



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)/
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT) em implantação
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

JOSÉ LEONARDO VANDERLEI DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS
PERIGOSOS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA PARA CONCRETO**

Catalão – GO
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE FÍSICA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

JOSÉ LEONARDO VANDERLEI DE CARVALHO

3. Título do trabalho

AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS PERIGOSOS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA PARA CONCRETO

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **André Carlos Silva, Professor do Magistério Superior**, em 09/08/2023, às 13:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSÉ LEONARDO VANDERLEI DE CARVALHO, Discente**, em 09/08/2023, às 14:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3944346** e o código CRC **6C53AD86**.

JOSÉ LEONARDO VANDERLEI DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS
PERIGOSOS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA PARA CONCRETO**

Tese apresentada ao Programa do Pós-Graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas, do Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás (UFG)/ Universidade Federal de Catalão (UFCAT) em implantação, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências Exatas e Tecnológicas, na área de concentração em Metodologia da Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador:
Prof. Dr. André Carlos Silva

Coorientadora:
Profa. Dra. Elenice Maria Schons Silva

Catalão – GO
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Carvalho, José Leonardo Vanderlei de
AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE INCINERAÇÃO DE
RESÍDUOS PERIGOSOS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA PARA
CONCRETO / José Leonardo Vanderlei de Carvalho. - 2023.
119, CXIX f.

Orientador: Prof. Dr. André Carlos Silva; co-orientadora Profa. Dra. Elenice Maria Schons Silva.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Catalão, Instituto de Física, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas, Catalão, 2023.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. caracterização tecnológica. 2. reutilização. 3. cinzas pesadas. 4. resíduos. 5. argamassa. I. Silva, André Carlos, orient. II. Título.

CDU 669



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE FÍSICA

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata nº 2 da sessão de Defesa de Tese de Doutorado aluno **JOSÉ LEONARDO VANDERLEI DE CARVALHO**, que confere o título de Doutor em **CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**, na área de concentração **Metodologia da Ciência e Engenharia de Materiais**.

Aos **07 de julho de 2023**, a partir das **14:30**, na sala na forma remota pelo **Google Meet**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada “**AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS PERIGOSOS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA PARA CONCRETO**” nas dependências da Universidade Federal de Catalão, onde os programas de pós-graduação stricto sensu em funcionamento encontram-se provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás, em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, já sendo realizada a transferência da Biblioteca Digital de Dissertações e Teses (BDTD). Assim, justifica-se os nomes das instituições neste documento, uma no cabeçalho (UFG), outra no corpo do texto (UFCAT). Os trabalhos foram instalados pelo Orientador Professor Doutor **ANDRÉ CARLOS SILVA (UFCAT)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Doutora **ANGÉLICA MÁRCIA DOS SANTOS (EMPRESA ALVAREZ AND MARSAL)**, membro titular externo, Professora Doutora **DÉBORA NASCIMENTO SOUSA (IFGoiano)**, membro titular externo, Professor Doutor **FRANCISCO GABRIEL SANTOS SILVA (UFBA)**, membro titular externo, Professor Doutor **JOSÉ GETULIO GOMES DE SOUSA (UNIVASF)**, membro titular externo, Professora Doutora **ELENICE MARIA SCHONS SILVA (UFCAT)**, co-orientadora, A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese, tendo sido o candidato **APROVADO** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **ANDRÉ CARLOS SILVA**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, no **sétimo dia do mês de julho de dois mil e vinte três**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **André Carlos Silva, Professor do Magistério Superior**, em 09/08/2023, às 13:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **DÉBORA NASCIMENTO SOUSA, Usuário Externo**, em 14/08/2023, às 17:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO GABRIEL SANTOS SILVA (1522482), Usuário Externo**, em 14/08/2023, às 17:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANGÉLICA MÁRCIA DOS SANTOS, Usuário Externo**, em 14/08/2023, às 18:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Getulio Gomes de Sousa, Usuário Externo**, em 15/08/2023, às 11:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elenice Maria Schons Silva, Professora do Magistério Superior**, em 16/08/2023, às 10:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3944333** e o código CRC **02934A0F**.

Referência: Processo nº 23070.033292/2023-33

SEI nº 3944333

Os Programas de Pós-Graduação *stricto sensu* em funcionamento na Universidade Federal de Catalão (UFCAT), em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, continuam provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás (UFG), por isso, todos os elementos pré-textuais do trabalho apresentado estão identificados como Universidade Federal de Goiás/Universidade Federal de Catalão em implantação, em função da migração da BDTD ter ocorrido a partir de 16 de agosto de 2021, assim como pelo fato das pesquisas e produtos serem realizados na UFCAT.

DEDICATÓRIA

Como outrora, dedico essa pesquisa a minha esposa (Ilvanete Santos), minha mãe (Arai Vanderlei) e em especial ao meu pai (Dario Vanderlei - *in memoriam*), que no início dessa caminhada acabou nos deixando. Tenho eterna gratidão pela compreensão e apoio em toda essa caminhada!

Nunca me foi suave a vida, ao contrário, semeada de cravos, espinhos, pedregulhos e desafios. Às vezes, mal compreendido pelos meus ideais, mas tendo vencido graças à força de minhas convicções e da busca pela superação.

Agradecimentos

A Deus por estar sempre presente em minha vida.

Ao Prof. Dr. André Carlos Silva (orientador) e a Prof. Dra. Elenice Maria Schons Silva (co-orientadora), que no início dessa caminhada me acolheram e acreditaram em mim, sempre com muita paciência, sabedoria e competência nos ensinamentos. Aprendi demais com vocês!

Ao Eng. Luís Felipe responsável técnico da empresa fornecedora dos resíduos, por todas as colaborações durante a pesquisa.

Aos Professores Francisco Gabriel e José Getúlio pelas colaborações nas arguições, os ensinamentos e o aporte científico. Ao Dr. Danilo Vitorino que colaborou imensamente na etapa da caracterização do material de estudo.

A todos os servidores e docentes do PPGCET da UFCAT, pela oportunidade e ensinamentos.

Aos amigos: Francioli, Carlos Eduardo, Ramon, Luís, Silvana, Eduardo, Fernando, Felipe, Gabriela e Flávia. Ao estudante Luís Eduardo, que colaborou no início da pesquisa.

À minha mãe Arai Vanderlei e a minha amada esposa Ilvanete Santos, me incentivando sempre e apoiando minhas decisões.

Aos meus colegas da Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB: Professores Valdeilson, Juarez, Neto, Sérgio, Antônio, Dennis, Kuelson, Pedro Paulo e demais colegas por todas as colaborações nas análises químicas, físicas e ensaios. Em especial, ao amigo Prof. Cláudio Alex que vivenciou vários momentos comigo durante essa caminhada.

À UFOB, instituição da qual me orgulho em fazer parte, pela compreensão, apoio e liberação para qualificação profissional e pessoal, durante todo o processo de doutoramento.

Por fim, a todos que diretamente/indiretamente de alguma forma contribuíram na pesquisa.

RESUMO

O manejo e descarte inadequado de resíduos sólidos (RS), em especial os resíduos perigosos (RP), podem trazer consequências danosas para o meio ambiente e saúde pública. No Brasil, essa preocupação vem ganhando importância através da diretriz legal que institui a política nacional de resíduos sólidos (PNRS) fomentando a implantação de processos que realizem o tratamento e destinação adequada dos resíduos gerados. Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar o subproduto (cinzas) oriundo da incineração de RP aplicados em matrizes cimentícias por substituição parcial do cimento Portland e/ou agregado miúdo. O material estudado foram cinzas pesadas (CP) advindas de uma incineradora situada no estado da Bahia/Brasil, que calcinadas a 1000°C em laboratório, geraram cinzas calcinadas (CC). As cinzas CP e CC, foram submetidas a ensaios de caracterização físico-químico e mineralógicos, a exemplo da difração de raios X (DRX), fluorescência de raio X (FRX), infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), análise térmica (TGA e DTA), análise da microestrutura (MEV-EDS), extratos de lixívia de elementos por plasma (ICP-MS), distribuição granulométrica a laser, massa específica, superfície específica, perda ao fogo (PF), carbono orgânico total (COT), ensaios de atividade pozolânica (Frattini, Luxán, DRX e NBR 5752/2014), determinação de índice de consistência (IC), resistência à compressão (RC) e porosidade aparente (PA) aplicado em pastas e argamassas com uso individual da CC ou em composição de CC+ filler calcário (FC). Os resultados obtidos indicam características físicas de massa específica da ordem de 2,80 g/cm³ para CC, PF e COT acentuados de 47% na CP e 2% na CC, composição química com presença de Al₂O₃, SiO₂, CaO, Fe, Ag entre outros elementos traços e atividade pozolânica moderada. Nos extratos dos lixiviados não detectou-se presença de metais pesados, sendo observado presença dos elementos Ca, Al, Fe, K, Na e Ag em concentrações abaixo do normatizado no Brasil, e taxas de transferência em ordem maior das CC em relação as CP. O uso das diversas técnicas e métodos implementados, permitiram ampliar o conhecimento do resíduo em estudo, indicando que a incorporação do percentual de 5% das CC em argamassa para concreto não comprometeu as características de RC e PA e tiveram desempenhos satisfatórios. A incorporação da CC em argamassas, vai diminuir o volume da destinação final desse resíduo em aterros sanitários, ganhos energéticos, redução da produção/consumo de cimento impactando positivamente para redução das emissões de CO₂ na atmosfera, diminuição da extração de agregado miúdo e quiçá ganhos econômicos com um resíduo que atualmente gera despesas transformando em retorno agregando a atividades relacionadas a construção civil.

Palavras-chave: caracterização tecnológica, reutilização, cinzas pesadas, resíduos, argamassa.

ABSTRACT

The inadequate handling and disposal of solid waste (SW), especially hazardous waste (HW), can have harmful consequences for the environment and public health. In Brazil, this concern has been gaining importance through the legal guideline that institutes the national solid waste policy (NSWP), encouraging the implementation of processes that carry out the proper treatment and disposal of generated waste. That way, the objective of this research was to evaluate the by-product (ash) from the incineration of HW applied in cement matrices by partial replacement of Portland cement and/or fine aggregate. The material studied was bottom ash (BA) from an incinerator located in the state of Bahia/Brazil, which calcined at 1000°C in the laboratory, generated calcined ash (CA). The BA and CA ashes were submitted to physical-chemical and mineralogical characterization tests, such as X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), Fourier transform infrared (FTIR), thermal analysis (TGA and DTA), microstructure analysis (SEM-EDS), plasma element leach extracts (ICP-MS), laser particle size distribution, specific mass, specific surface, loss on ignition (LI), total organic carbon (TOC), pozzolanic activity tests (Frattini, Luxán, XRD and NBR 5752/2014), determination of consistency index (CI), compressive strength (CS) and apparent porosity (AP) applied to pastes and mortars with individual use of CA or in composition of CA+limestone filler (LF). The results obtained indicate physical characteristics of specific mass of the order of 2,80 g/cm³ for CA, LI and TOC accentuated by 47% in BA and 2% in CA, chemical composition with the presence of Al₂O₃, SiO₂, CaO, Fe, Ag among other trace elements and moderate pozzolanic activity. In the leachate extracts, the presence of heavy metals was not detected, with the presence of the elements Ca, Al, Fe, K, Na and Ag in concentrations below the norm in Brazil, and transfer rates in higher order of CA in relation to BA. The use of the different techniques and methods implemented, allowed to expand the knowledge of the residue under study, indicating that the incorporation of the percentage of 5% of CA in mortar for concrete did not compromise the characteristics of CS and AP and had satisfactory performances. The incorporation of CA in mortars will reduce the volume of final disposal of this waste in landfills, energy gains, reduction of cement production/consumption positively impacting the reduction of CO₂ emissions in the atmosphere, reduction of fine aggregate extraction and perhaps gains economic with a residue that currently generates expenses transforming into return adding to activities related to civil construction.

Keywords: technological characterization, reuse, heavy ash, waste, mortars.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma planta de incineração de resíduos.	29
Figura 2 – Produção de CO ₂ por tonelada de cimento gerada.	31
Figura 3 – Principais elementos nas cinzas de RP: (a) BA, (b) WHBA, (c) BFA e (d) FA. ...	42
Figura 4 – Fluxograma do programa experimental.	45
Figura 5 – Mapa de localização do município de Barreiras/BA.	46
Figura 6 – Visão da indústria e do incinerador utilizado.	47
Figura 7– Coleta de amostra na incineradora. (a) armazenamento e (b) cinza pesadas.....	48
Figura 8 – Calcinação das cinzas coletadas: (a) cinza pesada; (b) cinza calcinada.	49
Figura 9 – Preparação das amostras:(a) separação das cinzas e (b) agitador mecânico.....	49
Figura 10 – Equipamento de leitura de difração a laser Sympatec Helos/KR	50
Figura 11 – Equipamento nos ensaios: (a) picnometro a gás hélio e (b) analisador de COT. .	51
Figura 12 – Ensaio de lixiviação: (a) colunas de lixiviação e (b) lixiviado armazenado.....	54
Figura 13 – Ensaio com o Lixiviado no ICP-MS.....	54
Figura 14 – Ensaio Frattini: (a) Frascos (b)filtração (c) e (d) indicadores utilizados.	56
Figura 15 – Produção de pastas: a) recipiente, b) corpos de prova e c) cura úmida dos cps. ..	58
Figura 16 – Misturador mecânico.	62
Figura 17 – Ensaio de IC: (a) cone com argamassa e (b) argamassa espalhada.	63
Figura 18 – Confeção dos cps	63
Figura 19 – Ensaio de RC: (a) Software VirMq e Tesc, (b) Máquina universal EMIC e (c) amostra de cp rompido.	64
Figura 20 – Ensaio de Porosidade aparente: a) coleta de amostra, b) balança hidrostática, c) preparação das amostra e d) liofilizador	65
Figura 21 – Balanço de massas dos resíduos perigosos na indústria.	69
Figura 22 – Composição gravimétrica dos resíduos incinerados.	71
Figura 23 – Curva granulométrica das CP e CC	72
Figura 24 – Distribuição granulométrica a laser das CP e CC.....	73
Figura 25 – Distribuição por faixa granulométrica da CC conforme NBR 7211/2009.	74
Figura 26 – CP após ensaio de PF: (a) CC tonalidade branca e (b) CC tonalidade amarela ...	75
Figura 27 – Espectros e imagens de MEV-EDS para CP: (a) Espectro e (b) MEV.....	78
Figura 28 – Espectros e imagens de MEV-EDS para CC: (a) Espectro e (b) MEV.	78

Figura 29 – Microscopia ótica da CP: (a) formato diversos, (b) porosidade do material, (c) fragmentos metálicos e (d) aglutinações imperfeitas	79
Figura 30 – Difratoograma da CP.	80
Figura 31– Difratoograma da CC com temperaturas diferentes.	80
Figura 32 - Espectro de FTIR para CP e CC.....	81
Figura 33 – Análise termogravimétrica das CP.	82
Figura 34 – Modelo do decaimento da concentração do Ca nas CC e CP.....	84
Figura 35 - Modelo do decaimento da concentração do Fe nas CC e CP.....	85
Figura 36 - Modelo do decaimento da concentração do K nas CC e CP.	85
Figura 37 - Modelo do decaimento da concentração do Al nas CC e CP.....	86
Figura 38 - Modelo do decaimento da concentração do Na nas CC e CP.	86
Figura 39 – Modelo do decaimento da concentração do Ag nas CC e CP.	87
Figura 40 – Resultado dos ensaio de Fratini conforme NBR 5753/2016.....	89
Figura 41 – Resultados do ensaio de CE.....	90
Figura 42 – DRX pastas referência, 2,5% e 5% com 3 dias.	91
Figura 43 – DRX pastas 7,5%, 10% e 12,5 % com 3 dias.	92
Figura 44 – Destaque dos picos de Portlandita no 18,089° nas pastas aos 28 dias.....	92
Figura 45 - Destaque dos pico de Portlandita no 34,089°, nas pastas aos 28 dias.....	93
Figura 46 - Destaque dos pico de Portlandita no 47,124° nas pastas aos 28 dias.....	93
Figura 47 - Destaque dos pico de Portlandita no 50,795° nas pastas aos 28 dias.....	93
Figura 48 – Porosidade aparente das pastas	98
Figura 49 – RC e PA das argamassas agrupados para substituição ao cimento.....	99
Figura 50 – RC e PA das argamassas agrupados para substituição a areia.....	100
Figura 51 – Resistência à compressão com substituição parcial de CPV por CC + FC.	101
Figura 52 - Resistência à compressão e porosidade das argamassas agrupados para CC+FC.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Uso de resíduos em pesquisas com matrizes cimentícias.....	33
Tabela 2 – Classificação pozolanicidade proposto pelo método Luxan <i>et al.</i> (1989).....	36
Tabela 3- Exigências químicas e físicas segundo NBR 12653/2014.....	38
Tabela 4 – Composição química de alguns resíduos pesquisados.	39
Tabela 5 – Traço para o ensaio de IAP	57
Tabela 6 – Proporções e quantidade para produção das pastas.....	59
Tabela 7 – Características físicas e químicas dos materiais.....	60
Tabela 8 – Composição percentual dos materiais para produção das argamassas em substituição ao cimento.	61
Tabela 9 – Composição percentual dos materiais para produção das argamassas em substituição ao agregado miúdo.	61
Tabela 10 – Proporções das misturas em ensaios com FC.....	66
Tabela 11 – Tipologia do resíduo recebido ou gerada pela indústria em esudo.	69
Tabela 12 – Características físicas das CP e CC.....	73
Tabela 13 – Características das CP e CC.....	75
Tabela 14 – Composição elementar para os ensaios de FRX.	76
Tabela 15 – Ensaios de ICP – OES para CP e CC.....	77
Tabela 16 – Concentrações de elementos identificados nos lixiviados.	83
Tabela 17 – Síntese dos extratos de lixiviados mensurados.....	87
Tabela 18 – Resultado do ensaio Fratini realizado aos 8 e 15 dias	88
Tabela 19 – Resultado do Ensaio de IAP	90
Tabela 20 - Índice de consistência das argamassas.....	95
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão em argamassas.....	95
Tabela 22 – Resultados dos ensaios de RC nas pastas.....	96
Tabela 23 – Resultados dos ensaios de PA das pastas	97
Tabela 24 – Resultados dos ensaios de PA em argamassas.	98
Tabela 25 – Índice de consistência das argamassas produzidas com CC + FC.	100
Tabela 26 – Resultados dos ensaios de porosidade aparente nas argamassas com CC + FC.	101
Tabela 27 – Resultados ANOVA para argamassas contendo substituição de cimento, agregado miúdo e com combinação CC + FC.	103

Tabela 28 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x RC para amostras com substituição do cimento por CC aos 7 e 28 dias.....	104
Tabela 29 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x RC para amostras com substituição ao agregado miúdo (areia) por CC aos 7 e 28 dias.	104
Tabela 30 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x RC para amostras com substituição ao cimento por CC + FC aos 7 dias.....	104
Tabela 31 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x PA nas amostras com substituição do cimento por CC aos 7 e 28 dias.....	105
Tabela 32 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x PA nas amostras com substituição ao agregado miúdo (areia) por CC aos 7 e 28 dias.	106
Tabela 33 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x porosidade aparente nas amostras com substituição ao cimento por CC + FC aos 7 e 28 dias.....	106

Lista de Abreviaturas

ABRELPE – Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AP – Atividade Pozolânica
CaO – Oxido de Cálcio
CaOH₂ – Hidróxido de cálcio
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CC – Cinza Calcinada
CO₂ – Dióxido de Carbono
COT – Carbono orgânico Total
CP – Cinza Pesada
CPII – Cimento Portland tipo II
CPV – Cimento Portland tipo V
CV – Coeficiente de Variação
Desp – Diâmetro de espalhamento
DP – Desvio Padrão
DRM – Desvio relativo máximo
DRX – Difração de raios-X
DTA – Análise Térmica Diferencial
FRX – Fluorescência de raios-X
IAP – Índice Atividade Pozolânica
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC - Intervalo de confiança
ICP-EOS - Espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente
IP - Intervalo de previsão
MEV - microscopia eletrônica de varredura
MPa – Mega Pascal
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
OMS – Organização Mundial da Saúde
RC – Resistencia Compressão

RS – Resíduo Sólido
RSI – Resíduos Sólidos Industriais
RSU – Resíduo Sólido Urbano
RSS – Resíduo dos Serviços de Saúde
RP – Resíduo Perigoso
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.
PA – Porosidade Aparente
PGRS Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PF – Perda ao Fogo
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB – Política Nacional de Saneamento Básico
PIB – Produto Interno Bruto
PT – Porosidade Teórica
UFCAT – Universidade Federal de Catalão
UFOB – Universidade Federal do Oeste da Bahia
USP – Universidade de São Paulo
UFU – Universidade Federal de Uberlândia
TUC Clausthal University of Technology
TG – Termogravimetria
TT - Taxas de transferência
PNUMA – Programa Ambiental das Nações Unidas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1 Justificativa	25
1.2 Originalidade	25
2. OBJETIVOS.....	26
2.1 Objetivo geral	26
2.2 Objetivos específicos	26
2.3 Limitações da Pesquisa.....	26
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
3.1 Geração de resíduos	27
3.2 Tratamento dos resíduos perigosos.....	29
3.3 Produção de cimento Portland e geração de CO ₂	30
3.4 Adições minerais e uso de cinzas em matrizes cimentícias.....	32
3.5 Avaliação de Atividade Pozolânica em Materiais	35
3.5.1 Ensaio de Frattini	35
3.5.2 Ensaio de Luxán.....	36
3.5.3 Ensaio de Chapelle Modificado	36
3.5.4 Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento - NBR 5752/2014	36
3.5.5 Atividade Pozolânica por DRX	37
3.5.6 Requisito Material Pozolânico – NBR 12653/2014.....	37
3.6 Técnicas de caracterização de resíduos/materiais	38
3.7 Cinzas de Incineração	40
3.8 Estudo de Lixiviados	43
4. METODOLOGIA	45
4.1 Origem das Cinzas	45
4.2 Etapa 1: Caracterização Física.....	48
4.2.1 Balanço de massa e Composição Gravimétrica	48
4.2.2 Granulometria	48
4.2.3 Distribuição Granulométrica.....	50
4.2.4 Massa Específica, Perda ao Fogo, COT e Modulo de Finura	50
4.3 Etapa 2: Caracterização Química	51
4.3.1 Fluorescência de Raio –X (FRX).....	51

4.3.2 Espectrometria de emissão óptica com plasma (ICP-OES).....	52
4.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS	52
4.3.4 Difração de raios X (DRX)	52
4.3.5 Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	53
4.3.6 Análise Termogravimetria (TGA/DTA)	53
4.4 Etapa 3: Caracterização Ambiental	53
4.5 Etapa 4: Avaliação da Atividade Pozolânica.....	55
4.5.1 Ensaio de Frattini	55
4.5.2 Ensaio de Luxan – Condutividade Elétrica.....	57
4.5.3 IAP NBR 5752/2014.....	57
4.5.4 Avaliação da atividade pozolânica por DRX.....	58
4.6 Etapa 5: Estudos das matrizes cimentícias	59
4.6.1 Proporção das matrizes	60
4.6.2 Produção da argamassa	61
4.6.3 Ensaio para Índice de Consistência (IC)	62
4.6.4 Moldagem dos cps.	63
4.6.5 Resistência a Compressão Axial– RCA.....	64
4.6.6 Ensaio de Porosidade	64
4.6.7 Argamassa com Cinzas Calcinadas (CC) + Filler Calcário (FC)	66
4.6.8 Relação Resistência Compressão X Porosidade Aparente	66
4.6.9 Análise estatística para RC	67
5 RESULTADOS	68
5.1 Avaliação das características físicas.....	68
5.1.1 Balanço de massa	68
5.1.2 Composição Gravimétrica	70
5.1.3 Composição Granulométrica	72
5.1.4 Módulo de finura, massa específica, PF e COT.....	73
5.2 Avaliação das características química	75
5.2.1 Avaliação da FRX.....	75
5.2.2 Avaliação do ICP-OES	76
5.2.3 Avaliação do MEV – EDS	77
5.2.4 Difração de raios X (DRX)	79

5.2.5 Avaliação do FTIR.....	81
5.2.6 Análise Termogravimetria (TGA/DTA)	81
5.3 Avaliação ambiental por meio do extrato lixiviado.....	82
5.4 Avaliação da Atividade Pozolânica.....	88
5.4.1 Ensaio de Fratini	88
5.4.2 Condutividade elétrica (Luxán)	89
5.4.3 Avaliação do IAP – NBR 5752/2014.....	90
5.4.4 Avaliação da atividade pozolânica por pastas	91
5.5 Avaliação das matrizes cimentícias	94
5.5.1 Avaliação do Índice de Consistência	94
5.5.2 Avaliação da resistência a compressão axial – RCA	95
5.5.3 Avaliação da porosidade aparente	97
5.5.4 Relação RC x PA nas argamassas.....	99
5.5.5 Avaliação das argamassas com CC + FC	100
5.5.6 Análise estatística.....	102
6. CONCLUSÕES.....	107
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
REFERÊNCIAS	110

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os resíduos sólidos têm sido um dos temas mais pesquisados e discutidos em diversos eventos científicos das áreas de saneamento, meio ambiente, construção civil e áreas correlatas. No Brasil, a temática vem ganhando significativa importância ao longo do tempo, destacando-se que, no ano de 2010, ocorreu a sanção da Lei nº 12.305 que referente à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e, em 2020, a Lei nº 14.026, que atualiza os aspectos da Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) criados em 2007; ambas as legislações abordam aspectos para a implantação de sistemas de gestão e aproveitamento de resíduos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) juntamente com o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), buscam por meio de normas e resoluções, regulamentar os instrumentos necessários e compatíveis com o resíduo a ser tratado e a forma adequada de descarte. Essas diretrizes apontam destaque especial aos resíduos perigosos (RP) por apresentarem significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade (BRASIL, 2010).

