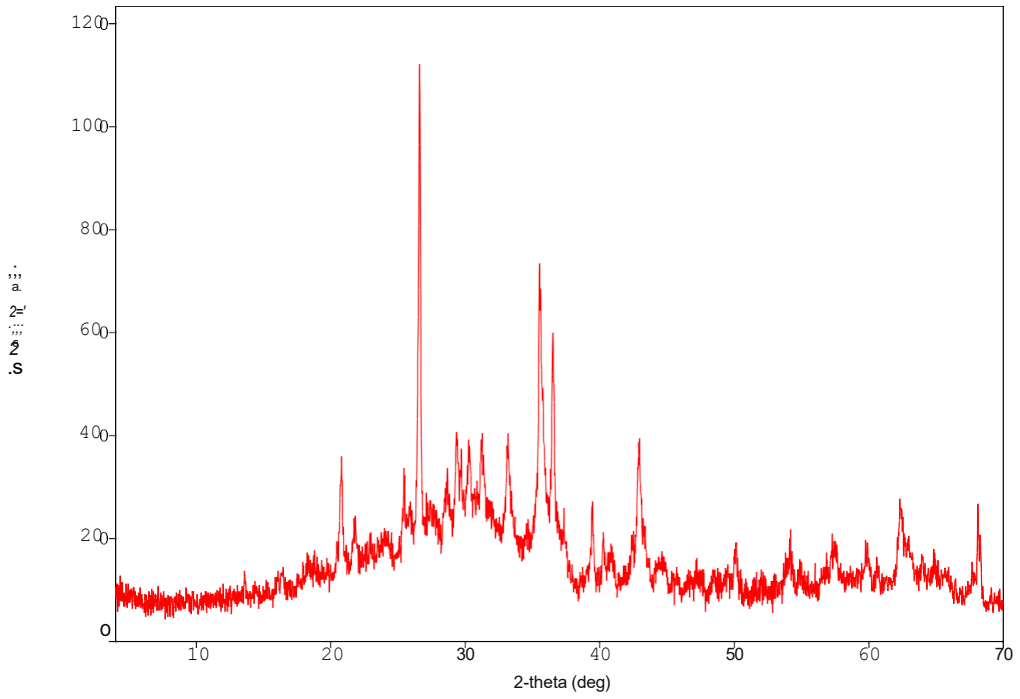
Central de Análises
UTFPR - Campus Pato Branco
Via do Conhecimento, Km 1
CEP 85503-390 - Pato Branco - PR - Brasil
Telefone: (46) 3220-2519 ou 3220-2573

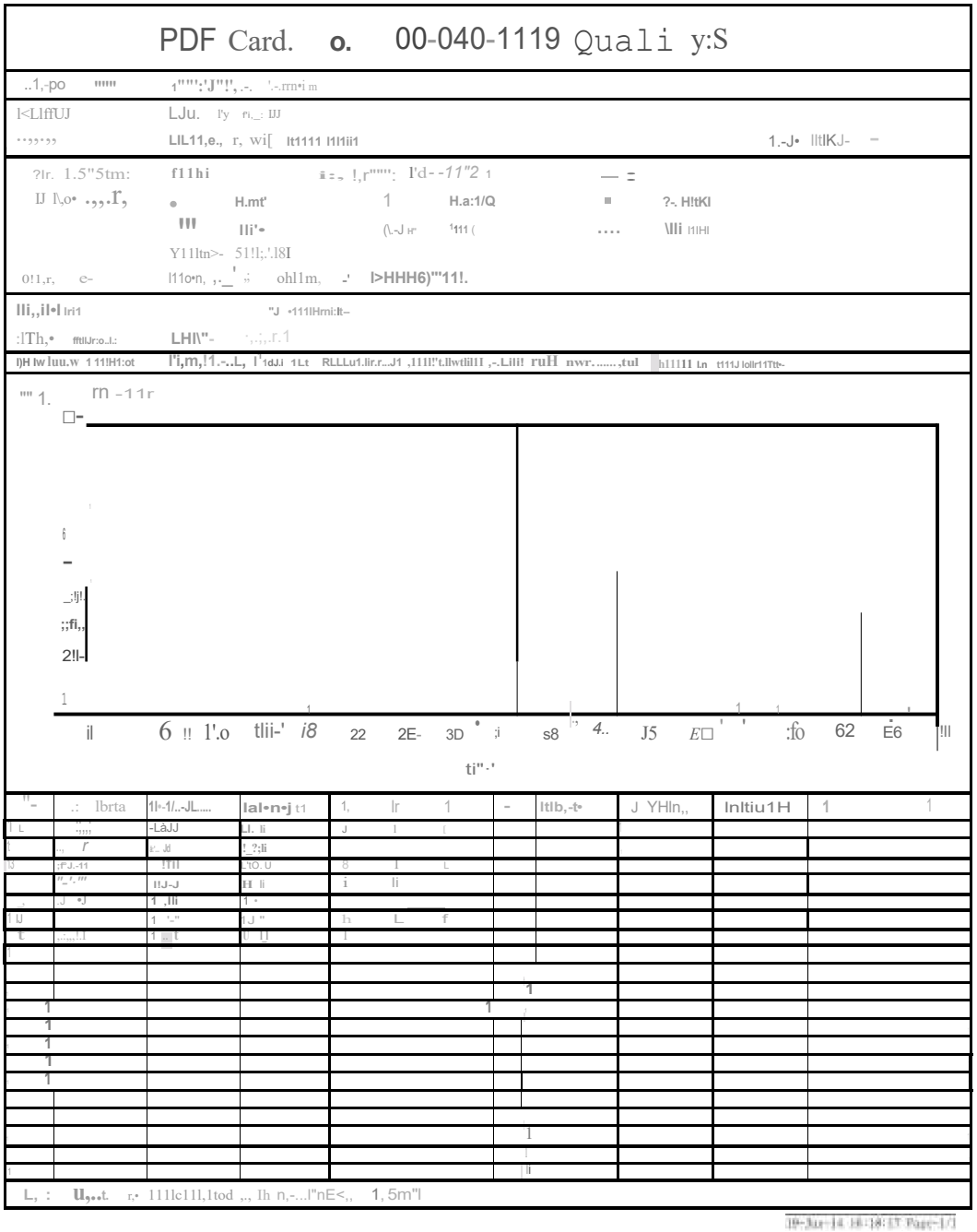
Analysis Results

General Information

Analysis date	2019/06/14 16:18:50		
Sample name	3	Measurement date	2019/06/14 15:50:38
File name	3.ras	Operator	Administrator
Comment			

Measurement profile



Measurement conditions

X-Ray	40 kV, 15 mA	Scan speed / Duration time	3.0000 deg/min
Goniometer	MiniFlex 300/600	Step width	0.0200 deg
Attachment	Standard	Scan axis	Theta/2-Theta
Filter	None	Scan range	4.0000 - 70.0000 deg
CBO selection slit		Incident slit	1.250deg
Diffrected beam mono.	Bent	Length limiting slit	10.0mm
Detector	SC-70	Receiving slit #1	1.250deg
Scan mode	CONTINUOUS	Receiving slit #2	0.3mm