Os tratamentos térmicos a exemplo do plasma, pirólise e incineração são os mais recomendados e usados para tratar Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) e Resíduos Sólidos Industriais (RSI). Na incineração, a temperatura oscila entre 800°C e 1200°C conforme cada tipo de incinerador, o processo tem eficiência para redução de patógenos e de volume em massa atingindo até 90% em algumas situações. Esse tipo de tratamento gera outros resíduos, tais como cinzas de fundo que permanecem no fundo dos equipamentos, e cinzas volantes que são materiais particulados com granulometria menor e coletados pelo sistema de controle de poluição atmosférica.

No Brasil, as cinzas de fundo são, normalmente, classificadas como RP classe I e as cinzas volantes, como classe IIB inertes, de acordo com Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 10004/2004. Os principais contaminantes que podem ser encontrados nas cinzas são os metais pesados (chumbo, cádmio, mercúrio e cromo) e alguns sais que requerem gerenciamento seguro, além de compostos orgânicos clorados. Esses resíduos são, em alguns casos, dispostos em aterros industriais, mas suas características podem exigir cuidados especiais devido a composição dos resíduos incinerado (SILVA e LANGE, 2008).

Devido à “falta de fiscalização”, associado ao gerenciamento inadequado e falta de regulamentação específica no Brasil, a cidade de Santo Amaro da Purificação/BA foi palco de um processo de contaminação em meados de 1970, oriundo pelo uso de resíduos (escória) da extração de chumbo, que foram utilizados pelo poder público e diversos moradores para pavimentação das ruas, construção de casas e em aterramento de pátios de escola e quintais. Esse uso indevido ocasionou várias mortes, e vem ocasionando até os dias atuais, inúmeros problemas de saúde pública, a exemplo de doenças renais, câncer e questões respiratórias em boa parte da população residente no município (ALONSO, 2015). Dessa forma, manejar adequadamente os resíduos, buscando associar estudos acadêmicos ao embasamento legal, pode possibilitar a reinserção e/ou reutilização desses materiais como novos produtos ou em substituição de outros, de forma a mitigar impactos ambientais e com segurança à sociedade.

A alternativa de reuso, vem aumentando e o interesse na incorporação de resíduos, como material que possa ser aplicado em diversas áreas é elevado, destaque para a construção civil e afins. Alguns resíduos oriundos de processos industriais já foram investigados quanto ao seu potencial de uso em concreto e em mistura para asfalto. O desenvolvimento de sistemas eficientes de gestão de resíduos e controle ambiental, tem mudado o foco do interesse de tratamento e descarte para reuso dos materiais (PHUA *et al.*, 2019).

A possibilidade do reaproveitamento das cinzas volantes e cinzas de fundo oriundas da incineração de diversos resíduos, vem sendo cogitada no meio acadêmico, porém, em consequência das variações em suas características químicas, necessitam de estudos específicos e maior conhecimento para reutilização (SILVA e LANGE, 2008). Em países mais desenvolvidos, o tratamento e reaproveitamento dessas cinzas é possível por causa das políticas ambientais nacionais e rigorosos processos de controle ambiental, enquanto em outros países, esses resíduos de cinzas são simplesmente enterrados em aterros sanitários (SUN *et al.*, 2016; HUANG e CHUIEH, 2015; PHUA *et al.*, 2019).

A indústria cimenteira, responde por cerca de 30% da emissão de CO₂ no meio ambiente, principalmente nas fases de extração das matérias-primas, fabricação, transporte, uso, na manutenção e no descarte, além de consumir grande parte dos recursos naturais de fonte não renováveis (TORGAL e JALALI, 2010), tem em sua produção o Cimento Portland composto, obtido através da adição ou substituição do clínquer por materiais pulverulentos, como filler calcário, materiais pozolânicos ou materiais cimentantes. Os materiais capazes de substituir parcialmente o clínquer, são conhecidos classicamente como adições e denominadas

de materiais cimentícios suplementares, sendo os materiais mais usados as escórias de alto forno, as cinzas volantes, o fumo de sílica e as cinzas de casca de arroz (COUTINHO e GONÇALVEZ, 1997; NEVILLE, 2015; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa foi buscar ampliar o conhecimento para esse tipo de resíduo (cinzas de fundo), desenvolvendo estudos para caracterização das cinzas e testar a incorporação/reutilização das cinzas oriundas da incineração de resíduos perigosos em uma possível aplicação em matriz cimentícia. Na metodologia, buscou-se o levantamento do quantitativo produzido de cinzas na indústria, a caracterização físico-químico-mineralógica, o processamento em laboratório, os estudos de lixiviação e dosagem de matrizes cimentícias, culminando com os ensaios físicos e mecânicos. As cinzas de fundo utilizadas foram fornecidas por uma empresa privada do ramo de incineração de resíduos perigosos do estado da Bahia, com geração mensal da ordem de 5,0 t. Os ensaios de caracterização foram realizados nas estruturas dos laboratórios da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), da Universidade Federal de Catalão (UFCAT), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Universidade de São Paulo (USP) – Campus São Carlos e *Clausthal University of Technology* (TUC), na Alemanha.

1.1 Justificativa

Essa pesquisa, aponta para ampliação do conhecimento científico das características químicas-físicas, aspectos ambientais e aplicação sustentável das cinzas de fundo geradas no processo de incineração, tendo como estudo de caso uma incineradora situada no interior da Bahia/Brasil. A origem dos RP advém de 48 municípios e mais de 600 estabelecimentos privados da região, totalizando aproximadamente 1 milhão de habitantes.

1.2 Originalidade

No Brasil, o tratamento por incineração de RP vem ampliando anualmente na última década, esse estudo traz um levantamento detalhado das características das cinzas geradas por uma incineradora, associando uma aplicação ambiental do resíduo junto a matriz cimentícia, potencializando o ciclo de vida do material de forma segura.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Verificar o comportamento da inserção das cinzas oriundas de uma indústria de resíduos perigosos, em substituição parcial do cimento Portland e do agregado miúdo (areia) para uso como argamassa de concreto.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física, química e mineralógico das cinzas de incineração de resíduos perigosos;
- Realizar estudo ambiental de lixiviação de elementos presentes nas cinzas;
- Quantificar o índice de atividade pozolânica das cinzas;
- Realizar estudo da influência das cinzas na propriedade mecânica de resistência a compressão axial para aplicação como argamassa para concreto;
- Avaliação da propriedade de porosidade aparente na argamassa para concreto.

2.3 Limitações da Pesquisa

- Número limitado de indústria sendo avaliada;
- Número limitado de amostragens de resíduos da indústria analisada;
- Dificuldades de acesso a equipamentos e recursos financeiros para testes;
- Realização da pesquisa durante a pandemia ocasionado pelo CORONAVÍRUS – (COVID-19).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é subdividido em tópicos e traz a revisão de literatura, apresentando informações da geração de resíduos em especial de RP, pesquisas implementadas com uso de resíduos, complicações ambientais em aproveitamento de resíduos, métodos para determinar atividade pozolânica e características estudadas em matrizes cimentícias.

3.1 Geração de resíduos

A geração de resíduos no mundo, em quantidade e diversidade, vem avançando cotidianamente a partir dos processos de industrialização e desenvolvimento tecnológico. Conforme levantamento realizado pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (PNUMA), a estimativa aponta um montante de 2,2 bilhões de toneladas de resíduos para o ano de 2025 (PNUMA, 2012). No Brasil, no ano de 2022, estimou-se uma produção anual de quase 82 milhões de toneladas de resíduos, segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022).

Em relação à produção de RP a quantidade de indústrias geradoras e a diversidade de tipos de resíduos acabam dificultando o processo de quantificação de forma efetiva, sendo os resíduos gerados nos serviços de atendimento à saúde, os mais significativos. Zahra *et al.* (2020) destaca que, em virtude da enorme diversidade na gestão de resíduos perigosos, esse é um processo hierárquico, em que no nível superior da hierarquia, deve estar alinhado as políticas governamentais de planejamento e controle da infraestrutura de gestão de resíduos, visando superar as preocupações ambientais relacionadas ao descarte desses, frente a sua potencialidade de produção de impactos relacionados ao meio ambiente.

A ABRELPE traz um panorama entre coleta e processamento de 253 mil toneladas no ano para os RSS no Brasil, indicando uma geração *per capita* de 1,213 kg/ano. A capacidade instalada para tratamento por diferentes tecnologias é superior a 479 mil toneladas no ano, destacando-se a incineração como sendo a tecnologia mais utilizada, com 40,2% desse total. Quanto à destinação, apesar dos inúmeros avanços observados na última década, cerca de 36% dos municípios brasileiros destinaram os seus RSS coletados sem nenhum tratamento prévio, o que contraria as normas vigentes e apresentam riscos diretos aos trabalhadores, à saúde pública e ao meio ambiente (ABRELPE, 2020).

Com o avanço do desenvolvimento social, é quase inevitável os impactos sobre o meio ambiente, sendo o descarte incorreto dos resíduos ou a extração de novos materiais para produção de bens, vem cotidianamente se tornando um dos maiores problemas do mundo contemporâneo. Para Ribeiro e Morelli (2009), a crescente atividade industrial em todo o mundo e falta de programas eficientes de gestão, têm implicado em quantidades crescentes de resíduos gerados sem o correto aproveitamento e destinação, levando a problemas ambientais que comprometem a qualidade de vida da atual e futuras gerações.

No Brasil, os resíduos sólidos são classificados quanto às suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Essa classificação é correspondente a NBR 10004/2004 e envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Os resíduos são classificados em resíduos perigosos (Classe I) e resíduos não perigosos (Classe II), esta se subdivide em: classe IIA (não inertes) que apresente propriedade de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água; e classe IIB (inertes) que submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme orientações da NBR 10005/2004, não ocorra lixiviação dos elementos a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Os dados apontados pela ABRELPE, mostram que os RSS estão entre os principais RP gerados nas cidades brasileiras, sendo as resoluções nº 306/2004 e nº 358/2005 do CONAMA e a resolução 222/2018 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), responsáveis pela classificação e regulamentação de boas práticas no gerenciamento dos RSS, visando possibilidades de reaproveitamento.

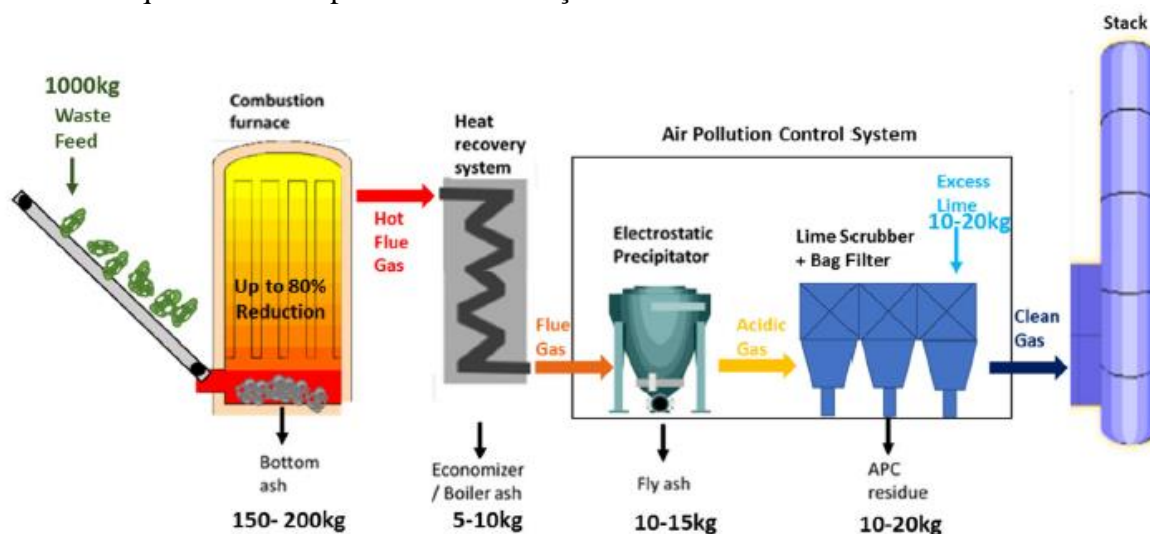
As leis nº 12.305/2010 e nº 14.026/2020, conceituam como rejeito, os resíduos sólidos que depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresente outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada, destacando-se os resíduos gerados em processos industriais na busca da realização do correto tratamento, aproveitamento e destinação final.

3.2 Tratamento dos resíduos perigosos

O uso de tecnologias térmicas (plasma, pirólise e incineração) para tratamento dos RP são difundidas e utilizadas em diversos países, tendo como principal vantagem a redução do volume de resíduos, podendo reduzir em torno de 90% da massa inicial, além de possibilitar o aproveitamento energético pelo processo de cogeração de energia. As principais variáveis que controlam os processos térmicos são: (1) taxa de aquecimento, (2) temperatura, (3) tempo de residência das fases sólida e gasosa e (4) diâmetro da partícula do sólido (PEDROZA, 2011).

Phua *et al.* (2019) destacam que diferentes resíduos, entre eles cinzas de fundo, cinzas de caldeira, cinzas volantes e resíduos atmosféricos são gerados em vários estágios de uma planta de incineração de resíduos sólidos (Figura 1). A *International Ash Working Group* define que cinzas volantes são partículas transportadas da câmara de combustão e removidas da corrente de gás de combustão antes da adição de qualquer tipo de material absorvente (CHANDLER *et al.*, 1997). Quina *et al.* (2008a, 2008b) destacam a importância de classificar as cinzas volantes adequadamente, estes têm diferentes propriedades e o uso inadequado pode causar sérios problemas. Tsutiya *et al.* (2001), expõem que no processo de decomposição os organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos são eliminados; entretanto, pode ocorrer a presença de metais pesados nas cinzas após sua incineração, tornando necessária uma disposição final adequada da mesma.

Figura 1 – Esquema de uma planta de incineração de resíduos.



Fonte: Phua *et al.* (2019).

Historicamente, a tecnologia/técnica de tratamento de resíduos sólidos é uma prática secular, desde que a primeira unidade foi instalada na Inglaterra. Os incineradores sempre foram associados às instalações que emitem forte odor e uma fumaça preta característica que pode ter em sua composição elementos nocivos ao meio ambiente e a saúde pública (PHILIPPI JR; ROMÉRIO; COLLET, 2004). Monteiro *et al.* (2001) afirmam que é viável proceder o tratamento de resíduos industriais visando a sua reutilização ou pelo menos torná-los não perigosos. Entretanto, devido à diversidade, não existe um tratamento preestabelecido, precisando sempre da realização de uma pesquisa e o desenvolvimento de processos economicamente viáveis.

Os processos de solidificação e estabilização, também chamada de encapsulamento e/ou fixação, é utilizada como alternativa de tratamento para resíduos, empregando aditivos para reduzir a mobilidade dos poluentes, de forma a transformá-los em materiais não perigosos ou aceitáveis para as normas de disposição vigentes. Esta tecnologia é barata e fácil de aplicar, entretanto, cada caso particular deve ser analisado cuidadosamente, pois existem muitos exemplos de efeitos adversos que algumas misturas podem produzir em matrizes cimentícias na particularidade da imobilização dos resíduos (MELCHERT, 2012).

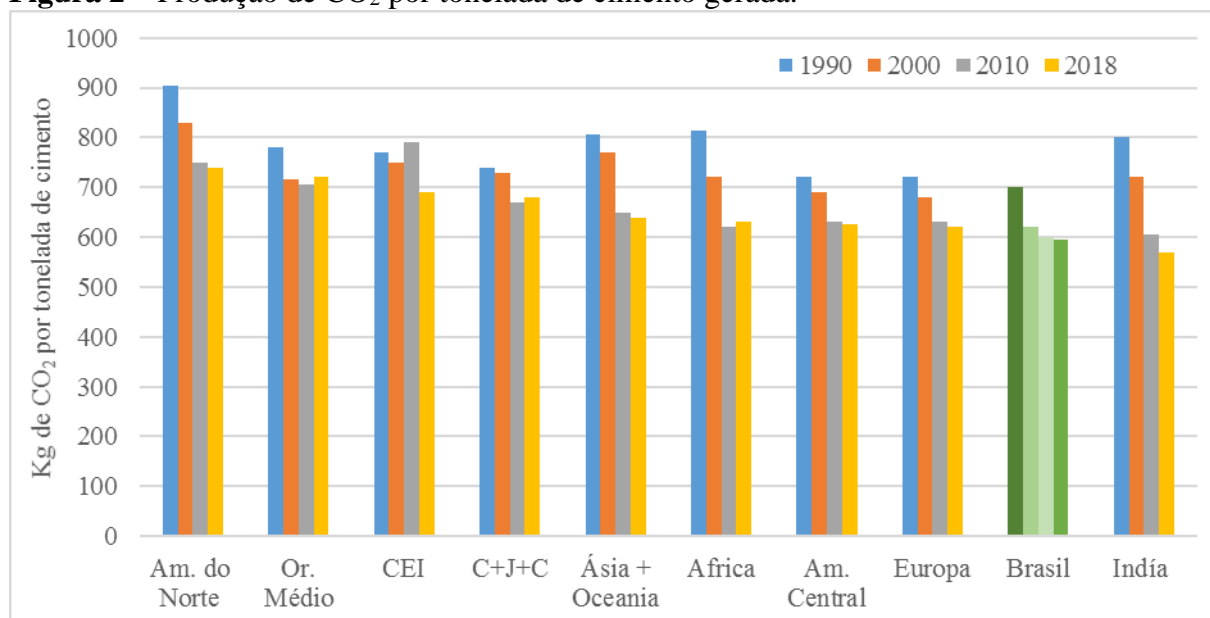
Vale ressaltar que os RSS e industriais comumente incinerados no Brasil, podem ter características substancialmente diferentes daqueles processados na Europa, sendo que lá os resíduos domésticos são submetidos a esse tratamento de incineração de forma conjunta. Essa situação implica na necessidade de caracterizar as cinzas de fundo e as cinzas volantes geradas em território nacional, a fim de se conhecer melhor esse resíduo e, dessa maneira, gerenciá-lo de forma correta, optando-se por um tratamento adequado ou até mesmo pelo seu reuso (SILVA e LANGE, 2008).

3.3 Produção de cimento Portland e geração de CO₂

A produção de cimento no mundo, com suas diversidades de aplicações, vem aumentando de forma significativa, segundo os dados apontados pelos relatórios anuais do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). No ano de 2020, as 91 indústrias situadas no território nacional produziram 61.052 milhões de toneladas de cimento, apresentando um consumo *per capita* da ordem de 286 kg/hab, no ano anterior foi de 261 kg/hab, o que mostra um aumento expressivo de 9,6%, para um período de pandemia mundial (SNIC, 2020). Essa produção ativa, tende a elevar a quantidade de emissões de gás carbônico (CO₂)

expelida pelo setor durante a confecção do cimento. Os dados gerados mostram que em média, são emitidos 634 kg de CO₂/t de cimento produzido mundialmente. No Brasil, entre os anos de 1990 e 2018, o setor conseguiu reduzir 16% suas emissões, saindo de 700 kg de CO₂/t para 590 kg de CO₂/t de cimento produzido. Nesse mesmo período, a produção aumentou em pouco mais de 200% (SNIC, 2020). Na Figura 2, são apresentados dados da quantidade de CO₂ liberado no Brasil e em outros países e regiões no mundo no ano de 2019 pelo *Global Cement and Concrete Association (GCCA)*, apud SNIC (2020).

Figura 2 – Produção de CO₂ por tonelada de cimento gerada.



Fonte: adaptado SNIC (2020).

Nesse sentido, a adição de materiais na produção do clínquer visando a confecção de cimento vem ocorrendo já algum tempo em praticamente todo o mundo. No Brasil, entre 1990 e 2018, o setor conseguiu reduzir a relação clínquer/cimento de 80% para 69%, alcançando o maior teor de uso de adições no mundo (SNIC, 2020). Gobbi (2014), traz que as adições minerais podem ser classificadas em três grandes grupos: o primeiro como materiais cimentantes que não necessitam de hidróxido de cálcio (CaOH₂) para formar produtos cimentantes, como o C-S-H; o segundo como materiais pozolânicos que reagem quimicamente com o CaOH₂, desde que na presença de água, formando compostos com propriedades cimentantes; e o terceiro como *filler*, materiais finamente divididos e sem atividade química, que causam o efeito físico de empacotamento granulométrico.

3.4 Adições minerais e uso de cinzas em matrizes cimentícias

Mehta e Monteiro (2014), atribuem que adições minerais são materiais silicosos finamente moídos que são adicionados em grandes proporções ao concreto, de forma a somar ou substituir parcialmente à massa de cimento Portland, sendo considerados materiais cimentícios suplementares. Gonçalves e Margarido (2012), citam que adições minerais participam da reação de hidratação de forma a produzir mais material ligante, silicatos e/ou aluminatos de cálcio hidratados (CSH e/ou CAH), que conferem maior compacidade à microestrutura e maior resistência mecânica.

Segundo Isaia (2007), a hidratação das adições minerais é lenta e seu produto cimentante não é suficiente para sua aplicação isolada, sendo normalmente, utilizado como adição ou substituição parcial do cimento Portland. Mehta e Monteiro (2014), classificam os aditivos minerais como materiais pozolânicos, cimentantes e materiais tanto cimentantes como pozolânicos.

Segundo a NBR 12653/2014, os materiais pozolânicos podem ter diversas origens, ocorrendo de forma natural, a exemplo da formação vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ou de origem sedimentar, ou artificial, provenientes de tratamentos térmicos ou são subprodutos industriais, também são encontradas as cinzas volantes, que são resíduos finamente divididos resultantes da combustão de carvão mineral.

Freire e Beraldo (2004) e Cordeiro (2006), abordam que materiais pozolânicos possuem sílica amorfa que reage com o hidróxido de cálcio liberado na reação de hidratação do cimento Portland, formando um composto aglomerante, além de aluminatos e sílicoaluminatos. Pádua (2012) aponta divergências entre resultados de diferentes ensaios mecânicos e reológicos para uma mesma amostra evidenciando esta ocorrência. Para Scandiuzzi e Andriolo (1986), o material pozolânico de boa qualidade é aquele que apresenta melhor fixação de hidróxido de cálcio com uma maior velocidade de reação, estando diretamente ligada à finura com que este material se encontra, quanto mais fino maior sua capacidade de reação.

Neville (2015) afirma que percentuais de substituições ou adições suplementares de materiais em matrizes cimentícias, impactam as propriedades dos compósitos em função do tipo e resistência do cimento e/ou material utilizado, modificando características de tempo de hidratação, reatividade, porosidade, resistência mecânica entre outras.

Alguns pesquisadores desenvolveram estudos com utilização de resíduos, para incorporação e/ou substituição parcial em matrizes cimentícias de concretos ou argamassas (GEYER, 2001; MASUERO *et al.*, 2004; VARGAS, 2002; GONÇALVES *et al.*, 2002; SOUZA, 2003; DELLA *et al.*; 2006). A Tabela 1, apresenta a identificação de alguns resíduos que já foram estudados e sua classificação de uso.

Tabela 1 – Uso de resíduos em pesquisas com matrizes cimentícias

Possibilidades de uso	Resíduos
Adição Mineral, Pozolanas e/ou fíler*	sílica ativa; cinza volante de RSU; metacaulim; cinza de cana-de-açúcar; cinza de pó de madeira; cinza de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE); cinza de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA); cinza de casca de arroz; escória de alto forno; escória de aciaria; escória de cobre; escória inoxidável; escória ferro-cromo; escória de fundição; pó de rolagem de ágata; pó de pneu; pó de corte de mármore e granito e pó de aciaria
Agregados	escória de alto forno; escória de aciaria; escória de cobre; escória inoxidável; escória ferro-cromo; escória de fundição resíduo de ágata; resíduo de mármore; resíduo de granito; resíduo da construção e demolição; vidro reciclável; contraforte e pneu
Fibras	contraforte; fibra de bambu; fibra de pet; fibra de coco; fibra de cana-de-açúcar; fibra de sisal e pneu

Fonte: autoria própria.

Percebe-se uma quantidade e diversidade significativa de resíduos já estudados visando a incorporação em matrizes cimentícias, destacando-se sua diversidade de origens: atividades minerais, industriais, processos orgânicos e inorgânicos, resíduos de saneamento, comerciais entre outros, associados a possibilidades de incorporação.

Dal Molin *et al.* (2016) informam que as tentativas de investigações dos resíduos são conduzidas no intuito de identificar, elementos ou compostos (por exemplo, CaO_{livre}, MgO (periclásio), SiO₂, K, Na, Cl, Zn) que, mesmo em menores proporções ou traços, possam vir a impactar de forma negativa nas reações de hidratação do cimento, alterando características físicas, comprometendo a resistência e durabilidade das matrizes. Os autores citam que pode ocorrer também de compostos ou elementos presentes nos resíduos, mesmo que em teores

reduzidos, somados aos constituintes do cimento, totalizarem valores além de um máximo admissível no aglomerante, argamassa ou concreto.

Mangialardi (2001), que usou cinza oriunda da incineração dos RSU, recomenda que a inertização do resíduo seja o tratamento mais viável para esse tipo, com o processo de solidificação/estabilização utilizando como ligante em incorporação a matriz cimentícia. No estudo, é mencionado que o aumento considerável do volume a ser disposto devido à significativa quantidade de cimento a ser utilizado para inertizar o resíduo, pode produzir um efeito adverso nesse processo.

Collivignarelli *et al.* (2002), utilizando cinza volante como agregado em concretos, mencionam que pode ocorrer problemas de expansão e corrosão quando empregadas em matrizes cimentícias sem lavagem e estabilização. Os resultados obtidos com relação à concentração de sais solúveis no resíduo ficaram acima dos limites da norma para agregados naturais. Embora a presença da cinza tenha reduzido o valor de resistência à compressão para todas as misturas quando comparadas à referência, todos os resultados obtidos ficaram acima do valor mínimo (15 MPa) exigido pela norma de agregado natural. Verificou-se também que a mistura produzida com a cinza sem o tratamento de lavagem apresentou valor de resistência à compressão bem inferior e à mesma mistura com o tratamento de lavagem (12,5 MPa e 27,3 MPa), respectivamente.

Devido à presença de uma quantidade substancial de cloro nos resíduos sólidos urbanos, a utilização das cinzas é difícil devido ao acúmulo de cloretos metálicos (Joseph *et al.*, 2018). Apesar das dificuldades, muitos países com restrições de uso de área, enviam esforços para reutilizar cinzas, a partir da combinação de padrões bem desenvolvidos, aplicação forte de regulamentações ambientais e apoio governamental. Os resíduos podem ser reutilizados como matérias-primas secundárias na indústria de cimento, em pavimentação de estradas e correção de solos, e como agente condicionador de lodo (AHMARUZZAMAN, 2010).

De acordo com Cecel (2019), o concreto e argamassa são os compósitos mais consumidos no mundo, tendo a base desses materiais o cimento Portland com papel de ligante entre os agregados e é o responsável principal pela resistência mecânica das estruturas produzidas com uso desse material, em função da sua atividade pozolânica.

3.5 Avaliação de Atividade Pozolânica em Materiais

DONATELLO *et al.*, (2010), mencionam que os métodos para avaliação da atividade pozolânica (AP) podem ser descritos como diretos, avaliando a variação do teor de Ca(OH)₂ com o tempo, e métodos indiretos, que medem propriedades físicas e mecânicas do material pozolânico ou de compostos produzidos com esse material. O ensaio de Frattini normatizado pela NBR 5753/2016, Chapelle Modificado normatizado pela NBR 15895/2010 e o ensaio de Luxan estão entre os métodos diretos para avaliação da AP. A NBR 5752/2014 traz a avaliação do Índice Atividade Pozolânica (IAP) pela mensuração da resistência mecânica, teste de resistividade elétrica e análises termogravimetria são exemplos de métodos indiretos. No Brasil a NBR 12653/2014, traz os requisitos para classificação dos materiais testados como pozolânico.

3.5.1 Ensaio de Frattini

O ensaio de Frattini, permite monitorar a capacidade de fixação do hidróxido de cálcio pelas pozolanas, em que a pozolanicidade é estimada pela quantidade de óxido de cálcio (CaO) capaz de saturar uma solução de mesma alcalinidade, no sistema hidratado envolvendo cimento Portland (sem adição de pozolana) e percentual de material pozolânico a ser estudado, no período de 8 dias após a mistura ou 15 dias caso haja necessidade.

Zampiere (1989), destaca que esse método parte do princípio de que na solução que banha intimamente uma pasta de cimento hidratado, praticamente só se dissolvem a cal de hidrólise e os hidróxidos alcalinos derivados da hidratação das fases do cimento. Com isso, as soluções que banham os cimentos Portland comuns são fortemente saturadas em Ca(OH)₂, enquanto aquelas obtidas com cimento Portland pozolânico exibem, em decorrência da fixação da CaO pela pozolana, exibindo uma concentração de Ca(OH)₂ tipicamente inferior ao limite de saturação.

No Brasil, a NBR 5753/2016 determina as orientações para condução do experimento. Para que o material supostamente pozolânico seja considerado reativo e satisfatória a sua adição ao cimento Portland, a solução obtida não deve estar saturada de hidróxido de cálcio, indicando que a mesma reagiu com o material pozolânico (DONATELLO *et al.*, 2010).

3.5.2 Ensaio de Luxán

Luxan *et al.* (1989), elaboraram um método de avaliação da AP através da condutividade elétrica em soluções de hidróxido de cálcio. Esse ensaio parte do princípio de que a reação pozolânica entre o material e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 ou CH) promove um decréscimo da condutividade, pois a quantidade de íons Ca^+ e $(\text{OH})^-$ na solução diminui. Quando a reação pozolânica ocorre, a adição consome os íons Ca^+ e $(\text{OH})^-$ da solução e formam C-S-H. O método proposto por Luxan avalia a atividade pozolânica de um material através da variação da condutividade elétrica em uma solução de cal saturada.

A Tabela 2, apresenta a classificação do material em função da variação de condutividade pelo método proposto.

Tabela 2 – Classificação pozolanicidade proposto pelo método Luxan *et al.* (1989).

Classificação do Material	Varição da Condutividade (ΔC) Δ mS/cm
Sem atividade pozolânica	< 0,4
Atividade pozolânica moderada	0,4 a 1,2
Boa atividade pozolânica	> 1,2

Fonte: Adaptado de Luxan et al. (1989).

3.5.3 Ensaio de Chapelle Modificado

O ensaio Chapelle Modificado estabelecido pela NBR 15895/2010 é um método direto que avalia a capacidade do material de fixar hidróxido de cálcio, avaliando pozolanas naturais, pozolanas artificiais, argilas calcinadas, cinzas volantes, sílica ativa e metacaulim. O resultado é expresso pela quantidade de CaO consumido ou fixado por grama de material pozolânico, sendo o material considerado pozolânico se o resultado estiver acima do valor mínimo de 330 mg de CaO por grama da amostra pozolana. Raverdy *et al.* (1980), afirmam que o ensaio indica o potencial de reatividade do material, podendo ser considerado como ligante ao cimento Portland e usado em substituição parcial.

3.5.4 Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento - NBR 5752/2014

Este ensaio é um método indireto para avaliar a AP de um material. De acordo com a norma, este índice é determinado produzindo-se dois traços diferentes de argamassa, sendo o primeiro (referência), produzido na proporção de 1:3 entre cimento e areia normal; no

segundo (parcial) a proporção utilizada é a mesma para cimento e areia normal, diferindo apenas na substituição de 25% de cimento pelo material pozolânico a ser avaliado.

Em função da possível diferença de massas específicas, deve-se ter o cuidado de ajuste em função do volume equivalente do material no traço parcial. Os corpos de provas (cps) produzidos devem ser mantidos em cura úmida e rompidos por compressão aos 28 dias, sendo o IAP obtido pela relação percentual da resistência dos cps parcial pelo controle (referência).

3.5.5 Atividade Pozolânica por DRX

A identificação da AP pelo ensaio de DRX, consiste em identificar qualitativamente as fases minerais presentes nas amostras, utilizando o fenômeno de espalhamento da radiação eletromagnética provocada pela interação entre os raios X e os elétrons dos átomos constituintes do material (CINCOTTO e COSTA, 2007, GÓES, 2016).

Nita e John (2007) e Hoppe Filho (2008) evidenciam que a DRX identifica as fases cristalinas presentes em um material, desde que se conheça a composição química aproximada. Ao comparar o padrão difratométrico obtido da amostra ensaiada com as fichas cristalográficas de referência, pode-se afirmar a presença desse composto. Essa técnica permite ainda identificar a presença de material amorfo presente na amostra, o que pode influenciar a reatividade de uma pozolana.

Nita e John (2007) destacam ainda que para medir o efeito das pozolanas no consumo de hidróxido de cálcio, deve-se observar a evolução da intensidade dos picos da portlandita, nos produtos de hidratação do cimento. Os principais picos para o ângulo 2θ no difratograma são os ângulos $18,089^\circ$, $34,089^\circ$, $47,124^\circ$ e $50,795^\circ$ (LEA, 1971 *apud* NITA E JOHN, 2007).

3.5.6 Requisito Material Pozolânico – NBR 12653/2014

A NBR 12653/2014 complementa os ensaios de AP no Brasil, trazendo os requisitos para avaliação do material pozolânico quanto as características mecânicas, físicas e química, conforme observados na Tabela 3. A referida norma classifica os materiais em: classe N – pozolanas naturais e artificiais; classe C – cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas e classe E – qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Tabela 3- Exigências químicas e físicas segundo NBR 12653/2014

Propriedade	Classe de Material Pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ em %	≥70	≥70	≥50
SO ₃ em %	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade em %	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo em %	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O em %	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5
Material retido na peneira 45µm em %	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle em %	≥90	≥90	≥90
Índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias, em MPa.	≥6	≥6	≥6

Fonte: NBR 12653/2014 (adaptado)

Mehta e Monteiro (2014) questionam a classificação adotada pela norma, por entenderem que a norma desconsidera que parte do percentual presente nos materiais analisados pode estar na forma amorfa e não apresentar atividade pozolânica direta. Entretanto podem ter propriedades cimentantes e teores de óxido de cálcio que podem trazer melhorias a matriz cimentícia.

3.6 Técnicas de caracterização de resíduos/materiais

Segundo Dal Molin *et al.* (2016) e Donatello (2010), os ensaios mais utilizados para a caracterização do resíduo são as análises por FRX e DRX, visando a identificação dos elementos presentes e a mineralogia da fração cristalizada, respectivamente. Entretanto, análises químicas específicas e análises mais complexas podem vir a ser importantes para o conhecimento do resíduo e de fenômenos envolvidos, como por exemplo, início de pega e endurecimento de uma matriz cimentícia.

As técnicas como a espectrofotometria por absorção atômica (AAS), análises térmicas (TG/DTA), análise petrográfica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), no modo elétrons secundários ou retroespalhados, que podem ser usados em conjunto em EDS ou WDs, análise granulométrica a laser, superfície específica por adsorção de nitrogênio (BET) e porosimetria por

intrusão de mercúrio, são técnicas complementares e que devem ser usadas de forma associativa. Na Tabela 4, são apresentadas as composições químicas de alguns dos resíduos já pesquisados, representando por faixas encontradas, vale ressaltar que pode existir uma variabilidade em função da origem e do tempo do resíduo.

Tabela 4 – Composição química de alguns resíduos pesquisados.

Óxidos (%)	Resíduos						
	Sílica ativa (1,2)	Cinza de casca de arroz (3,4)	Escória aciaria (5,6)	Escória de cobre (7)	Corte granito e mármore (8,9)	Resíduo de ágata (10,11)	Cinza de bagaço de cana (12,13)
SiO ₂	95,10 - 96,00	72,10 - 90,98	16,08 - 16,47	26,00	59,62 - 68,88	90,87 - 97,06	77,30 - 83,70
Al ₂ O ₃	0,06 - 0,09	0,10 - 0,30	5,76 - 7,22	3,3	12,77 - 15,98	1,46 - 1,85	5,40
Fe ₂ O ₃	0,04 - 0,10	0,09 - 0,15	30,36 - 31,02	55,00	3,59 - 9,49	0,07 - 3,92	6,537 - 8,10
CaO	0,17 - 0,24	0,31 - 0,43	29,81 - 37,78	2,00	1,54 - 4,83	0,137 - 1,19	1,18 - 1,6
MgO	<0,44	0,37 - 0,70	4,81 - 7,18	2,70	1,96	-	1,4
TiO ₂	0,01	0,01 - 0,05	0,43	0,5	-	0,26	1,16 - 2,2
Na ₂ O	0,22 - 0,51	0,02 - 0,05	<0,06	1,10	2,42 - 2,72	0,141	-
K ₂ O	0,49 - 0,93	0,72 - 2,11	0,02	0,6	4,82 - 5,3	0,140	4 - 6,5
SO ₃	-	-	0,24 - 0,34	-	0,03	0,038 - 0,29	0,68
P ₂ O ₅	-	0,50 - 0,60	0,46 - 0,76	-	-	-	-
CaO (livre)	-	-	0,24 - 0,97	-	-	-	-
MnO	-	0,22	3,14	0,10	-	0,10	0,081
Fe ₃ O ₄	-	-	-	7,00	-	-	-
CuO	-	-	-	1,40	-	-	-
ZnO	-	-	-	1,00	-	0,05	0,037
C (total)	0,63	-	-	-	-	-	-

Fonte: adaptado de (1) Barata, 1998; (2) Hoffmann, 2001; (3) Martinez *et al.*, 2009; (4) Della *et al.*, 2006; (5) Masuero, 2004; (6) Polese *et al.*, 2006; (7) Moura, 2000; (8) Neves *et al.*, 1999; (9) Goncalves, 2000; (10) Chiaro *et al.*, 2013; (11) Petry, 2015; (12) De Paula *et al.*, 2009; (13) Zardo *et al.*, 2004

Hoppe Filho *et al.*, (2017) apontam que devido à grande variabilidade das características físico-químicas desses materiais e pela própria complexidade inerente à atividade pozolânica, existe uma grande dificuldade de padronização de metodologias para classificar e hierarquizar materiais pozolânicos.

Donatello (2010) apresenta uma ampla gama de métodos para avaliar a atividade pozolânica, sendo estes classificados como diretos e indiretos. Os métodos diretos monitoram a presença da portlandita e a sua subsequente redução ao longo do tempo devido à atividade pozolânica, empregando medidas por DRX, análise termogravimétrica (TG) ou métodos químicos. Os métodos indiretos quantificam uma propriedade física que indica a extensão da atividade pozolânica, como por exemplo, resistência à compressão, calorimetria ou condutividade elétrica.

Os resultados dos métodos indiretos são geralmente validados pelos métodos diretos, confirmando a atividade pozolânica (DONATELLO, 2010). Segundo os autores Zampiere (1989), Donatello (2010), Hoppe Filho *et al.* (2017), o método Chapelle modificado, o ensaio Fratini, e a análise da evolução dos produtos hidratados por DRX e TG são os métodos diretos mais comumente empregados para medir a atividade pozolânica. Já como método indireto, o mais usual é acompanhar a evolução da resistência mecânica ao longo do tempo.

Ao buscar conhecer um resíduo, Phua *et al.* (2019), trazem que conhecer as fases minerais é extremamente importante. A análise dessas fases, ocorre com o uso do equipamento de DRX, mensurando a intensidade de diferentes picos de cristal de cada composto exclusivo para estimar montantes dentro da amostra. No entanto, em cinzas de incineração de resíduos, essa contém muitas fases diferentes, o que pode causar sobreposição e dificuldades na identificação. Este problema é geralmente superado pelo uso de programas de software para simplificar o processo de correspondência (TIAN *et al.* 2018). Devido à natureza das cinzas de incineração, o DRX fornece apenas informações sobre os diferentes tipos de minerais encontrados sem quantificação adequada, tendo os principais minerais como aluminossilicatos de cálcio, SiO₂ e outros compostos metálicos mais complexos. Nesse sentido, se faz necessário a composição de técnicas, como FRX, MEV-EDS, ICP-EOS, entre outras, para melhor entendimento do resíduo estudado.

3.7 Cinzas de Incineração

Em geral, inúmeros autores, Zhang *et al.* (2012), Dembovska *et al.*, (2017), Shi *et al.* (2018), Siddique e Mehta (2020), entre outros, vêm apontando a utilização de cinzas industriais diversas e agregados minerais em matizes cimentícias. Tal fato é crescente e pode ser expresso pelo elevado número de trabalhos que investigam o uso de outros subprodutos industriais potencialmente cimentantes, proporcionado cada vez mais possibilidades de

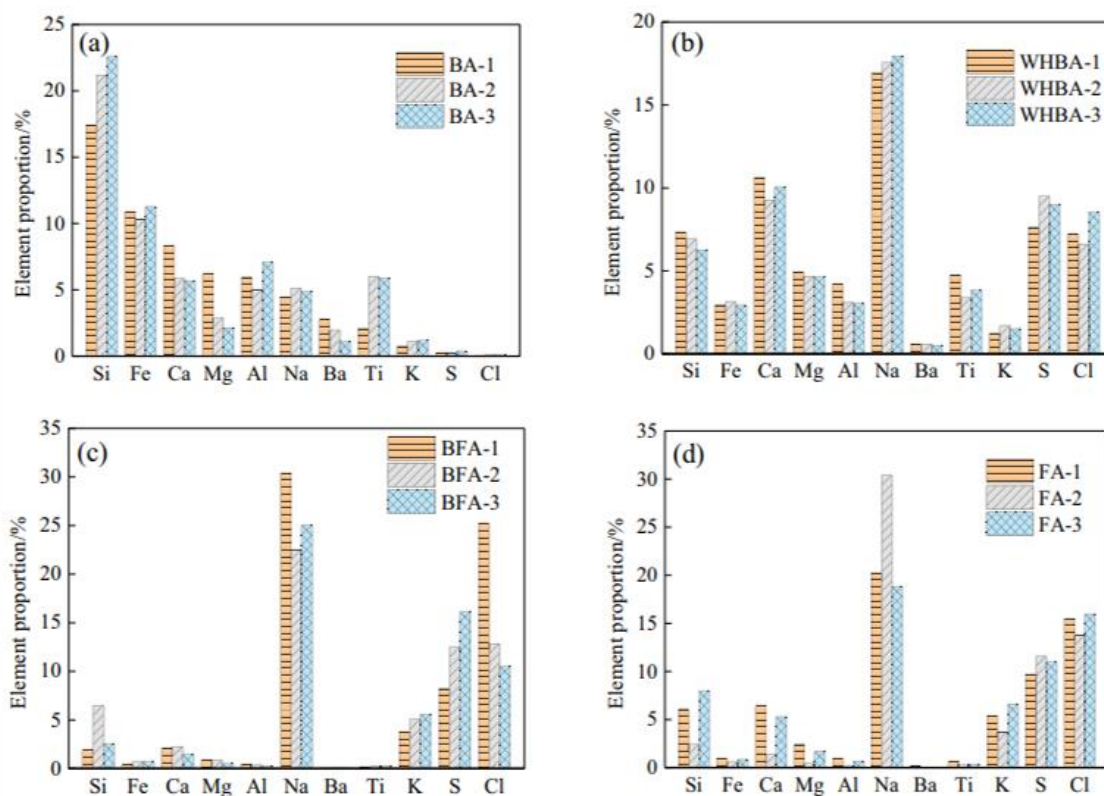
incorporação dos resíduos. Esse estudo será composto pela incorporação de cinzas oriundas de incineração de resíduos perigosos e *filler* calcário.

Segundo Liu *et al.* (2022), com o rápido desenvolvimento da urbanização e industrialização na China, cada vez mais resíduos perigosos são produzidos, os dados mostram que a quantidade de resíduos na China aumentou de 34,7 milhões de toneladas em 2012 para 69,4 milhões toneladas em 2017 (*National Bureau of Statistics of China*, 2018) e esse valor foi razoavelmente previsto para mais de 100 milhões desde a pandemia de COVID-19 em 2019 (Prata *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, (2021).

Para Dempsey e Oppelt, (1993), Jiang *et al.*, (2019) e Yang *et al.*, (2021), a incineração tornou-se a tecnologia mais promissora para resíduos orgânicos perigosos, com suas excelentes vantagens na redução de resíduos, desintoxicação, recuperação de energia, bem como na economia de recursos terrestres causados por aterro convencional. Vale ressaltar que a incineração de resíduos perigosos, podem produzir cinzas (pesadas ou volantes) que são definidas como resíduos perigosos devido às concentrações dos elementos em especiais de metais pesados, dioxinas e outras substâncias nocivas com forte capacidade de migração e disponibilidade biológica.

Liu *et al.* (2022), analisaram quatro tipos de materiais: cinzas de fundo (BA-1, BA-2, BA-3), cinzas de caldeira de calor residual (WHBA-1, WHBA-2, WHBA-3), cinzas de filtro de mangas (BFA-1, BFA-2, BFA-3) e cinzas volantes (FA-1, FA-2, FA3), todas oriundas da incineração de resíduos perigosos, destacam em seus resultados (Figura 3) que as cinzas possuem composições de elementos diferentes. Eles acharam, que as cinzas de fundo são compostas principalmente de Si, Fe, Ca e Mg, enquanto nas cinzas de caldeira destacam-se os elementos Al, Na, Ca, S, Cl e Si, por fim a grande maioria dos elementos em cinzas de filtro de mangas e cinzas volantes são Na, K, S e Cl.

Figura 3 – Principais elementos nas cinzas de RP: (a) BA, (b) WHBA, (c) BFA e (d) FA.



Fonte: Liu *et al.* (2022).

Li *et al.* (2018) expõem que existem composições minerais das cinzas em diferentes amostras e pontos, sendo que nas cinzas de fundo encontram-se os óxidos (SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO) e silicatos como os principais minerais, embora com grandes variações na quantidade, causadas principalmente pela incineração de resíduos de origem mista. Nas cinzas de caldeiras, os compostos (NaCl e Na_2SO_4) são os destaques. Com a injeção de NaHCO_3 , para adsorver gases ácidos o NaCl , Na_2SO_4 e KHCO_3 são os principais compostos presentes em cinzas dos filtros de mangas. Devido à mistura de várias posições no incinerador, as cinzas volantes possuem como principais compostos NaCl , Na_2SO_4 , KHCO_3 e CaSO_4 .

Para Schmidt (1995), Koch e Krammer (2008) e Saleem *et al* (2012), a utilização dos filtros de mangas está entre a tecnologia seca mais eficiente para remoção de partículas implementadas em linhas de tratamento de gases de combustão. As unidades de filtro de mangas são geralmente constituídas por várias mangas cilíndricas para remoção das partículas é filtração de gases, destacando-se eficiência em partículas maiores que $0,2 \mu\text{m}$ de diâmetro, mas nenhum se concentrou na faixa de partículas manométricas.

Liu *et al.* (2022), apontam que em geral, as principais composições minerais das cinzas de resíduos de incineração de perigosos não mudam muito durante os dias de amostragem. No entanto, significativas diferenças são observadas entre os diferentes pontos de amostragem, a exemplo de cinzas de fundo, cinzas volantes e cinzas retidas em filtros e de lavagem de gases.

3.8 Estudo de Lixiviados

O lixiviado é o líquido criado quando os resíduos se decompõem em um aterro sanitário ou pelo processo de contato do resíduo com a água. Este líquido tem potencial poluidor elevado e pode potencialmente danificar o solo, as águas subterrâneas e os cursos de água (HE *et al.* 2017).

O processo de incineração de resíduos produz cinzas volantes e cinzas residuais, reduzindo quaisquer efeitos nocivos sobre o meio ambiente e para a sociedade. Entretanto, alguns elementos e possíveis metais pesados, podem ser encontrados nas cinzas dos resíduos do incinerador, enfrentando um problema de contaminação secundária que deve ser tratado (ABABNEH *et al.* 2020).

Alguns métodos visando a remediação abordam o processo de imobilização. Uma dessas alternativas promissoras é a estabilização/solidificação do material em estudo. Para a aplicação dessa ferramenta, a tecnologia utiliza aglutinantes e aditivos com objetivo de reduzir a mobilidade e a toxicidade de contaminantes contidos nos resíduos e gerar um produto final sólido e inerte que pode ser reutilizado ou depositado em aterros sanitários de forma segura (HUNCE *et al.* 2012).

A NBR 10005/2004, aponta a necessidade dos estudos em relação a concentração de elementos-traço nos lixiviados, destacando-se: Al, Sb, Ar, Ca, Pb, Cu, Co, Cr, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Se e Zi. Tsutiya (1999), aponta que alguns elementos são encontrados naturalmente no solo em concentrações inferiores àquelas consideradas como tóxicas para diferentes organismos vivos. Entre os elementos-traços, o Sb, Co, Cr, Cu, Se e Zi são essenciais para alguns organismos vivos.

Zuliani *et al.* (2002), destacam que a ocorrência ou não da contaminação por lixiviados, depende largamente das características dos materiais processados e dos resíduos gerados. Eles citam que grandes e médias indústrias, normalmente dispõem de seus próprios sistemas de tratamento e descarte, facilitando o controle dos órgãos ambientais. Por outro

lado, locais públicos de disposições, a exemplo dos “lixões” são fonte de contaminação sem o devido controle, recebendo uma diversidade de resíduos domésticos e predominando ausência dos necessários sistemas de controle e tratamento, impactando negativamente o solo, águas subterrâneas e o ar.

Segundo Chavés *et al.* (2011), existem diversos modelos de gestão ambiental que permitem descrever ou representar um sistema ambiental impactado por eventos de contaminação. Nesses modelos é possível identificar as fontes de contaminação; os mecanismos de liberação e transporte de contaminantes; as rotas e vias de exposição; e a presença de população humana e seres vivos exposta a diversidade de contaminantes, principalmente presentes nas águas.

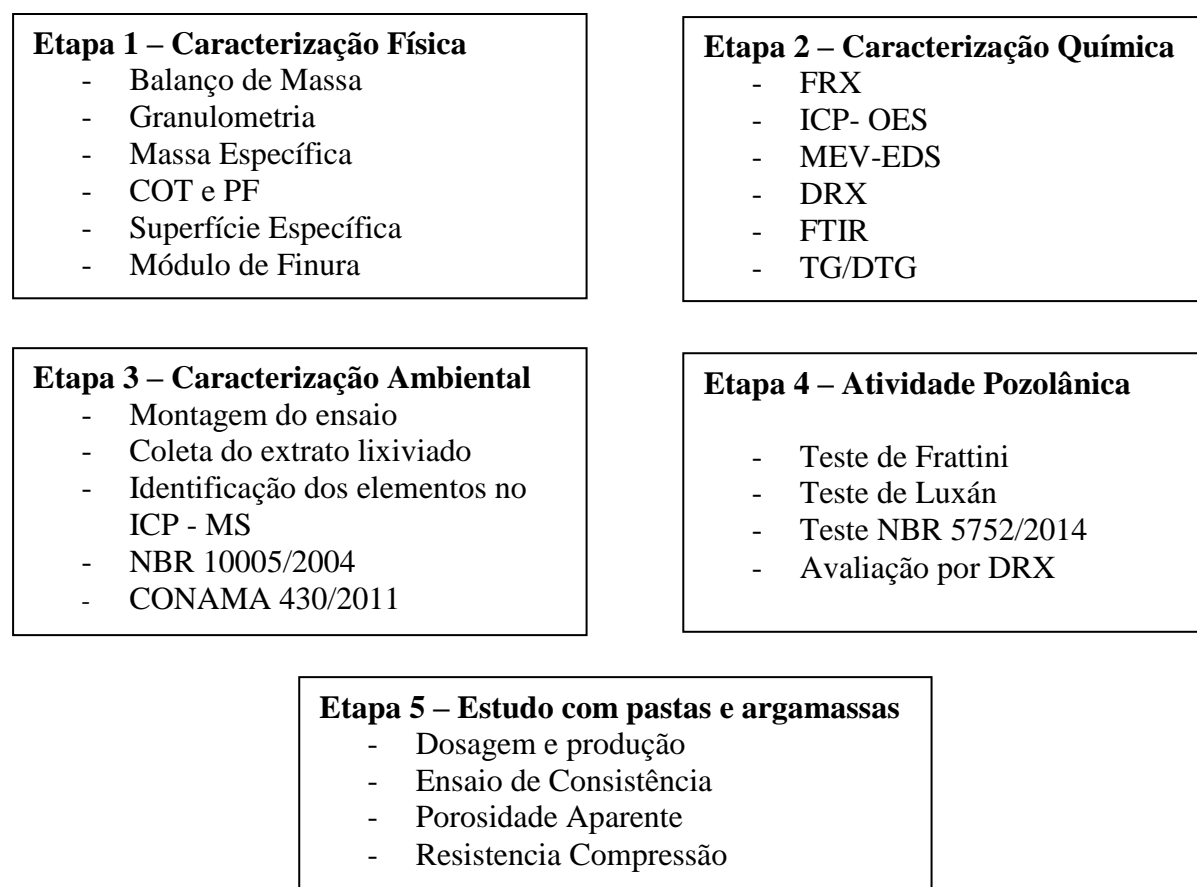
No Brasil, a resolução CONAMA 430/2011 é a principal legislação nacional que destaca as características dos efluentes de qualquer fonte poluidora para serem lançados diretamente em corpo receptores e no solo, destacando parâmetros inorgânicos e orgânicos a exemplo dos elementos traços Cd, Pb, Cr, Fe, Ag, Zi entre outros.

4. METODOLOGIA

Com o propósito de buscar atingir os objetivos dessa pesquisa, desenvolveu-se uma metodologia experimental, associando materiais e métodos que possibilitassem a caracterização das propriedades físicas, químicas e mineralógicas das cinzas estudadas, avaliação de risco ambiental, identificação de atividade pozolânica no material e observação de propriedades frente a pastas e argamassa para concreto.

A Figura 4, apresenta um fluxograma sintetizado das 5 etapas desenvolvidas bem com suas atividades e ensaios implementados.

Figura 4 – Fluxograma do programa experimental.



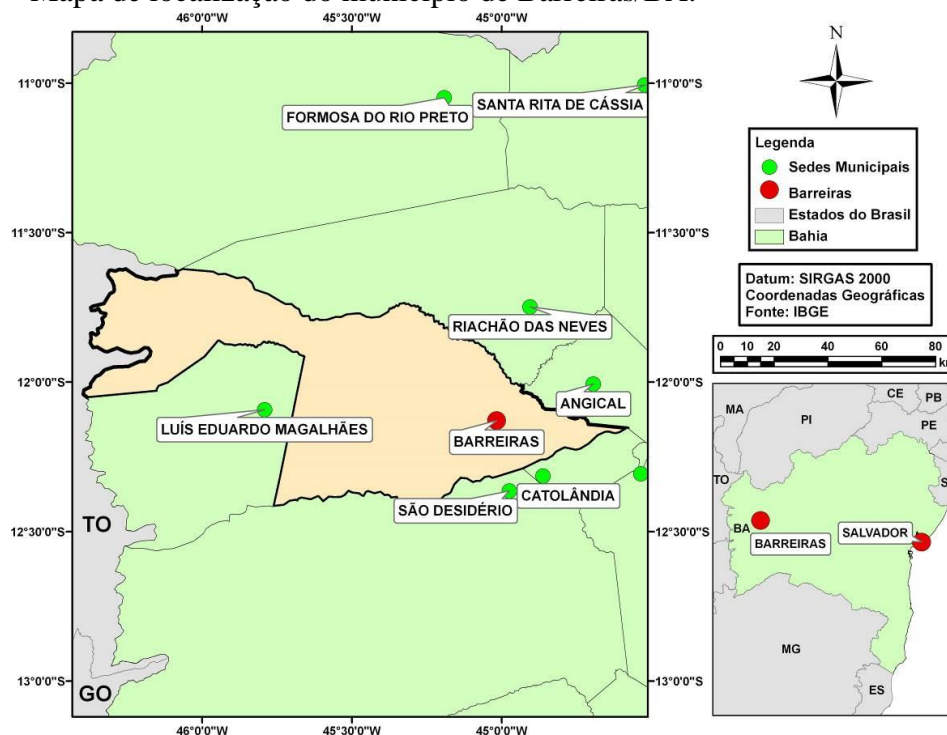
Fonte: autoria própria.

4.1 Origem das Cinzas

O estudo foi desenvolvido com resíduos provenientes de uma indústria de incineração de resíduos perigosos (cinzas de fundo), localizada no município de Barreiras/BA (Figura 5),

situada na região oeste da Bahia, distante 873 km da capital do estado, e com uma população estimada de 158.432 habitantes (IBGE, 2021), sendo a maior cidade da região e uma das dez maiores cidades do estado no contexto econômico, principalmente pelos processos agroindustriais e prestação de serviços diversos na área da saúde e agroindustrial.

Figura 5 – Mapa de localização do município de Barreiras/BA.



Fonte: autoria própria.

A indústria fornecedora das cinzas vem atuando desde 2015 na região, desenvolvendo os serviços de coleta, transporte, tratamento e destinação final de resíduos perigosos, atendendo 48 municípios (totalizando uma população superior a um milhão de habitantes atendidos), soma-se ainda aproximadamente 600 estabelecimentos comerciais da iniciativa privada, entre os quais destacam-se: hospitais, clínicas médicas, drogarias, indústrias diversas e atividades relacionadas ao sistema agrossilvopastoris.

A indústria tem permissão para incinerar até 500 toneladas de resíduos por ano. O equipamento utilizado, é um forno incinerador (Figura 6), marca ENGEAPLIC, modelo IEN - 50 CCH.AC-LG, capacidade de 50 kg/h, podendo atingir até 1200°C, possui câmara primária e secundária de combustão, sistema de limpeza de gases com filtros e chaminé para gases. O processo de incineração ocorre com temperatura oscilando entre 800 e 900 °C, considerada

como queima incompleta. Quando necessário utiliza-se gás GLP para manutenção da temperatura interna na câmara de combustão, essa situação ocorre quando o resíduo incinerado não consegue manter a temperatura necessária estabelecida no regime de trabalho. Atualmente, são tratadas aproximadamente 17 toneladas/mês de RP recebidos.

Figura 6 – Visão da indústria e do incinerador utilizado.



Fonte: autoria própria.

As coletas das amostras de cinzas pesadas (CP) ocorreram diariamente durante 30 dias consecutivos de funcionamento da indústria, nos meses de setembro e outubro de 2020 (Figura 7) conforme as recomendações da NBR 10.007/2004, totalizando aproximadamente 90 kg de material. Esse tempo de coleta estendido objetivou a formação de uma amostra representativa dos resíduos recebidos e passíveis de incineração pela indústria. Inicialmente o material foi peneirado com uma peneira de abertura 2,79 mm para retirada do material grosseiro, a exemplo de vidros e objetos metálicos pontiagudos e cortantes que permanece após a incineração, posteriormente armazenou-se em sacos e baldes plásticos, sendo transportados para os laboratórios da UFOB.

Figura 7– Coleta de amostra na incineradora. (a) armazenamento e (b) cinza pesadas



Fonte: autoria própria.

4.2 Etapa 1: Caracterização Física

A seguir são descritas os materiais e métodos para cada ensaio implementado nessa etapa.

4.2.1 Balanço de massa e Composição Gravimétrica

Com base nas informações contidas no Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) e relatórios semestrais da indústria, realizou-se a tipificação dos resíduos recebidos e gerados no período de 36 meses de funcionamento da indústria, sendo esses classificados por classe conforme NBR 10004/2004.

4.2.2 Granulometria

Após esse processo de conhecimento preliminar da gestão de resíduos da indústria e da composição dos resíduos e das cinzas geradas no processo da indústria, buscou-se desenvolver o estudo com dois tipos diferentes de cinzas (Figura 8), sendo as cinzas pesadas (CP) – material oriundo da coleta diretamente da indústria no dia seguinte a incineração com resfriamento natural de 24h; e cinzas calcinadas (CC) – material obtido em laboratório através do processo de calcinação em forno mufla, com rampa de aquecimento de 10 °C por minuto, até atingir 1000 °C e permanência pelo período de 1h, com posterior resfriamento natural.

Figura 8 – Calcinação das cinzas coletadas: (a) cinza pesada; (b) cinza calcinada.



Fonte: autoria própria.

Para determinar a granulometria das CP e CC, seguiu-se os procedimentos da NBR 7181/2016, utilizando o conjunto de peneiras da série normal correspondente a 2,36 mm (#8); 1,18 mm (#16); 0,6 mm (#30); 0,3 mm (#50); 0,15 mm (#100) e 0,075 mm (#200) e uso de agitador mecânico com intervalo de tempo de 10 minutos, posteriormente ocorreu a pesagem de cada fração em balança digital com dois dígitos. Na Figura 9 é apresentado a preparação do material.

Figura 9 – Preparação das amostras:(a) separação das cinzas e (b) agitador mecânico.



Fonte: autoria própria.

4.2.3 Distribuição Granulométrica

As distribuições dos tamanhos das partículas das frações finas foram medidas com difração a laser em suspensão usando o equipamento Sympatec Helos/KR (Sympatec GmbH) e com Quixel dispersor (Sympatec GmbH), (Figura 10), ambos na *Technical University of Clausthal* (TUC), localizados na cidade de Clausthal-Zellerfeld, na Alemanha. Determinou-se os diâmetros D_{10} , D_{16} , D_{50} , D_{84} , D_{90} , D_{99} , valor médio das partículas e área superficial.

Figura 10 – Equipamento de leitura de difração a laser Sympatec Helos/KR



Fonte: Sympatec (2023)

4.2.4 Massa Específica, Perda ao Fogo, COT e Modulo de Finura

Para determinação da massa específica das cinzas, utilizou-se um picnômetro a gás hélio da *Micromeritics AccuPyc II 1340* da UFU, em que essa propriedade expressa a relação entre a massa do material seco e o seu volume, incluindo os poros impermeáveis, extremamente importante para auxiliar a dosagem e a estimativa de consumo dos materiais na dosagem dos traços.

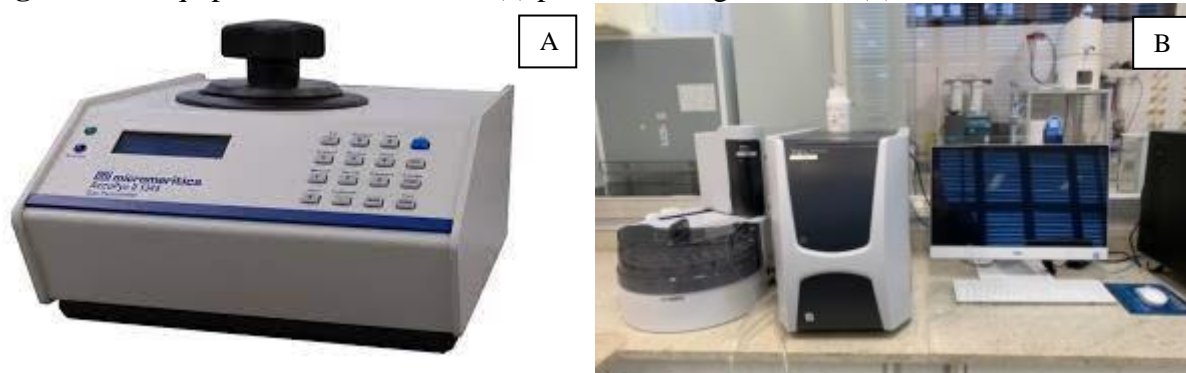
O ensaio de perda ao fogo (PF) foi realizado em amostras triplicadas em forno mufla a temperatura de 1020°C, conforme recomendação da ABNT NBR NM 18/2012, para ambas as cinzas, sendo realizado na TUC Alemanha.

Para determinação do Carbono Orgânico Total (COT), utilizou-se o analisador de COT da marca Shimadzu, modelo TOC-LCPN com injetor automático ASI-L na USP de São Carlos, sendo realizado em triplicata para cada amostra, determinando o valor médio.

O modulo de finura foi calculado conforme estabelecida pela NBR 7211/2009, somando-se as porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. A zona ótima para esse aspecto é na faixa de 2,20 a 2,90.

A figura 11, apresenta equipamentos utilizados nesses ensaios.

Figura 11 – Equipamento nos ensaios: (a) picnometro a gás hélio e (b) analisador de COT.



Fonte: Micromeritics (2023) e IQSC – USP (2021)

4.3 Etapa 2: Caracterização Química

Nessa etapa da pesquisa, utilizou-se de técnicas conhecidas e disponíveis no meio científico, de forma a buscar ampliar o conhecimento do material analisado.

4.3.1 Fluorescência de Raio –X (FRX)

Os óxidos majoritários presentes nas amostras foram determinados por FRX no equipamento modelo MiniPaI4, da PANalytical na USP São Carlos/SP. As análises obtidas pela técnica de FRX sem considerar a perda ao fogo, são denominados como resultados parciais, pois o equipamento utilizado não mede os elementos C, H e O. Esses percentuais dos elementos mensuráveis são quantificados. Porém, em geral é expresso na forma de óxido correspondente, calculado por estequiometria.

Para realizar a correção dos valores obtidos sem PF de cada amostra, visando a identificação correta dos teores dos óxidos/elementos presentes nas amostras, faz se necessário o cálculo levando em consideração o valor de PF obtido. Essa correção é realizada

utilizando a equação 1, levando em consideração os percentuais de cada óxido/elemento encontrado no FRX, conforme mencionado por (SILVA, 2015).

$$\% \text{ FRX (com PF)} = \frac{\% \text{ FRX (sem PF)} \times (100 - \text{PF da amostra})}{100} \quad \text{Equação 1}$$

4.3.2 Espectrometria de emissão óptica com plasma (ICP-OES)

A composição elementar foi determinada por espectrômetro, modelo Plasma II da Perkin Elmer. Essa análise foi realizada TUC para a CP e CC em triplicata. Quantificou-se os percentuais dos elementos presentes na amostra.

4.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS

Para realização das análises de MEV, utilizou-se um microscópio eletrônico da marca LEO, modelo 440, acoplado com detector Espectroscopia de Energia Dispersiva por raios-X (EDS) da USP São Carlos/SP, realizando as microanálises e permitindo a identificação dos elementos químicos presentes na amostra através de análises por área, pontual e em linha.

4.3.4 Difração de raios X (DRX)

A composição mineralógica das amostras foi verificada por um difratômetro da Rigaku, modelo Ultima IV, com radiação $\text{CuK}\alpha$ de 40 kV e 30 mA, com velocidade de $2^\circ/\text{min}$ e ângulo 2θ variando de 2 a 70° . Para preparação das amostras, essas foram secas com auxílio de um liofilizador por 16h e cominuídas pelo tempo entre 5 e 10 minutos em almofariz de porcelana com o uso de pistilo até a obtenção de um pó fino. Posteriormente, foram prensadas manualmente com o auxílio de lâmina de vidro em porta amostra e inserida no equipamento de DRX para leitura.

Em seguida, a realização da identificação das fases foi realizada com o auxílio do software X'pert HighScore Plus da PANalytical operando com o banco de dados do ICDD software JADE 3.0. As fichas cristalográficas analisadas foram: código de referência 00-005-0586 Calcita (CaCO_3); código de referência 00-005-0628 Halita (NaCl); código de referência 00-033-1161 Quartzo (SiO_2) e código de referência 00-010-0173 Alumina (Al_2O_3).

4.3.5 Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise química para espectroscopia na região do FTIR usou o espectrofotômetro IRAffinity-1S da SHIMADZU, equipado com detector DTGS (com maior sensibilidade do detector, formado pelo sal sulfato de triglicina deuterada) da UFOB. As medidas foram realizadas usando-se pastilhas de KBr (com uma proporção de 1:100 de cinzas e KBr, respectivamente) e leituras entre os comprimentos de onda 400 e 4000 cm^{-1} , sendo realizadas 70 varreduras e resolução de 4 cm^{-1} .

4.3.6 Análise Termogravimetria (TGA/DTA)

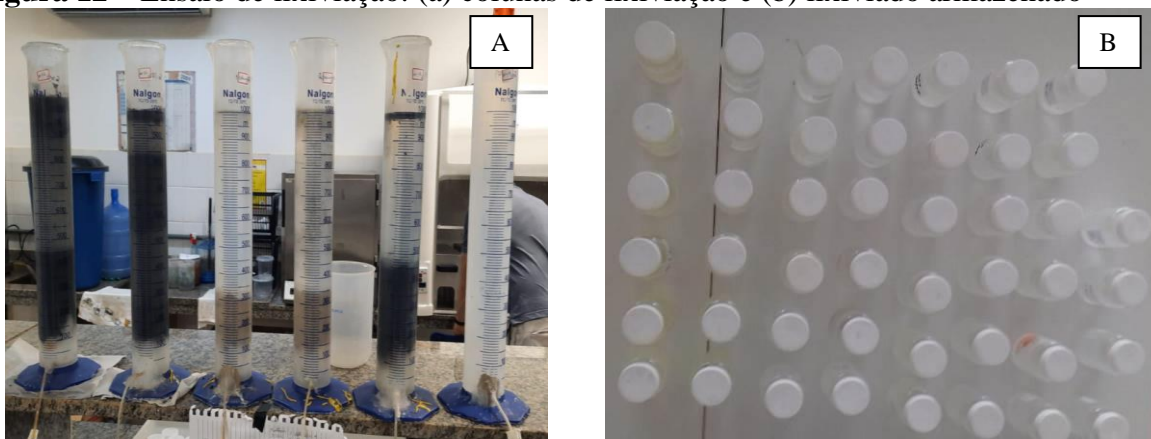
Uma alíquota de 1,0 g da CP foi analisada termicamente no Simultaneous DTA-TG Apparatus DTG-60 da SHIMADZU, com variação controlada da temperatura, iniciando na temperatura ambiente (25°C aproximadamente) até 1000 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min sob atmosfera inerte de N_2 .

4.4 Etapa 3: Caracterização Ambiental

Para os ensaios de avaliação do risco ambiental, através de ensaios de lixiviação, montou-se o equipamento (coluna de lixiviação) utilizando uma proveta graduada de 1,0 L com adaptação (orifício e tubo conector) na parte inferior para saída do material percolado, para camada filtrante usou-se a lã de vidro com espessura em torno de 10cm, inserindo no equipamento aproximadamente 250 g de cinzas e, por fim, a inserção de água deionizada isenta de orgânicos, conforme recomenda a norma.

O ensaio de lixiviação (Figura 12) foi conduzido em duplicata com divisão da amostra em duas partes, em função da granulometria e tipo, sendo: CP<1,18mm, referente ao material bruto passante nessa peneira e a CC<0,075mm passante nessa granulometria. Foram coletadas um total de 46 amostras de solução lixiviada em frascos com capacidade para 100 mL, o intervalo de tempo de coleta oscilou entre um (01), três (03), sete (07) e dez (10) dias.

Figura 12 – Ensaio de lixiviação: (a) colunas de lixiviação e (b) lixiviado armazenado



Fonte: autoria própria.

A análise dos elementos foi realizada através de espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS), o aparelho (Figura 13) é o modelo Agilent MP-AES 4210, disponibilizado pela UFOB. Para cada amostra, 10 mL de lixiviados foram retiradas dos frascos de forma individual e uso de pipeta graduada, em seguida foram filtradas com uso de uma membrana 0,45 μm visando a possível remoção de partículas finas em suspensão. Na sequência, transferiu-se as amostras para béquer de 100 mL, adicionando-se 1,5 mL de ácido nítrico (HNO_3) e 4,5 mL de ácido clorídrico (HCl), na proporcionalidade de HNO_3/HCl (1:3), formando o cloreto de nitrosila (NOCl) eficiente para ampliar a detecção de metais, posteriormente cada amostra foi completada com água extra pura até o menisco de 100 mL do béquer e homogeneizados, ficando a amostra pronta para análise.

Figura 13 – Ensaio com o Lixiviado no ICP-MS



Fonte: autoria própria.

Conforme manual de instruções do equipamento, ocorreu a calibração com uso da solução padrão Multielementar (20 elementos) de 100 mg/L (100 ppm) para Al, Ag, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Si, Sn, Ti, V e Zn, certificado de análise e rastreabilidade ao NIST, pronta para uso, marca SpecSol® diluída 10 vezes. Para calibração da curva, foram empregadas soluções contendo os elementos citados anteriormente, nas concentrações de 0,00; 0,50; 1,50; 3 e 8 mg/L e depois do equipamento realizar a leitura dessas soluções a curva de cada elemento foi calibrada. Então a análise de cada amostra foi realizada, obtendo triplicatas para cada uma delas.

4.5 Etapa 4: Avaliação da Atividade Pozolânica

Nessa etapa, buscou-se realizar diferentes métodos para avaliar a atividade pozolânica da CC a 1000°C e permanência de uma (1,0) hora, conforme as recomendações de cada ensaio. A partir do conhecimento prévio das características químicas e físicas do material em estudo, consideração a disponibilidade de equipamentos e recursos disponíveis, optou-se pela avaliação por quatro métodos, sendo dois diretos: Ensaio de Fratini e Ensaio de Luxán; e dois métodos indiretos: IAP NBR 5752/2014 e avaliação por DRX. Todos os ensaios aconteceram nos laboratórios da UFOB.

4.5.1 Ensaio de Fratini

O ensaio de Fratini foi conduzido conforme recomenda a NBR 5753/2016 e desenvolvido em etapas distintas: a preparação de amostras e determinação das concentrações de íons de hidroxilas (OH^-) e óxido de cálcio (CaO). Inicialmente realizou-se a definição e preparação das amostras, sendo:

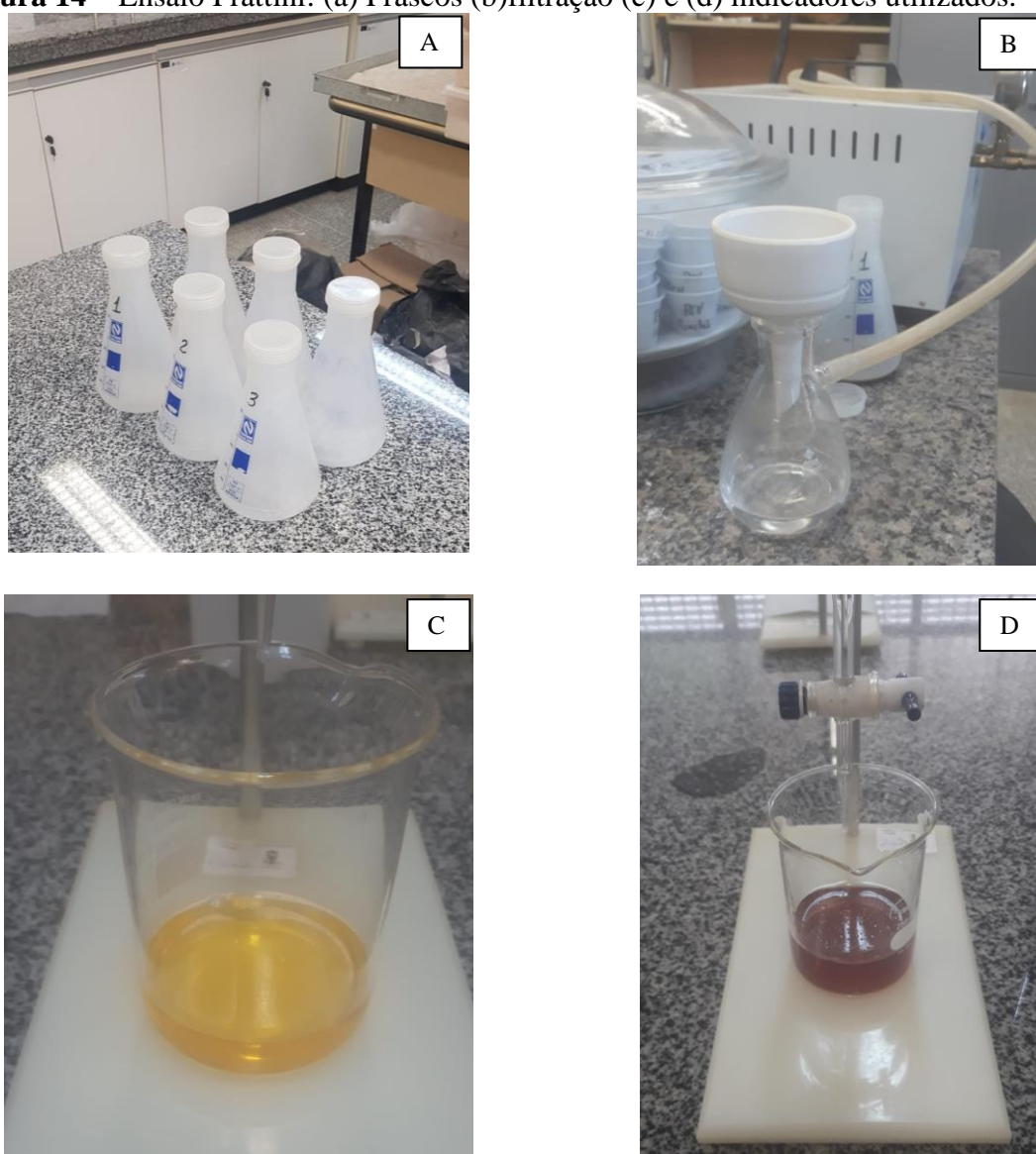
- Referência composta por 20 g de cimento Portland CII – F;
- 90% de CII – F (18 g) + 10% de CC (2,0 g);
- 80% de CII – F (16 g) + 20% de CC (4,0 g).

Utilizando um frasco de erlenmeyer de 250 mL, colocou-se as amostras pesadas e adicionou-se 100 mL de água recém fervida e estabilizada em estufa a 40 °C. Em seguida, realizou-se agitação manual vigorosa das misturas por 20 segundos, de forma a garantir homogeneidade e evitar formação de grumos de cimento. Após esses procedimentos, os frascos foram fechados e mantidos na estufa novamente por 8 e 15 dias. Nas referidas datas,

as soluções foram retiradas, resfriadas em temperatura ambiente e filtrada utilizando bomba de vácuo, funil de Buchner e papel filtro com porosidade fina de 2,7 μm .

Posteriormente, com soluções preparadas à base de ácido clorídrico diluído a 0,1 mol/L e EDTA a 0,03 mol/L conforme recomenda a NBR 5753/2016 e, usando-se os indicadores alaranjado de metila e azul de hidroxinaftol, buscou-se determinar os teores de íons de OH^- e CaO , ambos em milimoles por litros (mmol/L). Com o auxílio de um diagrama de solubilidade de hidróxido de cálcio em função do teor de OH^- , determinou-se se a saturação ou não da solução filtrada, de forma que possa permitir concluir a pozolânicidade do cimento analisado. Na figura 14, são apresentadas algumas etapas.

Figura 14 – Ensaio Frattini: (a) Frascos (b) filtração (c) e (d) indicadores utilizados.



Fonte: autoria própria.

4.5.2 Ensaio de Luxan – Condutividade Elétrica

Essa análise está relacionada a capacidade de reação do material em estudo (cinzas calcinadas) com o hidróxido de cálcio em uma solução saturada de Ca(OH)_2 . Avaliou-se, por meio da variação da condutividade elétrica no tempo durante 120 segundos, de acordo com o método de ensaio descrito por Luxan *et al.* (1989). Utilizou-se um agitador/aquecedor magnético da marca Lucadema e um condutivímetro marca Alfakit, modelo AT255. O ensaio foi desenvolvido na UFOB.

O procedimento consistiu em preparar a solução saturada de Ca(OH)_2 , utilizando água destilada (200 ml) e hidróxido de cálcio (2,0 g) com mensuração da condutividade elétrica inicial estabilizada desta solução a 40 °C. Após esta primeira medida de condutividade adicionou-se à solução saturada 5,0 g de CC, o monitoramento da condutividade ocorreu com intervalo de dez segundos durante os dois minutos iniciais, o ensaio contínuo com intervalo de medidas a cada um minuto até completar dez minutos, sendo o propósito observar o comportamento do material em um tempo maior.

4.5.3 IAP NBR 5752/2014

O ensaio foi conduzido pela NBR 5752/2014 com produção de cps cilíndricos padronizados em 5x10cm, utilizando a substituição em massa de 25% de cimento CP II-F-32, pelo material de CC, manteve-se a mesma proporção de areia normal e a relação de água utilizada e estabelecida pela norma para a argamassa A (referência) e argamassa B (traço analisado com 25% de CC). Foram produzidos seis cps para cada argamassa, mantidos em cura úmida e rompidos por compressão axial aos 28 dias. A Tabela 5, apresenta os traços utilizados e resultados obtidos para o IAP.

Tabela 5 – Traço para o ensaio de IAP

Material	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CP II-F-32 (g)	624	428
Cinzas Calcinadas (g)	0	156
Areia Normal (g)	1872	1872
Água Destilada (g)	300	300
Aditivo (ml)	----	1,8

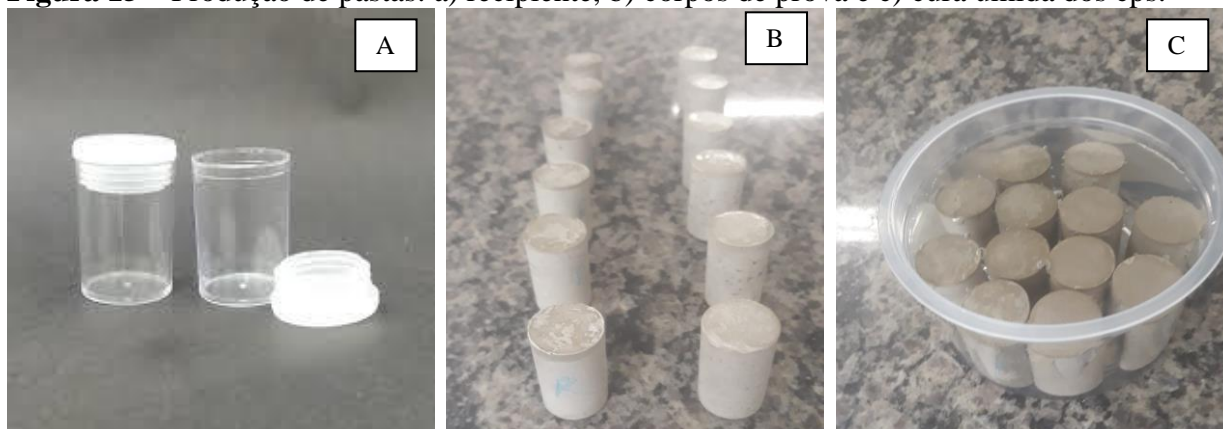
Fonte: autoria própria

4.5.4 Avaliação da atividade pozolânica por DRX

Utilizou-se a técnica de DRX para avaliar a presença e o comportamento de picos de Portlandita para o ângulo de 2θ nos ângulos de $18,089^\circ$, $34,089^\circ$, $47,124^\circ$ e $50,795^\circ$ conforme destacados na literatura por (NITA e JOHN, 2007). Foram produzidas pastas com cimento CPV ARI, sendo a pasta de referência sem CC e as demais com substituição nos percentuais 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5%. Esse estudo avaliou a influência da presença da CC na cinética de reação da aglomerante e possível atividade pozolânica ao longo do tempo.

Utilizou-se na confecção das pastas, um misturado/agitador mecânico da marca Fisatom, modelo 715, na velocidade de 2.000 rpm por um tempo de dois minutos após a completa adição dos sólidos e água destilada. Ao término da mistura, a pasta foi lançada em recipientes cilíndricos (Figura 15a) com dimensões 185 ± 2 mm de diâmetro e altura 370 ± 2 mm, e volume em torno de 10 mL, permanecendo em cura ambiente pelo período de 24h. Foram moldados 04 cps para cada idade, totalizando 12 amostras. Após esse período, as amostras foram desformadas e colocado em recipiente plástico de aproximadamente 500 mL contendo água destilada e tampa para a cura submersa. As amostras foram mantidas nessa situação em temperatura ambiente até as idades de ensaio (3, 7, e 28 dias).

Figura 15 – Produção de pastas: a) recipiente, b) corpos de prova e c) cura úmida dos cps.



Fonte: autoria própria

A tabela 6, apresenta as proporções e a quantidade de material utilizados para a produção de cada traço de pasta analisado, sendo escolhida a relação 0,4 de água/aglomerante para o ensaio. Essa escolha, se deve pelo fato da produção de pastas com características semelhantes de argamassas com finalidade para aplicação de concreto. Ressalta-se, que os cps produzidos nessa etapa foram também utilizados para ensaios de RC e PA.

No momento da realização do ensaio de RC das pastas, coletou-se amostras para realização do ensaio de porosidade e avaliação de atividade pozolânica por DRX. A extração das amostras ocorreu da parte interna do cps rompidos, utilizando uma marreta e talhadeira. Foram coletadas amostras com dimensão em torno de 1 cm em triplicata. A preparação das amostras para análise dos ensaios de DRX, seguiu a descrição do item 4.4.5.

Tabela 6 – Proporções e quantidade para produção das pastas.

Traços	Proporções			Quantidade Material		
	cimento	Água	cinza	cimento (g)	água (ml)	cinza (g)
Referência	1,000	0,400	0,000	350,00	140	0,00
Pasta 2,5%	0,975	0,400	0,025	341,25	140	8,75
Pasta 5%	0,950	0,400	0,050	332,50	140	17,50
Pasta 7,5%	0,925	0,400	0,075	323,75	140	26,25
Pasta 10%	0,900	0,400	0,100	315,00	140	35,00
Pasta 12,5%	0,875	0,400	0,125	306,25	140	43,75

Fonte: autoria própria

4.6 Etapa 5: Estudos das matrizes cimentícias

O estudo para produção de matrizes cimentícias, fundamentou-se na utilização individual das CC em substituição parcial entre 0,0 % e 12,5% do cimento CPV ARI para produção de pastas. Para confecção das argamassas para concreto, usou-se também e forma individual a CC em substituição parcial do cimento e em substituição do agregado miúdo (areia) com as mesmas variações das pastas. Visando observar o comportamento das CC em possível efeito *filler*, produziu-se argamassas contendo percentuais entre 0,0% e 7,5%, usando de forma conjunta CC + *filler* calcário (FC). As características mensuradas nas argamassas foram: índice de consistência, resistência a compressão axial e porosidade aparente.

As características físicas e químicas dos materiais utilizados para produção das matrizes foram: composição química, massa específica e dimensão máxima, sendo os dados obtidos a partir das informações contidas nas embalagens dos fabricantes do cimento (CPV – ARI) e do *filler* calcário. Em relação aos dados do agregado miúdo, utilizou-se as informações levantadas por Pires (2019), que caracterizou o agregado comercializado na região de estudo. A água utilizada nos ensaios, foi água destilada produzida na UFOB. A tabela 7, apresenta

uma síntese das características dos materiais utilizados. As características das CC foram levantadas conforme os resultados encontrados, sendo utilizado somente para os ensaios CC passante na peneira de abertura de 75 μm .

Tabela 7 – Características físicas e químicas dos materiais.

Material	Massa específica (g/ cm³)	Dimensão máxima	Composição química
Cimento CPV – ARI (campeão) ¹	3,05	71 μm	66,97% de CaO 17,45% de SiO ₂ 5,0% de SO ₃ 4,89% de Al ₂ O ₃ 3,12% de Fe ₂ O ₃ Traços de MgO, K ₂ O, TiO ₂ , SrO, P ₂ O ₅
<i>Filler</i> Calcário ²	2,50	Não informado	Ca \geq 36,0% e Mg \leq 3%
Agregado Miúdo ³	2,65	1,20 mm	Não realizada

Fonte: ¹Embalagem do material, ² Ficha Técnica GFN 50 do site Goiás Filler e ³ Pires (2019).

4.6.1 Proporção das matrizes

A proporção para confecção das pastas ocorreu conforme estabelecido na Tabela 6 (pag. 54). Para produção das argamassas, seguiu-se o traço unitário na proporção de 1:3:0,4 dos materiais cimento, agregado miúdo e relação água/aglomerante, respectivamente. Em alguns traços específicos de substituição de CC, adicionou-se 0,2% de aditivo superplastificante em relação a quantidade de cimento, visando para manter uma consistência e trabalhabilidade das argamassas. Os traços foram produzidos com a substituição parcial do cimento ou agregado miúdo (areia) por percentuais de CC, de forma a observar o comportamento da substituição em ambas as situações. As argamassas produzidas apresentaram consistência e fluidez adequada para a moldagem dos cps cilíndricos com dimensões: 5,0 cm de diâmetro por 10 cm de altura.

A Tabela 8 apresenta a proporção dos onze traços propostos e analisados para argamassas de concreto, sendo o traço CPV_Referência sem nenhuma presença de CC e os traços CPV_2,5%CC, CPV_5%CC, CPV_7,5%CC, CPV_10%CC e CPV_12,5%CC com

substituição dos respectivos percentuais de cimento por CC, com manutenção da mesma fração de agregado miúdo.

Em relação a substituição do agregado miúdo (areia) a tabela 9 apresenta os traços foram: AR_2,5%CC, AR_5%CC, AR_7,5%CC, AR_10%CC, AR_12,5%CC com substituição respectiva dos percentuais e manutenção da mesma fração de cimento. O traço CPV_Referência, é denominado traço de controle para ambas as situações de substituição.

Tabela 8 – Composição percentual dos materiais para produção das argamassas em substituição ao cimento.

Traços	Proporções			
	CPV-ARI	areia	CC	água
CPV_Referência	0,250	0,75	0,000	0,4
CPV_2,5%CC	0,225	0,75	0,025	0,4
CPV_5%CC	0,200	0,75	0,050	0,4
CPV_7,5%CC	0,175	0,75	0,075	0,4*
CPV_10%CC	0,150	0,75	0,10	0,4*
CPV_12,5%CC	0,125	0,75	0,125	0,4*

Fonte: autoria própria * Uso de 0,2% de aditivo em relação a massa de cimento

Tabela 9 – Composição percentual dos materiais para produção das argamassas em substituição ao agregado miúdo.

Traços	Proporções			
	CPV-ARI	areia	CC	água
CPV_Referência	0,250	0,75	0,000	0,4
AR_2,5%CC	0,250	0,725	0,025	0,4
AR_5%CC	0,250	0,700	0,050	0,4
AR_7,5%CC	0,250	0,675	0,075	0,4*
AR_10%CC	0,250	0,650	0,10	0,4*
AR_12,5%CC	0,250	0,625	0,125	0,4*

Fonte: autoria própria * Uso de 0,2% de aditivo em relação a massa de cimento

4.6.2 Produção da argamassa

Nessa etapa, produziu as argamassas utilizando um misturador mecânico (Figura 16), sendo inicialmente adicionado a quantidade de água em cada traço, seguido dos materiais

secos de cada traço cimento + CC, esses misturados previamente de forma manual em recipiente plástico, com auxílio de uma colher de sopa por aproximadamente dois minutos, esse procedimento visou manter a melhor distribuição e uniformidade da mistura dos sólidos. Em seguida adicionou-se a parcela do agregado miúdo, respeitando os intervalos de tempo recomendado em cada processo e preconizado pela NBR 7215/2019. Vale destacar que esse procedimento de mistura prévia e uniformização dos materiais foi realizado também na substituição agregado miúdo (areia) pela CC.

Figura 16 – Misturador mecânico.

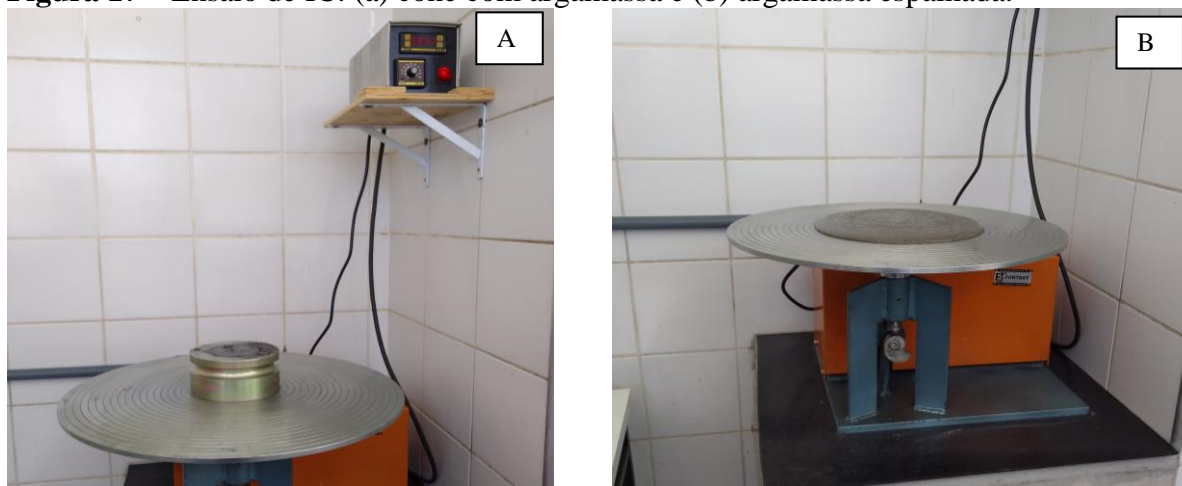


Fonte: autoria própria

4.6.3 Ensaio para Índice de Consistência (IC)

Na sequência da produção das argamassas, realizou-se o ensaio de *mini-slump*, (figura 17) determinando as medidas do diâmetro de espalhamento (Desp) conforme método *flow table* NBR 15839/2010. As argamassas foram ensaiadas no aparelho de consistência da UFOB, sendo o cone de ensaio preenchido com três camadas de argamassas e uniformizadas a partir da distribuição de 15, 10 e 5 golpes com soquete de adensamento. Após o enchimento do cone, retirou-se o excesso e alisou o topo com uso de uma régua. Em seguida, retirou-se o cone de forma vertical e ligou o equipamento, foram 30 golpes em 30 segundos na amostra, provocando o abatimento da argamassa e espalhamento, em seguida com uso do paquímetro mensurou os Desp.

Figura 17 – Ensaio de IC: (a) cone com argamassa e (b) argamassa espalhada.



Fonte: autoria própria

4.6.4 Moldagem dos cps.

Após o ensaio de IC, as argamassas foram lançadas em quatro camadas, nos moldes cilíndricos de dimensões $\varnothing 5 \times 10$ cm, untados levemente com óleo mineral para a moldagem dos cps. O adensamento de cada camada foi realizado aplicando 30 golpes de soquete padrão, conforme especificações da NBR 7215/2019, sendo moldados quatro cps para cada idade de ensaio (7 e 28 dias) para cada traço, totalizando 88 cps. As argamassas permaneceram em repouso, nos moldes recobertos por placas de vidro (figura 18) por um período de 24 h em temperatura ambiente. Após esse período, foram desmoldados e submetidos à cura submersa em água saturada com cal, sendo as amostras utilizadas para os ensaios de RC e PA.

Figura 18 – Confeção dos cps

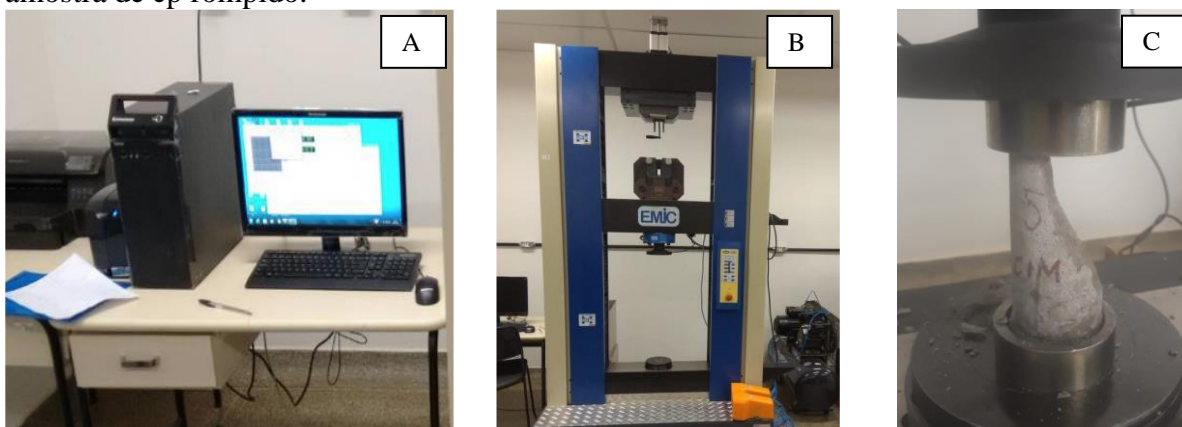


Fonte: autoria própria

4.6.5 Resistência a Compressão Axial– RCA

Para mensurar a RCA dos CPS confeccionados, utilizou-se a máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL-30000, vinculada aos softwares VirMaq e Tesc responsáveis pela entrada dos parâmetros de ensaios e saída dos dados. O ensaio foi conduzido com uma taxa de aplicação de carga constante de 0,25 MPa/s conforme a diretriz da NBR 13279/2005. Posteriormente, calculou-se os valores médios, desvio padrão (D.P) e diferença relativa máxima (DRM). Os cps foram avaliados nas idades de 7 e 28 dias, sendo a RC representada pela média aritmética dos quatros cps, aceitando- se o DP máximo de 3% e DRM com variação máxima de 10%, conforme recomenda a NBR 7215/2019. A Figura 19 demonstra etapas do processo.

Figura 19 – Ensaio de RC: (a) Software VirMaq e Tesc, (b) Máquina universal EMIC e (c) amostra de cp rompido.



Fonte: autoria própria.

4.6.6 Ensaio de Porosidade

Inicialmente estimou-se a porosidade teórica (PT) inicial, considerando o volume de água utilizado em cada mistura em relação ao volume total dos materiais utilizados para cada traço executado de argamassas e pastas representa.

Para os ensaios visando a determinação da porosidade aparente (PA), coletou-se três amostras da parte central de cada cps rompidos no ensaio de compressão axial. Essas amostras tiveram tamanho regular de aproximadamente 1,0 cm de diâmetro, sendo essas submersas em água por um período de 1h. Posteriormente determinou-se a massa saturada em superfície seca (M_{ss}), sendo submersas em balança hidrostática para determinar a massa submersa (M_{sub}), em seguida utilizou-se um liofilizador para secagem das amostras pelo período de 16h com posterior determinação da massa seca (M_s).

Efetuu-se o cálculo da PA de cada amostra coletada, a partir da determinação do valor médio, sendo descartadas amostras que tivesse um coeficiente de variação maior de 10%. Utilizou-se para a determinação do cálculo a equação 2. A figura 20, ilustra algumas etapas do processo.

$$PA = \frac{(M_{sss} - M_s) \times 100}{(M_{sss} - M_{sub})}$$

Equação 2

Em que:

- **PA:** Porosidade Aparente (%)
- **M_{sss}:** massa saturada em superfície seca (g)
- **M_{sub}:** massa submersa (g)
- **M_s:** massa seca (g)

Figura 20 – Ensaio de Porosidade aparente: a) coleta de amostra, b) balança hidrostática, c) preparação das amostra e d) liofilizador



Fonte: autoria própria.

4.6.7 Argamassa com Cinzas Calcinadas (CC) + Filler Calcário (FC)

A partir dos experimentos utilizando as CC em argamassa, formulou-se ensaios de traços visando a inclusão do cimento CPV – ARI, areia, CC e o FC de forma a verificar os efeitos da utilização conjunta dos materiais e observar o comportamento das interações e suplementação da matriz com FC.

A relação de água/aglomerante adotada foi de 0,48 para produção das argamassas, e a substituições ocorreram em percentuais que variaram entre 2,5%, 5% e 7,5% de cimento por composição de CC + FC, respectivamente. A análise desses traços ocorreu nas idades de (7, 28, 56 e 91) dias. Os traços da utilização dessas misturas são descritos conforme a tabela 10. Realizou-se os mesmos procedimentos de produção e moldagem das argamassas e os ensaios de IC, RC e PA adotados para argamassas e descritos nos itens 4.6.2 a 4.6.6. A relação adotada permitiu que todos os traços tivessem fluidez adequada à moldagem, não sendo necessário uso de aditivos plastificantes para melhorar a consistência e trabalhabilidade.

Tabela 10 – Proporções das misturas em ensaios com FC.

Traços	Proporções			
	CPV-ARI	areia	CC	FC
CPV_Referência	0,25	0,75	0,000	0,000
CPV_2,5%CC_FC	0,225	0,75	0,0125	0,0125
CPV_5%CC_FC	0,20	0,75	0,025	0,025
CPV_7,5%CC_FC	0,175	0,75	0,0375	0,0375

Fonte: autoria própria

4.6.8 Relação Resistência Compressão X Porosidade Aparente

Visando observar a integração dos resultados obtidos e da relação de RC x PA, utilizou-se o modelo matemático proposto por Mehta e Monteiro (1994), conforme equação 3.

$$S = S_0 e^{-kp} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

S = Resistência (MPa);

S₀ = Resistência com porosidade zero (MPa);

p = Porosidade (%);

k = Constante.

4.6.9 Análise estatística para RC

Buscando ter uma maior confiança entre a variação da RC encontrada no presente estudo, foi feita inicialmente uma análise estatística de variância (ANOVA) dos dados, com confiabilidade de 95%, para análise de fator único, com nível de significância (α) de 0,05, com o intuito de verificar se as alterações encontradas nas propriedades são significativas ou se podem ser atribuídas à aleatoriedade dos ensaios realizados.

Foram testadas duas hipóteses em relação aos dados obtidos:

- H_0 : Não há evidências sobre a influência da utilização da CC nos traços produzidos;
- H_1 : Há evidências sobre a influência da utilização da CC nos traços produzidos.

A partir dos dados observados na ANOVA, realizou-se o teste de Tukey para cada grupo independente buscando identificar as diferenças e igualdades existentes dentro do grupo de argamassa em cada idade para a propriedade de RC.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de caracterização física, ambiental, química, atividade pozolânica e mecânicos com os testes em argamassas.

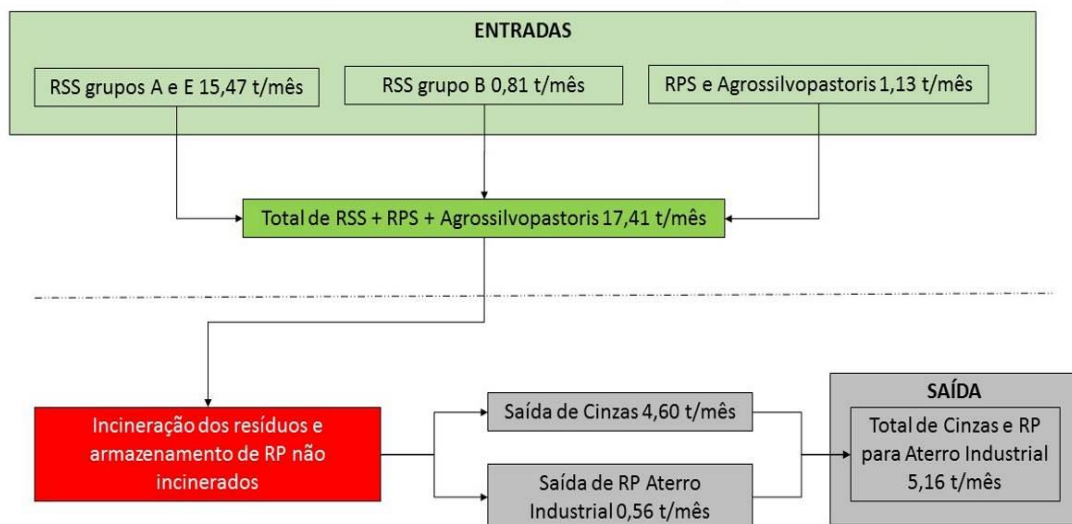
5.1 Avaliação das características físicas

5.1.1 Balanço de massa

O balanço de massa traz a entrada (resíduos perigosos) e saída (cinzas e materiais não passíveis de incineração), expondo a relação percentual e quantitativa dos materiais existentes no processo da indústria. O processo de incineração produz uma redução média em massa na ordem de $70,38\% \pm 2,01\%$ para os resíduos passíveis de incineração. Os resíduos perigosos que não passam pelo processo de incineração vão direto para o aterro industrial, representam na faixa de 6,65% da quantidade total de material coletado. Ressalta-se que a cinza gerada no processo é classificada como resíduo não perigoso e inerte.

Nos últimos três anos, a indústria recebeu um total de 627,1 toneladas (t) de RP, entre materiais passíveis de serem incinerados ou não, representando uma média mensal na ordem de $17,41 \pm 2,97$ t/mês. Dessa forma, o balanço de massa (Figura 11), apresenta uma entrada mensal de resíduos subdivididos por seguimentos/classes, gerando um descarte médio na ordem de 5,16 t/mês entre cinzas e resíduos não incinerados. Ressalta-se, que os RP recebidos na indústria não incinerados são compostos por peças metálicas (latas) e placas contaminadas com dimensão superior a abertura do incinerador, sendo esses armazenados e destinados diretamente a um aterro sanitário classe I. As cinzas geradas no processo de incineração são descartadas em aterro sanitário classe IIA.

Figura 21 – Balanço de massas dos resíduos perigosos na indústria.



Fonte: autoria própria.

A tabela 11, apresenta os dados por tipologia de resíduos, classe, quantidade, tratamento e/ou destinação para os resíduos recebidos e gerados no processo. Destaca-se a variação em torno de 17% para os RSS do grupo A1 e E, que pode ser explicado devido ao período de levantamento dos dados englobar o período pandêmico da COVID – 19.

Tabela 11 – Tipologia do resíduo recebido ou gerada pela indústria em esudo.

Controle	Resíduo	Classe NBR 10004/2004	Quant. (t/mês)	D. P (t/mês)	Tratamento
Entrada	RSS grupos A1 e E	Classe I	15,15	2,61	Incineração
	RSS grupo A3	Classe I	0,32	0,20	Incineração
	RSS grupo B	Classe I	0,81	0,31	Incineração
	Contaminados com óleo e graxa	Classe I	1,13	0,70	Incineração/A. Industrial
	Papel/papelão	Classe II a	-	-	Incineração
	Plástico	Classe II a e II b	-	-	Incineração
	Sucata ferrosa	Classe II a	-	-	Reciclagem
	Comum (orgânico, não reciclável)	Classe II a	-	-	Incineração
Saída	Cinzas Pesadas*	Classe II a	4,60	1,69	A. Sanitário
	Resíduos Diversos **	Classe I	0,56	0,25	A. Industrial

Fonte: PGRS da indústria (2021). * pós incineração

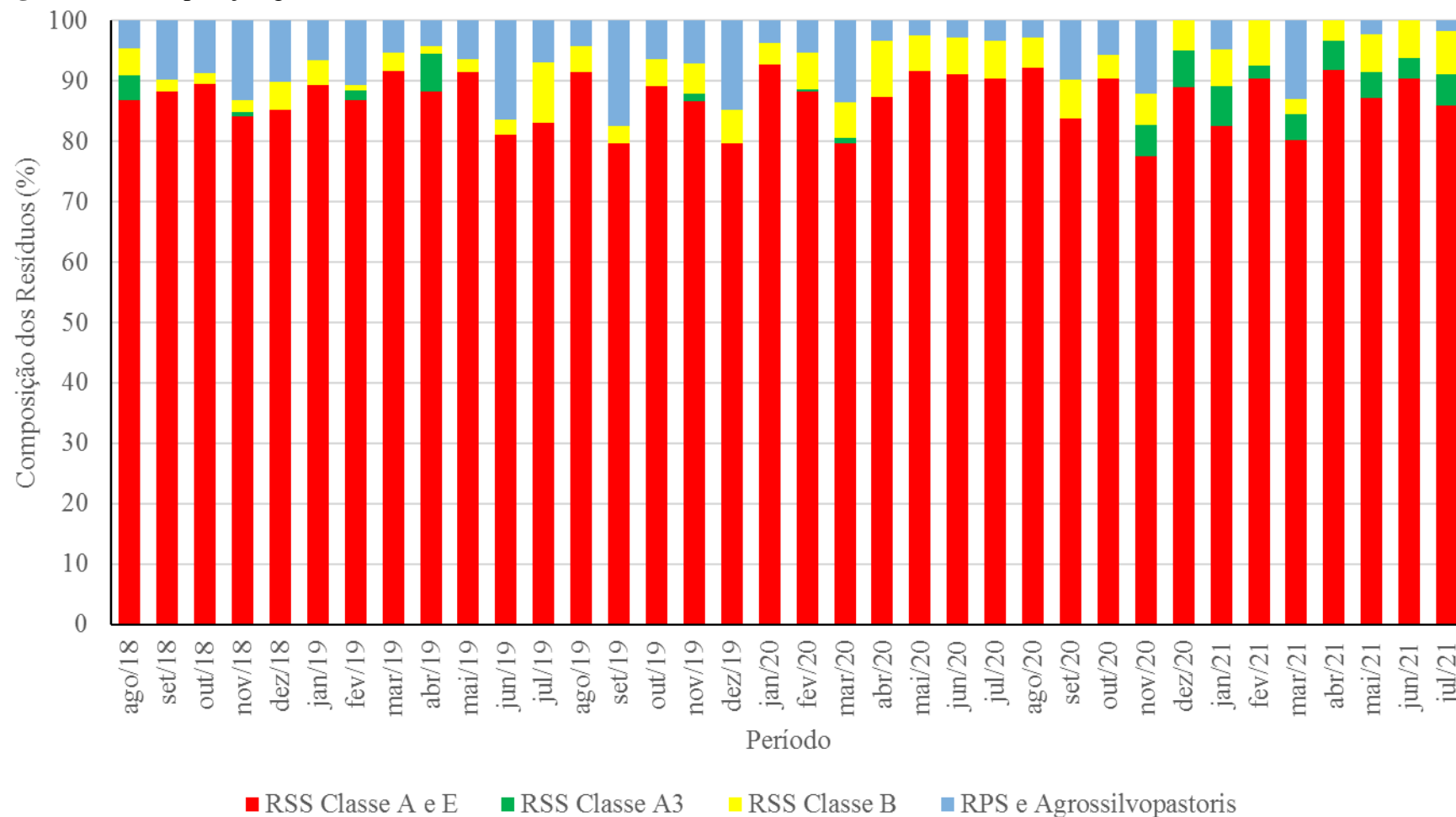
5.1.2 Composição Gravimétrica

A composição gravimétrica dos resíduos incinerados (Figura 22) quantificou uma entrada de resíduos recebidos em média de $87,07\% \pm 4,29\%$ para RSS das classes A e E, destacando-se os materiais de procedimentos hospitalares e perfurocortantes; $1,59\% \pm 0,28\%$ para RSS classe A3 referente a peças anatômicas humanas e processos cirúrgicos; $4,69\% \pm 2,15\%$ de RSS da classe B composta por químicos especialmente medicamentos vencidos; e $6,65\% \pm 4,83\%$ de resíduos oriundos de prestadores de serviços (RPS), agrossilvopastoris.

A variação nos percentuais pode ser explicada pela ocorrência da elevação ou diminuição da geração de resíduo na fonte, impactando a prestação do serviço de coleta da indústria em meses específicos, por exemplo, o acúmulo de resíduos agrossilvopastoris que acumulam em fazendas devido a sazonalidade na produção agrícola, outra situação são os períodos de esvaziamentos em épocas de férias por alguns prestadores de serviços.

Destaca-se, que no período compreendendo o levantamento de dados, inúmeras ações de controle para pandemia da COVID – 19, ocasionaram fechamento de diversas atividades comerciais e produtoras de resíduos, por outro lado acentuou uma sobrecarga no uso de Equipamento de Proteção Individual e demais serviços relacionados a área da saúde, em hospitais, clínicas e demais unidades de saúde, gerando oscilações significativas na produção de resíduos. A Organização Mundial da Saúde (OMS) aponta em relatório que mais de 140 milhões de kits de testes, com potencial para gerar 2,6 mil toneladas de resíduos não infecciosos (principalmente plásticos), 731 mil litros de resíduos químicos (equivalente a um terço de uma piscina olímpica) e mais de 8 bilhões de doses de vacina foram administradas globalmente, produzindo 144 mil toneladas de resíduos adicionais na forma de seringas, agulhas e caixas de segurança no período pandêmico (OMS, 2022).

Figura 22 – Composição gravimétrica dos resíduos incinerados.

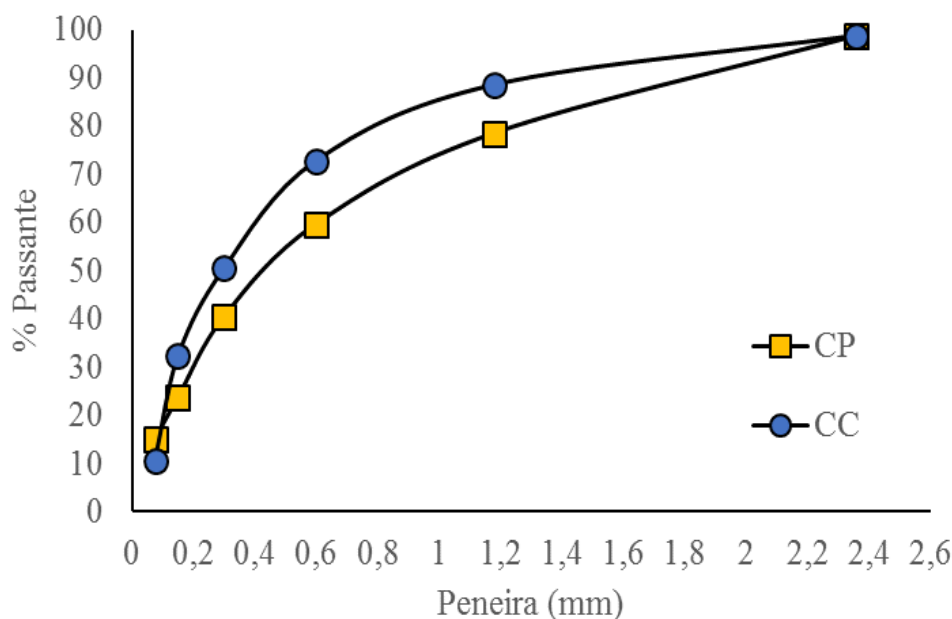


Fonte: autoria própria.

5.1.3 Composição Granulométrica

Os resultados obtidos apontam um percentual de 1,12% de retenção na peneira de abertura (2,36 mm), de predominância de caco de vidro e pedaços de peças metálicas pontiagudas, por exemplo seringas e arames de aço cirúrgicos retorcidos. A Figura 23, apresentam proporções de 15,10% e 10,69% de material passante na peneira 150 μm para as amostras de CP e CC respectivamente. A curva granulométrica mostra que a CC possui maior percentual de partículas com diâmetro abaixo de 10 μm , demonstrando que o processo de calcinação potencializa a quantidade da fração fina.

Figura 23 – Curva granulométrica das CP e CC



Fonte: autoria própria.

Os valores apresentados na Tabela 12 para os diâmetros das partículas, expõem os parâmetros de D_{10} , D_{50} e D_{90} , com 7,00 μm , 95,43 μm e 933,07 μm , respectivamente para CC. Keber *et al* (2020) em estudo com cinzas de incineração de RSU na TUC, obteve-se valores de D_{90} em 145 μm e com 22% de finos abaixo de 10 μm . Florea *et al.* (2016) encontraram em seus estudos com cinzas de fundo de incineração, D_{10} , D_{50} e D_{90} , com 13,32 μm , 70,72 μm e 256 μm , respectivamente. De Boom e Degrez (2012) obtiveram valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} , com 0,2 μm , 55 μm e 300 μm para cinzas de fundo, demonstrando uma variabilidade dos tamanhos de partículas, possivelmente pela composição de resíduos incinerados e diferenças no processo de incineração.

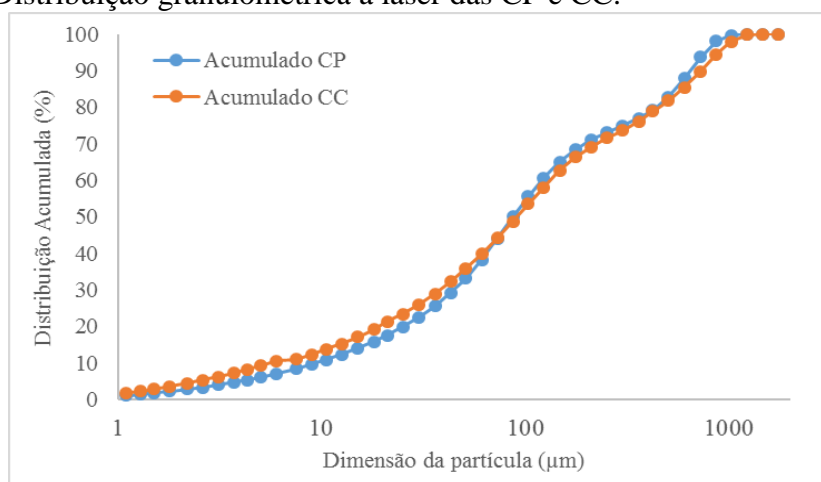
Tabela 12 – Características físicas das CP e CC.

Características	CP	CC
D ₁₀ (μm)	5,60	7,00
D ₁₆ (μm)	11,29	14,13
D ₅₀ (μm)	76,67	95,43
D ₈₄ (μm)	469,45	765,34
D ₉₀ (μm)	603,86	933,07
D ₉₉ (μm)	948,02	1406,31
Valor médio das partículas(μm)	12,94	15,22
Área Superficial (m ² /g)	0,602981	0,512521

Fonte: autoria própria.

A Figura 24 mostra a distribuição granulométrica para a CP e CC no acumulado, observando semelhança na curva existente entres os materiais, corroborando com os dados dos diâmetros médios e área superficial das partículas que apresentam valores próximos.

Figura 24 – Distribuição granulométrica a laser das CP e CC.

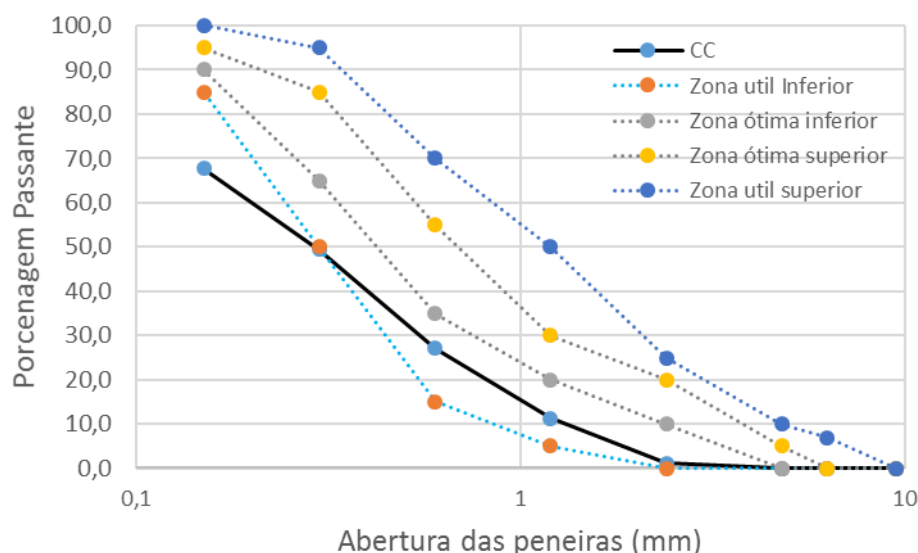


Fonte: autoria própria.

5.1.4 Módulo de finura, massa específica, PF e COT

O módulo de finura obtido foi de 1,87 para CC, sendo o material considerado dentro da faixa estipulada como “zona utilizável inferior” entre (1,55~2,20) para utilização como agregado miúdo conforme NBR 7211/2009 (Figura 25). Mendonça (2018), encontrou modulo de finura na ordem de 2,50 para cinzas oriundas da incineração de RSS, apresentando acentuada diferença em função da diferença de composição e dos processos de tratamentos.

Figura 25 – Distribuição por faixa granulométrica da CC conforme NBR 7211/2009.

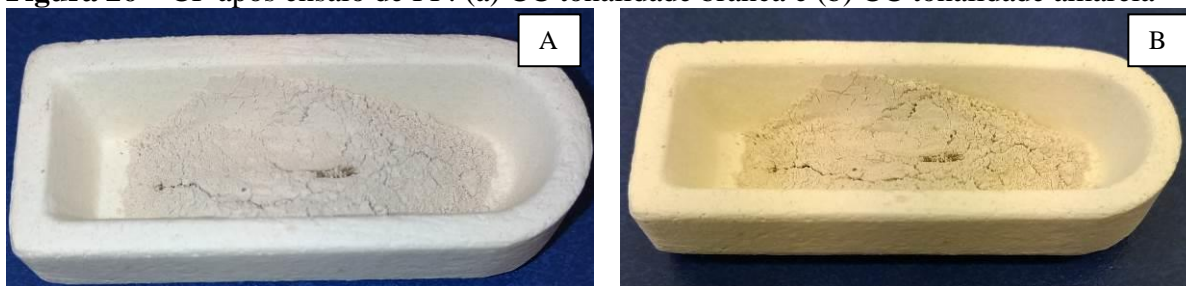


Fonte: autoria própria.

O valor da massa específica encontrado foi de $2,1455 \pm 0,0086 \text{ g/cm}^3$ e $2,8036 \pm 0,0020 \text{ g/cm}^3$ para CP e CC, respectivamente. Silva e Lange (2008), encontraram valores para cinzas de fundo que oscilaram de $1,93$ a $2,18 \text{ g/cm}^3$ para os ensaios realizados de caracterização de cinzas de RSS. Para Mendonça (2018), o valor determinado foi de $2,03 \text{ g/cm}^3$. O valor encontrado para a CP nesse estudo, apresentam características de densidade semelhantes a outras pesquisas com materiais semelhantes. Já nas CC, o processo de calcinação retira quase toda parte dos orgânicos presentes, aumentando a densidade na ordem de 30%. O valor de $2,80 \text{ g/cm}^3$ é intermediário ao agregado miúdo na ordem de ($2,60 \sim 2,65 \text{ g/cm}^3$) e cimento ($3,00 \sim 3,05 \text{ g/cm}^3$).

Os resultados para os ensaios de COT de $43,82\% \pm 2,64\%$ e PF $47,64\% \pm 0,03\%$ mostram proximidade para os valores em CP, corroborando que a cinza ao sair do processo de incineração possui uma grande quantidade de matéria orgânica. Silva e Lange (2008), encontraram, valores de PF para RSS na ordem de 46,5%, valor semelhante ao encontrado nesse estudo. Para CC o valor de PF foi de $2,00\% \pm 0,03\%$, valor próximo ao encontrado por Jeong *et al.* (2005), que obtiveram 4,4% em processos de incineração completa. Vale ressaltar, quando ocorre a calcinação completa das CP, ocorre a modificação da tonalidade da cor escura (preto) para cor clara (branco e amarelo), conforme observado na Figura 26.

Figura 26 – CP após ensaio de PF: (a) CC tonalidade branca e (b) CC tonalidade amarela



Fonte: autoria própria.

A tabela 13, apresenta uma síntese dos dados resultados obtidos na seção, para as características analisadas.

Tabela 13 – Características das CP e CC.

Características	CP	CC
Modulo de Finura	-----	1,87
Massa Específica (g/cm ³)	2,1455 ±0,0086	2,8036 ±0,0020
COT	43,82% ±2,64%	0,50% ±0,02%
PF	47,64% ±0,03%	2,00% ±0,03%

Fonte: autoria própria.

5.2 Avaliação das características química

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos para as análises químicas das cinzas.

5.2.1 Avaliação da FRX

Na tabela 14, são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de FRX quanto a composição elementar dos óxidos e elementos identificados, destacando-se a potencialização do CaO (50,74% e 55,92%) e SiO₂ (8,22% e 13,47%) sendo os óxidos predominantes nas CP e CC, respectivamente. Esses elevados teores de CaO podem ser justificados pela grande presença de RSS na incineração. Genazzini *et al.* (2005) detectaram 33,18% de CaO em cinzas oriundas de RSS. Hartmann *et al.* (2015) trabalhando com cinzas de fundo, encontraram percentuais de CaO e SiO₂, na ordem de 20,23% e 10,93%, respectivamente. Florea *et al.* (2016), encontraram valores de 30,21% e 11,13%, dos respectivos óxidos. Ababneh *et al.* (2020) encontraram o percentual de 16,58% de SiO₂ para cinzas de incineração. Os valores encontrados nesse estudo, não apresenta relação direta

com outros da literatura, entretanto, a diversidade na composição dos resíduos incinerados pode afetar a variabilidade dos percentuais.

Tabela 14 – Composição elementar para os ensaios de FRX.

Óxido ou Elemento	Com PF (%)		Sem PF (%)	
	CP	CC	CP	CC
Al ₂ O ₃	1,737	7,054	3,307	7,198
SiO ₂	4,321	13,202	8,226	13,471
SO ₃	0,876	2,553	1,668	2,605
P ₂ O ₅	-----	0,510	-----	0,520
K ₂ O	0,356	-----	0,678	-----
CaO	26,655	54,801	50,746	55,920
TiO ₂	4,108	8,564	7,821	8,739
Fe ₂ O ₃	0,930	1,966	1,771	2,006
ZnO	1,201	0,538	2,286	0,549
In ₂ O ₃	0,519	-----	0,988	-----
Cl	11,660	8,812	22,199	8,992
Br	0,163	-----	0,310	-----
PF	47,474	2,001	-----	-----

Fonte: autoria própria.

5.2.2 Avaliação do ICP-OES

Os resultados de ICP-OES, demonstrando de forma majoritária na amostra CP, a presença de 34,22% de C e 11,95% de Ca e outros elementos em menores proporções, tendo o valor de PF médio de 45,66% ± 2,01%, valor próximo ao encontrado no ensaio de COT. A presença em maior escala desses dois elementos pode potencializar o uso da CP para algumas atividades a exemplo da agricultura. Chang *et al* (2009), em suas análises com ICP-OES identificaram a presença de 15,2% de C e 8,1% de Ca, além de outros elementos Al, K, Na e Fe em ensaios com cinzas de fundo. A variação dos teores de C está relacionada com a temperatura e tempo de exposição do resíduo no incinerador.

Em relação às CC, sem a presença do C, existiu a potencialização dos percentuais dos elementos Al, Ca, Na e Si, corroborando com os dados levantados nos ensaios de FRX. A tabela 15 apresenta todos os percentuais identificados, nas amostras ensaiadas.

Tabela 15 – Ensaio de ICP – OES para CP e CC.

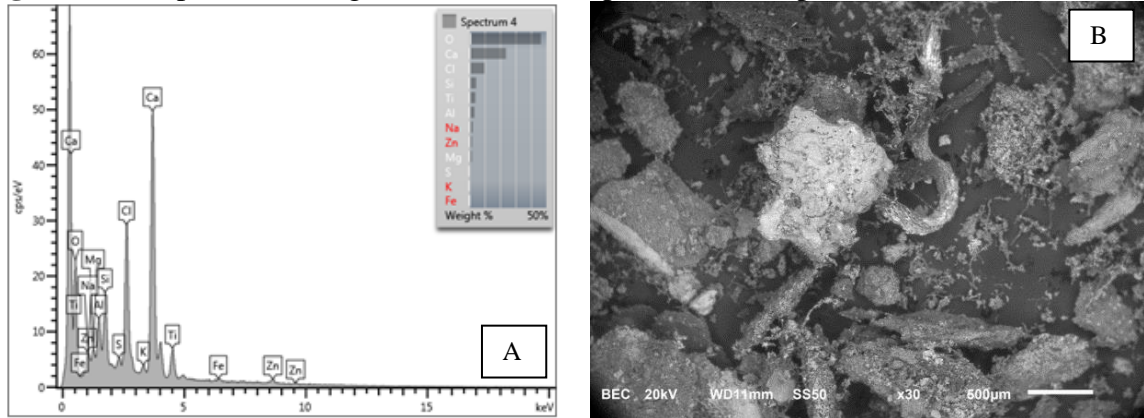
Resíduo/Amostra	Elementos (%)					
	C	Al	Ca	Si	Na	PF
CP Amostra 1	35,95	6,96	11,83	0,30	1,43	43,53
CP Amostra 2	33,24	6,17	12,87	0,34	1,47	45,91
CP Amostra 3	33,48	5,89	11,14	0,27	1,69	47,53
Média	34,22	6,34	11,95	0,30	1,53	45,66
Desvio padrão	1,50	0,56	0,87	0,04	0,14	2,01
CC Amostra 1	-----	11,98	17,98	3,56	3,05	-----
CC Amostra 2	-----	6,99	17,64	5,38	3,75	-----
CC Amostra 3	-----	7,43	17,20	4,76	3,77	-----
Média	-----	8,80	17,60	4,57	3,52	-----
Desvio padrão	-----	2,76	0,39	0,92	0,41	-----

Fonte: autoria própria.

5.2.3 Avaliação do MEV – EDS

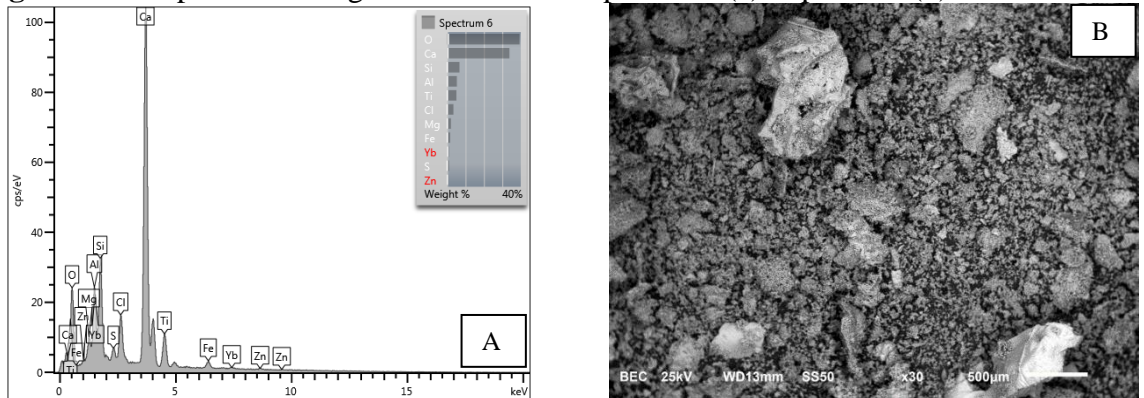
O resultado do ensaio realizado pelo MEV – EDS, identificou a presença dos elementos: O, Mg, Al, Si, S, Cl, Ca, Ti, Fe, Zn e Yb, destacando-se os percentuais de 39,31% de O, 33,84% de Ca, 6,71% de Si, 5,27 de Al e 3,39% de Cl formando óxidos de CaO, Al₂O₃, e SiO₂, corroborando com as técnicas de ICP – OES e FRX. As imagens com MEV permitiram identificar formatos diversificados em suas superfícies irregulares, que relacionam com a distribuição granulométrica e o tamanho das partículas, sendo as frações finas observadas na imagem das CC. Strzalkowska (2020), expõe que cinzas com morfologia diversificada e sem ampla esfericidade podem ocasiona diminuição do deslizamento dos grãos, interferindo na trabalhabilidade e na fluidez para aplicações em matrizes cimentícias. Nas Figuras 27 e 28 são apresentados os espectros e imagem obtidos no ensaio de MEV – EDS para a CP e CC, respectivamente.

Figura 27 – Espectros e imagens de MEV-EDS para CP: (a) Espectro e (b) MEV.



Fonte: autoria própria

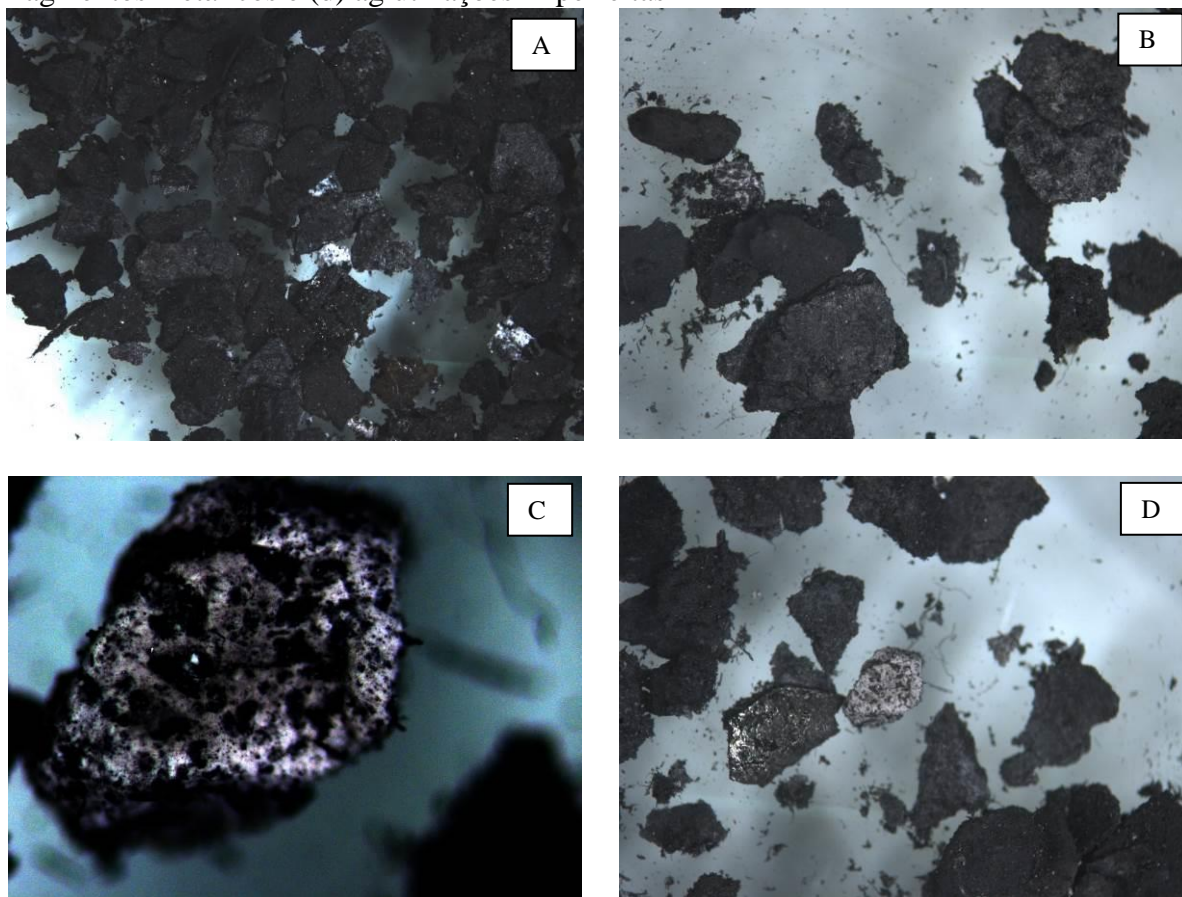
Figura 28 – Espectros e imagens de MEV-EDS para CC: (a) Espectro e (b) MEV.



Fonte: autoria própria

Na figura 29 observa-se as imagens obtidas através da microscopia ótica. Foi possível identificar algumas características das partículas nas CP, percebendo-se um formato diversificado das partículas e sem padronização de tamanho. Observa-se também, uma enorme presença de poros nas partículas, a presença de materiais particulados com características metálicas e à formação de aglutinações características de materiais leves que se traduzem em estruturas floculadas e permeáveis.

Figura 29 – Microscopia ótica da CP: (a) formato diversos, (b) porosidade do material, (c) fragmentos metálicos e (d) aglutinações imperfeitas

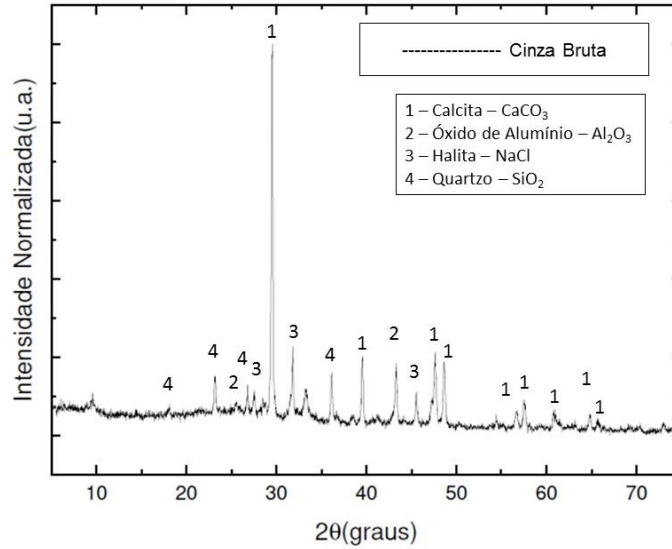


Fonte: autoria própria.

5.2.4 Difração de raios X (DRX)

No difratograma da CP (figura 30), foi possível identificar as fases cristalinas com presença de calcita, óxido de alumínio, halita e quartzo. Hartmann *et al.* (2015), Zhan *et al.* (2018) e Loginova *et al.* (2019) analisando cinzas de fundo, identificaram a presença dessas mesmas fases. Verifica-se também fases cristalinas, que indicam presença de matéria orgânica, carbono residual e fases vítreas de aluminossilicatos. O pico de CaCO_3 (em torno de 30°), é o mais destacado em intensidade na amostra de CP.

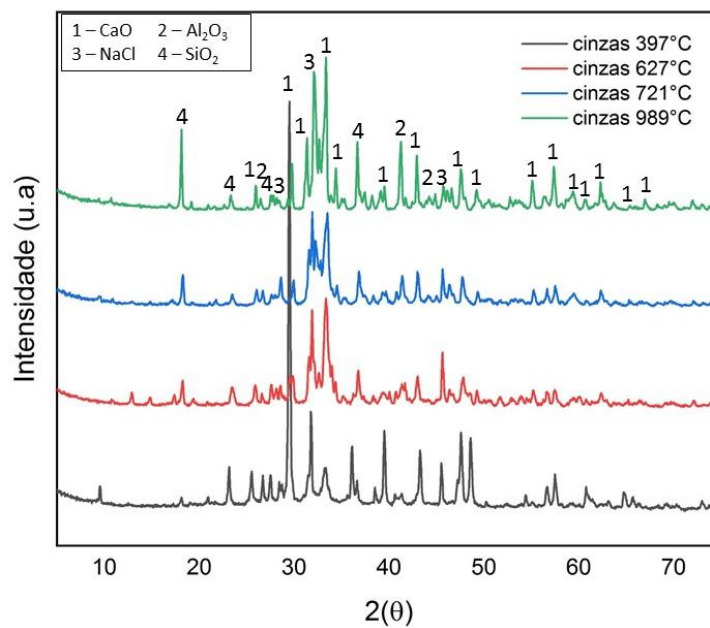
Figura 30 – Difratoograma da CP.



Fonte: autoria própria.

A figura 31, apresenta a difratograma das CC em quatro temperaturas diferentes, correlacionadas com os dados de variação de fases e perdas de massas obtidos no ensaio de TG/DTA. As curvas mostram que com elevação da temperatura ocorre a potencialização da presença de alguns minerais (SiO₂, NaCl e Al₂O₃), impactando na redução de CaCO₃, e eliminação do carbono presente. Na temperatura de 989 °C, identificou-se uma grande quantidade de picos de CaO.

Figura 31– Difratoograma da CC com temperaturas diferentes.

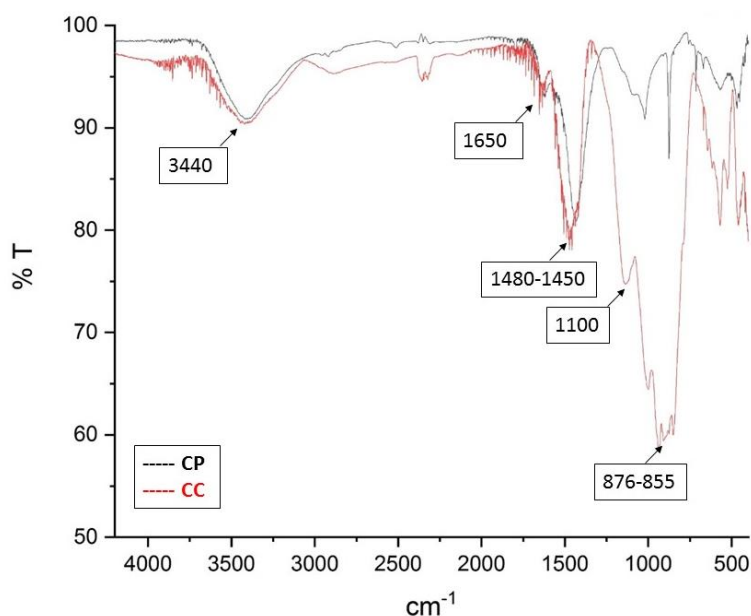


Fonte: autoria própria.

5.2.5 Avaliação do FTIR

Os espectros obtidos para FTIR (figura 32), apresentam perfis e bandas de absorção semelhantes entre os comprimentos de onda 4000 cm^{-1} e 1400 cm^{-1} , modificando sua estrutura a partir dessa faixa, demonstrando a formação de óxidos. Qian *et al.* (2008) e Shan *et al.* (2012), expõe que os picos nas proximidades de 3440 cm^{-1} são relacionados a características de presença de ligações moleculares (-OH), ocorrências nas proximidades 1650 cm^{-1} (H-O-H) estando essas relacionadas a vibrações pela presença de água entre camadas. Zhen *et al.* (2013) mostram que as bandas FTIR entre 1480 e 1450 cm^{-1} , são associadas a CO_3 em função da transformação de fases da CaCO_3 . Os grupos funcionais em 1100 cm^{-1} são atribuídos à vibração de alongamento assimétrico de moléculas com comprimento e ângulo das ligações em rede de silicatos de (Si-O-Si) correspondente. Perkins e Palmer (1999), apontam que os picos nas proximidades de 876 cm e 855 cm^{-1} são associados a SiO_4 e AlO_6 , respectivamente. Apolonio *et al.* (2020), associam os picos próximos a faixa de 465 cm^{-1} com vibrações de deformação angular e grau de amorfização da amostra.

Figura 32 - Espectro de FTIR para CP e CC.



Fonte: autoria própria.

5.2.6 Análise Termogravimetria (TGA/DTA)

Na análise do TGA/DTA foi possível identificar estágios de transformações e perdas na amostra. No primeiro estágio entre a temperatura ambiente e $396,29^\circ\text{C}$ a perda de massa

foi de 3,745%, relacionada à umidade higroscópica e água quimicamente combinada presentes na amostra. Os demais estágios apresentam características endotérmicas, tendo entre 396,29 °C e 627,58 °C uma perda de massa de 8,72% sinalizando a presença de material orgânico e formações de Silicato de cálcio (Ca₂SiO₄). Entre as temperaturas 627 °C e 721,10 °C (redução de 12,73%) e entre 721,10 °C e 989,24 °C (redução de 15,27%) a curva de decaimento de massa é praticamente linear, demonstrando a decomposição do carbonato de cálcio e decomposição de carbono residual e outros compostos voláteis, resultando na formação de óxido de cálcio e liberação de CO₂.

A redução total em massa foi de 40,46%, indicando uma grande presença de carbono na CP, indicando um processo de incineração de resíduos incompleto, possivelmente atrelado a faixa de temperatura (850 °C ~ 900 °C) no incinerador e o fator do tempo de permanência dos resíduos no incinerador. A Figura 33 apresenta as curvas obtidas para CP.

Figura 33 – Análise termogravimétrica das CP.



Fonte: autoria própria.

5.3 Avaliação ambiental por meio do extrato lixiviado

Os resultados pontuaram a presença de seis elementos dentre os 20 analisados, sendo contratado a presença de Ca, Ag, Fe, K, Al e Na. Alguns metais, a exemplo de Pb, Cr, Cu e Cd não foram detectados no lixiviado. Para (Ghazali *et al.* 2022; Bie *et al.* 2016; Lee 2009; Shi e Kan 2009a), a lixiviação de metais pesados como Zn, Cr, Cu, Pb e Cd em cinzas de fundo advindas da incineração de resíduos de saúde é muito inferior aos limites regulatórios

da Agência de Proteção Ambiental de Taiwan, associado que os conteúdos de metais pesados nos estudos diferiram drasticamente de uma cidade para outra. Yan *et al.* (2019), pontuaram que as concentrações de materiais dependem do sistema de combustão e a concentração de metais pesados está relacionada a quantidade e tipologia dos resíduos.

Na tabela 16, são apresentados os valores obtidos as concentrações diárias e a totalidade para CC e CP. O elemento Ca, apresentou as maiores concentrações totais em ambas as amostras, mostrando que com o processo de calcinação a redução da concentração desse elemento pode chegar 45,50%. Esse fenômeno de redução total em concentração é observado também com o Na, na ordem de 39,34%, destacando que em dois dias todas as concentrações de Na já seriam lixiviadas. O elemento K também tem um processo de lixiviação rápida em torno de uma semana. Os elementos (Ag e Fe) demonstram concentrações semelhantes e uniformizadas em ambas amostras.

Tabela 16 – Concentrações de elementos identificados nos lixiviados.

Dias	CC (mg/L)						CP (mg/L)					
	Ca	Ag	Fe	K	Al	Na	Ca	Ag	Fe	K	Al	Na
1	5,542	0,001	0,061	1,685	3,564	5,667	5,542	0,002	0,046	1,073	0,081	3,205
2	6,874	0,002	0,049	0,646	4,898	1,838	11,001	0,003	0,074	1,369	4,196	5,672
3	1,022	0,002	0,051	0,025	0,836	-	8,249	0,001	0,053	0,821	5,507	2,785
6	1,019	0,002	0,056	0,019	5,354	-	10,094	0,002	0,052	0,103	0,862	0,276
9	1,071	0,002	0,079	-	0,158	-	3,757	0,003	0,091	0,144	0,104	0,437
12	0,315	0,003	0,060	-	0,133	-	0,452	0,004	0,050	-	0,096	-
19	3,142	0,004	0,041	-	0,241	-	1,150	0,003	0,049	-	0,091	-
26	0,289	0,004	0,055	-	0,117	-	0,194	0,005	0,051	-	0,124	-
33	0,168	0,005	0,060	-	0,114	-	0,135	0,006	0,050	-	0,230	-
47	2,604	0,007	0,054	-	1,882	-	0,089	0,006	0,053	-	0,100	-
61	0,135	0,007	0,049	-	0,086	-	0,041	0,006	0,050	-	1,536	-
Total	22,181	0,040	0,616	2,375	17,383	7,505	40,704	0,041	0,618	3,510	12,927	12,374

Fonte: autoria própria.

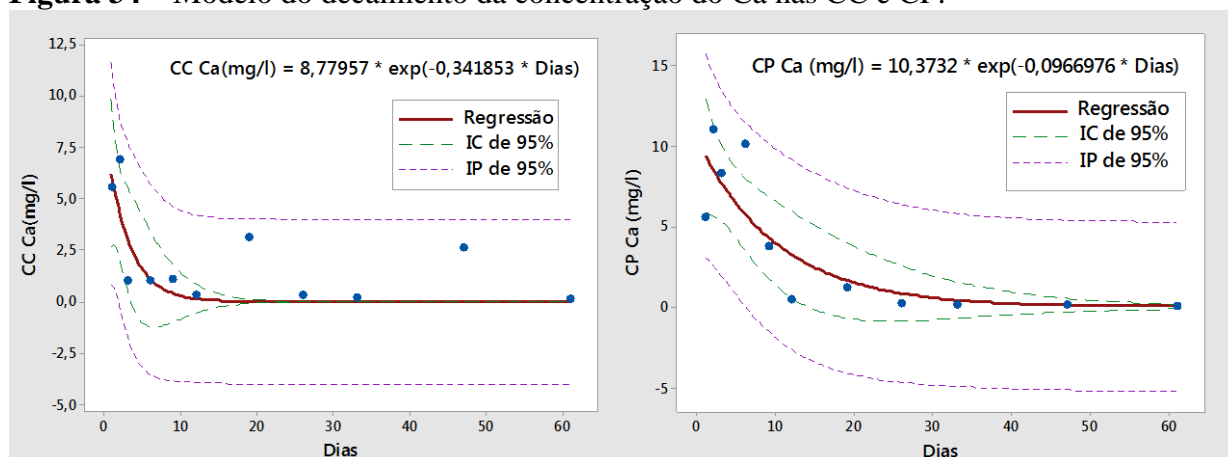
Diante das informações obtidas, buscou-se desenvolver uma modelagem matemática do sistema Cinzas-Lixiviado, construiu-se um modelo de transferência de elementos-traço, com base nos modelos compartimentais proposto por BASSANEZI e FERREIRA (1988). Devido ao comportamento dos valores das concentrações dos elementos-traço, foi proposto

um modelo determinístico de equações não lineares, conforme a disponibilidade de cada elemento-traço (Ca, Ag, Fe, K, Al e Na) no lixiviado.

Com o auxílio do programa estatístico Minitab 18, criou-se os modelos de regressão não linear, comparando as diferentes funções (potência convexa, logaritma, regressão convexa entre outras) a função exponencial foi à que melhor se ajustou as duas variáveis obtidas: concentração dos elementos no lixiviado e tempo (t). Dessa forma, obteve-se a equação pelo modelo exponencial de regressão $y = a \cdot \exp(-b \cdot x)$, representando o modelo de transferência dos elementos das cinzas para o lixiviado, sendo “a” é a concentração inicial em $x = 0$ quando $t = 0$, “x” relacionado ao tempo entre início/fim do ensaio, o valor de “b” a taxa de decaimento do elemento e “y” o teor de metal no lixiviado mensurado. Nas Figuras 17 a 22, são apresentadas as disposições gráficas, as equações exponenciais de regressão, as curvas com intervalo de confiança (IC) e intervalo de previsão (IP) ambos com 95%, para os elementos detectados nas amostras de CC e CP.

Após o período da pesquisa, observou-se as taxas de transferência (TT) dos elementos presentes nas cinzas para o lixiviado, utilizando-se a velocidade de decaimento ($\lambda = \lambda$) constante no tempo, obtido na equação de regressão e o acumulado de lixiviado durante o ensaio. Para as amostras de Ca (Figura 34), o acumulado foi de 22,18 mg/L e 40,704 mg/L para CC e CP, resultando uma TT de 7,58 e 3,93, respectivamente. O maior valor de λ , impulsiona a rapidez da transferência, possivelmente em virtude da menor granulometria na CC e na diferença na concentração inicial. Observa-se também que as concentrações mensuradas, estão entre os limites dos IP e a curva de regressão se alinha com o IC.

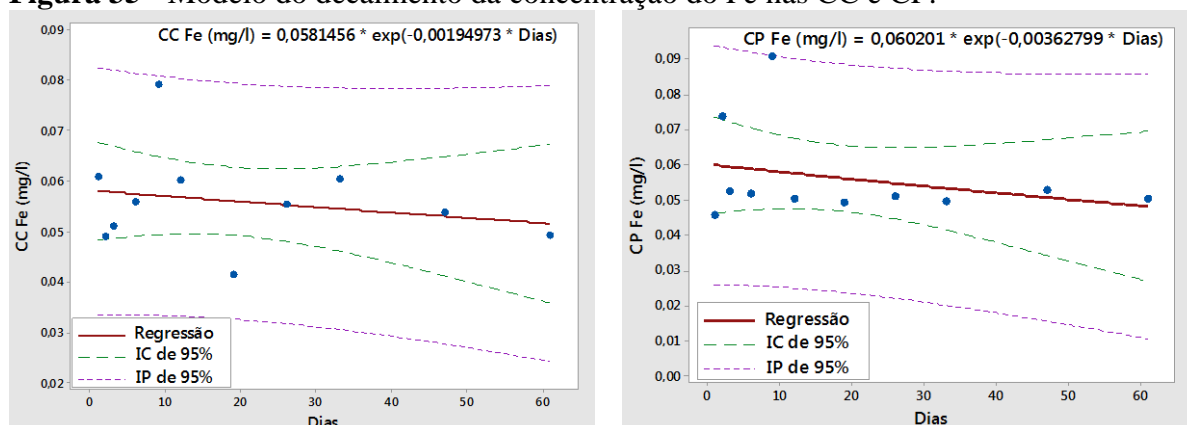
Figura 34 – Modelo do decaimento da concentração do Ca nas CC e CP.



Fonte: autoria própria.

Em relação ao elemento Fe, (Figura 35) foi possível determinar as TT, em 0,0012 e 0,0022, respectivamente para CC e CP, valores considerados bem baixos. É possível observar que uma linearidade das concentrações durante todo o período amostral. As concentrações totais (0,6157 mg/L e 0,6175 mg/L) são bem próximas o que demonstra um processo contínuo e lento de disponibilidade e liberação do elemento.

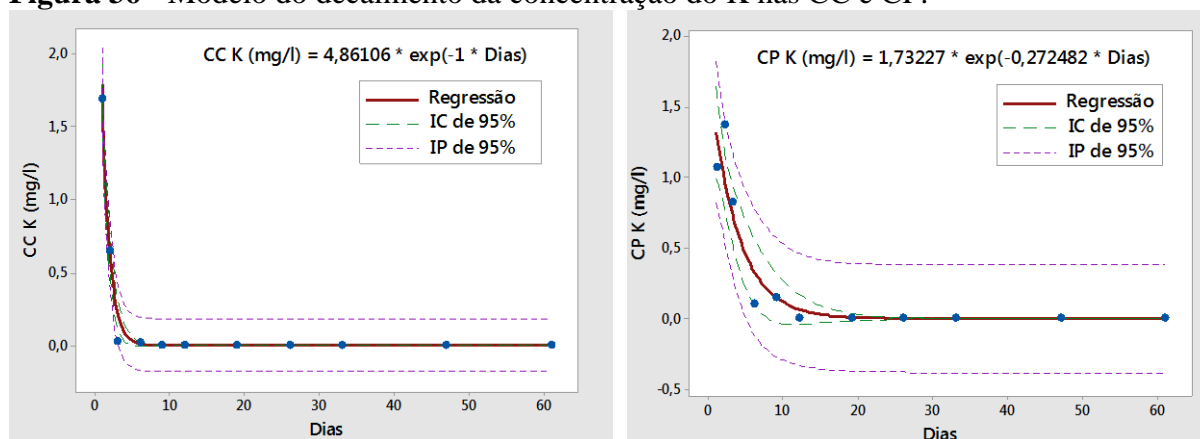
Figura 35 - Modelo do decaimento da concentração do Fe nas CC e CP.



Fonte: autoria própria.

Pode-se observar na figura 36 as curvas do elemento K, na CC após a quarta coleta de lixiviado (sexto dia) não se detectou mais o elemento, a TT mensurada foi de 2,3752, na CP a última detecção ocorreu na quinta coleta (nono dia), a TT foi de 0,9565. Vale destacar a transferência rápida e acentuada nos três primeiros dias, com valores superiores a 98% e 93% das concentrações totais nas CC e CP, respectivamente.

Figura 36 - Modelo do decaimento da concentração do K nas CC e CP.

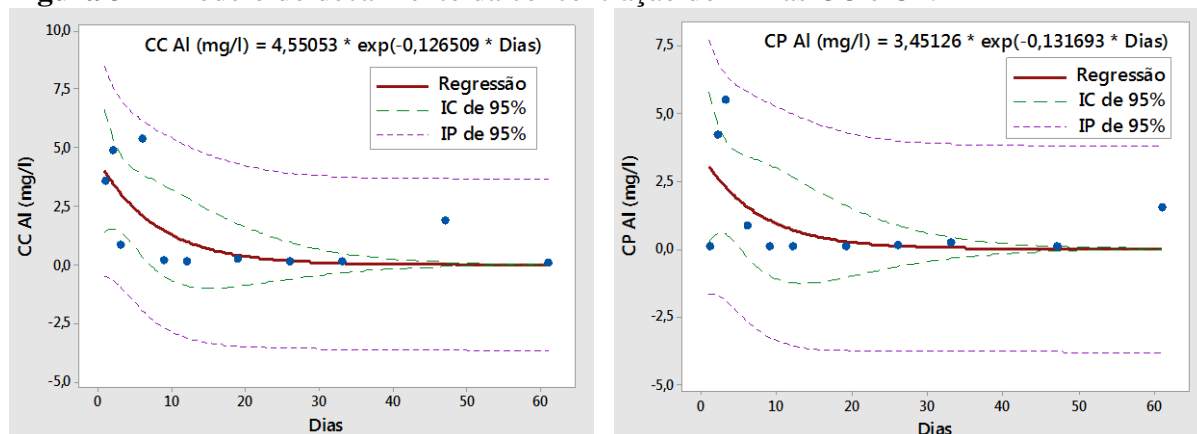


Fonte: autoria própria.

Na análise do elemento Al (Figura 37), os acumulados foram de 17,38 mg/L e 12,92 mg/L para as CC e CP. As velocidades de decaimento (0,1265 e 0,1316) apontam para TT

de 2,19 e 1,70, respectivamente, apontando um leve incremento na lixiviação do Al presente nas CC em relação a CP, evidenciando que a incineração acelera o processo de lixiviação.

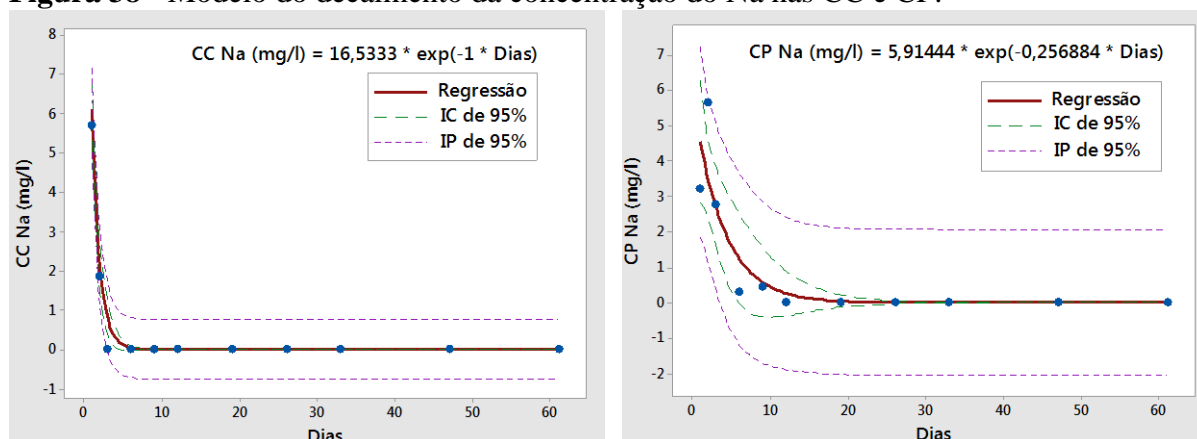
Figura 37 - Modelo do decaimento da concentração do Al nas CC e CP.



Fonte: autoria própria.

Em relação ao elemento Na, a figura 38 mostra uma velocidade de decaimento acentuada na CC em relação ao valor da CP, as TT mensurada foram de 7,50 e 3,17, respectivamente para CC e CP, quase 58% a menos de transferência do elemento entres os lixiviados estudados, corroborando com a indicação que com o aumento de temperatura, potencializa a formação de composto a exemplo do NaCl, KCl, CaSO₄ e Ca(OH)₂ como citados por Phua *et al* (2019) e Nowak *et al* (2012).

Figura 38 - Modelo do decaimento da concentração do Na nas CC e CP.

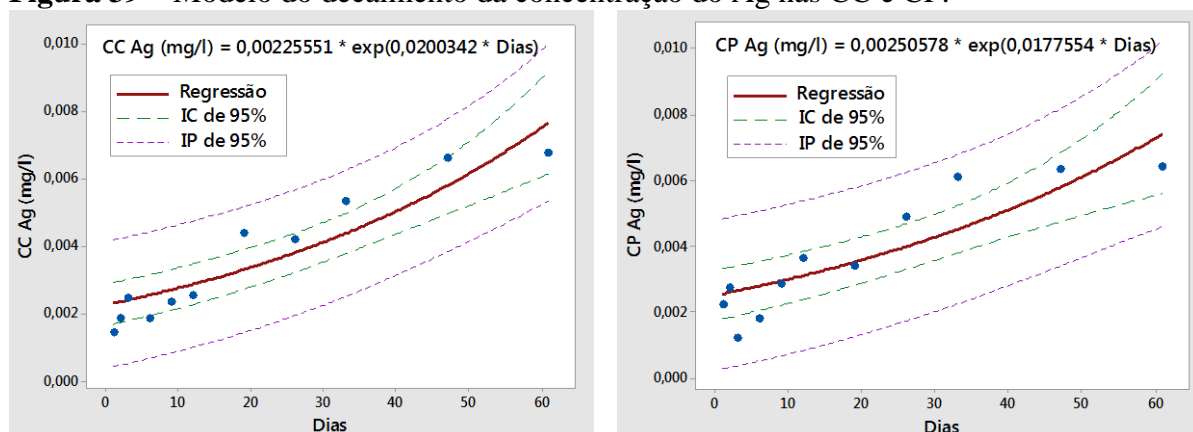


Fonte: autoria própria.

Para o elemento Ag (figura 39), diferentemente dos demais elementos analisados, as curvas mostram uma elevação das TF no tempo durante todo o período de ensaio. As concentrações totais foram de 0,0396 mg/L e 0,0414 mg/L, tendo as TT de 0,0008 e 0,0007

para CC e CP, respectivamente. O valor de incremento é baixo e positivo em ambos os casos. Entretanto, a duração do ensaio não foi suficiente para demonstrar uma melhor representatividade do elemento.

Figura 39 – Modelo do decaimento da concentração do Ag nas CC e CP.



Fonte: autoria própria.

A tabela 17, apresenta uma síntese das informações pontuadas, destacando as concentrações totais obtidas, a velocidade de decaimento constante no tempo e a taxa de transferência do sistema cinzas-lixiviado.

Tabela 17 – Síntese dos extratos de lixiviados mensurados

Material	Elemento	Concentração	λ (constante no t)	TT
		(mg/L)	(mg/t)	(mg/L.t)
CC	Ca	22,1808	0,3419	7,5826
	Fe	0,6157	0,0019	0,0012
	K	2,3752	1,0000	2,3752
	Al	17,3832	0,1265	2,1991
	Na	7,5048	1,0000	7,5048
	Ag	0,0396	0,0200	0,0008
CP	Ca	40,7036	0,0967	3,9359
	Fe	0,6175	0,0036	0,0022
	K	3,5103	0,2725	0,9565
	Al	12,9270	0,1317	1,7024
	Na	12,3741	0,2569	3,1787
	Ag	0,0414	0,0178	0,0007

Fonte: autoria própria.

Vale destacar que, comparando os dados obtidos para os elementos Fe e Ag na resolução CONAMA 430/2011, os limites permitidos para lançamentos são de 15 mg/L e de 0,1mg/L, respectivamente, tendo as concentrações encontradas (Fe = 0,6157 e 0,6175mg/L) e (Ag= 0,0396 e 0,0414 mg/L) inferiores aos determinados. Em relação a NBR 10004, o valor de referência da Ag é de 5mg/L, novamente o valor detectado é inferior. Dessa forma, é possível apontar que o lixiviado dos materiais analisados não contém metais pesados a exemplo de Pb, Cr e Cu e Cd e entre os elementos detectados, não ocorreu nenhuma amostra fora do padrão permitido pela legislação nacional.

5.4 Avaliação da Atividade Pozolânica

5.4.1 Ensaio de Fratini

A tabela 18 apresenta os resultados obtidos para a concentração de OH⁻ e CaO, permitindo avaliar a capacidade de saturação uma solução aquosa com o cimento hidratado, atribuindo a atividade de pozolanicidade ao material analisado.

Tabela 18 – Resultado do ensaio Fratini realizado aos 8 e 15 dias

Material	(mmol/L)		Resultado 8 dias	- (mmol/L)		Resultado 15 dias
	OH ⁻	CaO		OH ⁻	CaO	
Referência	62,95	8,25	Não pozolânico	65,30	7,95	Não pozolânico
90% CP II F + 10% CC	69,42	5,89	pozolânico	72,36	4,71	pozolânico
80% CP II F +20% CC	70,60	5,30	pozolânico	74,71	4,89	pozolânico

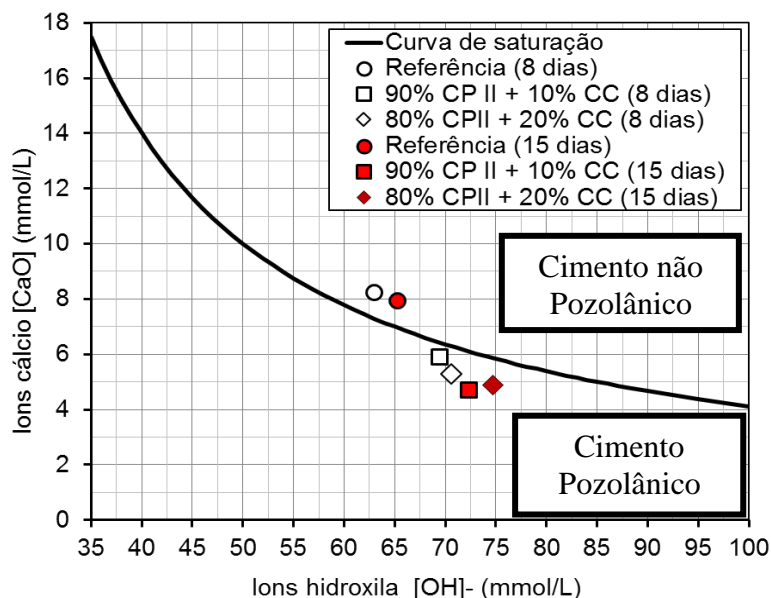
Fonte: autoria própria.

A amostra de referência contendo, apresentou a concentração de íons hidroxila da faixa de (62,95 e 65,30 mmol/L), atribuindo à solução um pH de 12,41 e resultados de CaO (8,25 e 7,95 mmol/L), demonstrando essa forma que os pontos correlacionados (figura 39) estão acima da curva de saturação, obtendo uma classificado como material não pozolânico. Essa proximidade dos valores nas diferentes idades, indica que a cinética de reação entrou em equilíbrio nos primeiros dias do ensaio (8 dias).

Observando as misturas com a presença de CC em sua composição, percebeu-se aumento na concentração de íons hidroxila em ambas as amostras, o valor obtido esteve na faixa de 70 mmol/L, reduzindo o pH para ordem de 12,35, tendo uma concentração de CaO

entre (5,89 e 4,71 mmol/L), apontando que os íons de cálcio da solução estão sendo consumidos para a precipitação de compostos hidratados decorrentes da atividade pozolânica. Os resultados experimentais apontam que as amostras com 10% e 20% de CC, estão abaixo da curva de saturação (figura 40), indicando que os compostos podem ser considerados cimento Portland pozolânico.

Figura 40 – Resultado dos ensaio de Fratini conforme NBR 5753/2016

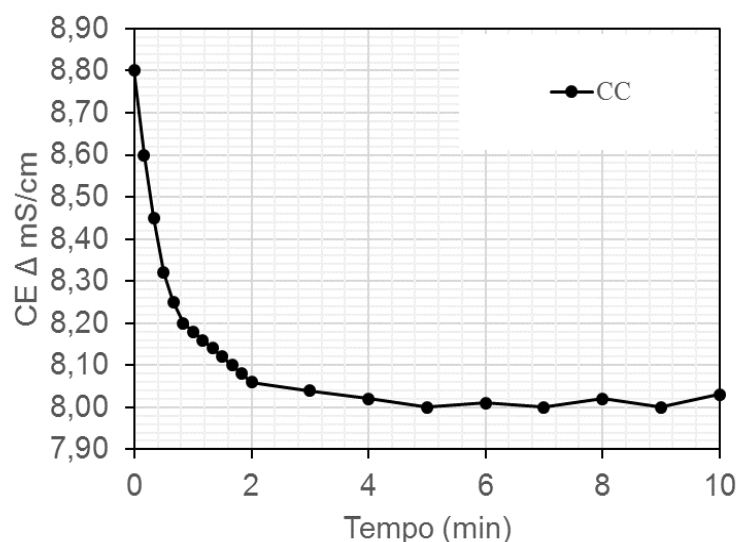


Fonte: autoria própria.

5.4.2 Condutividade elétrica (Luxán)

Os resultados obtidos para a CC com a variação de CE em função do tempo são apresentados na figura 41, em que durante os dois minutos iniciais apresentou uma variação de 0,74 mS/cm, sendo possível observar que o consumo de cal aconteceu de forma acelerada no primeiro minuto de leitura, chegando a atingir 83,78% de redução. No tempo estendido de 10 min, o valor atingiu a variação de 0,77 mS/cm. Pela classificação do material proposto por Luxán (1989), o resultado obtido enquadra a CC na faixa entre 0,4 a 1,2 mS/cm, designada como atividade pozolânica moderada.

Figura 41 – Resultados do ensaio de CE.



Fonte: autoria própria.

5.4.3 Avaliação do IAP – NBR 5752/2014

A tabela 19 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de IAP, destacando que ao avaliar os requisitos físicos de RC em substituição ao cimento Portland aos 28 dias de cura, obteve-se o IAP de 77,57% para a CC (argamassa B) em relação a referência (argamassa A), ambos os D.R.M obtidos estiveram abaixo de 6%, conforme estabelecido pela NBR 7215/2019. Esse valor encontrado para o IAP é inferior ao mínimo de 90% estabelecido pela NBR 12653/2014, demonstrando que o material não atingiu a propriedade por esse ensaio.

Tabela 19 – Resultado do Ensaio de IAP

Parâmetro	Argamassa A	Argamassa B
Índice de Consistência (mm)	263,4	257,5
Resistência Compressão (MPa)	25,85	20,05
Desvio relativo máximo (DRM) (%)	4,82	5,71
IAP (%)		77,57

Fonte: autoria própria

Analisando outros parâmetros indicados pela NBR 12653/2014, a partir dos resultados de composição química, observou-se um somatório de 13,31% e 22,68% dos percentuais de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ para CP e CC respectivamente no ensaio de FRX, denotando um desempenho químico insatisfatório para esse requisito da norma que indica teor acima de 70%. O não atendimento ao quantitativo de óxidos e a falta de resistência, indicam por esse método indireto que a CC não possui AP, contrariando ensaios diretos de

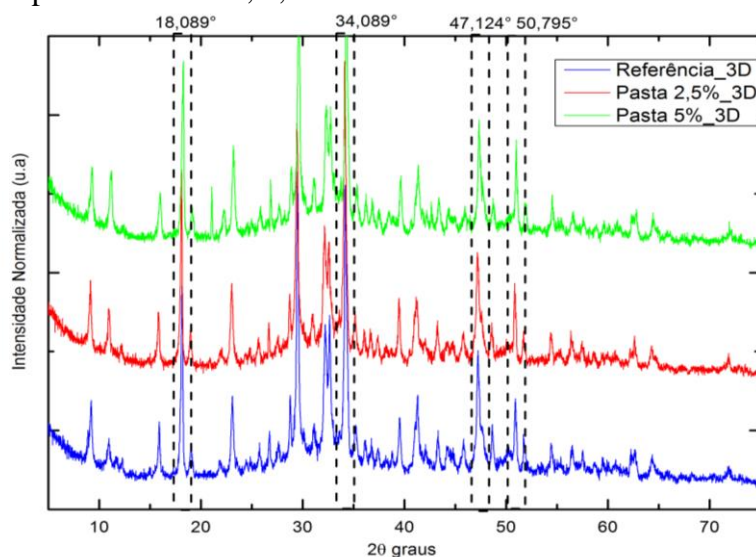
Fratinni e Luxán que indicaram atividade pozolânica. Vale destacar, que esse ensaio propõe uma substituição de 25% de cimento e perda inferior a 10% em relação a RC nas argamassas de controle e analisada.

Por outro lado, as CC apresentam um alto teor de CaO podendo desempenhar um alto potencial nucleador de particular e colaborar com ganho de resistência mecânica em compostos cimentícios quando em substituição de teores menores. Mehta e Monteiro (2014), argumentam a classificação adotada pela norma brasileira quanto ao teor mínimo do somatório dos óxidos de Si, Al e Fe. Eles apontam que parte deste percentual pode está na forma amorfa (não apresentando atividade pozolânica) e sim, propriedades cimentantes, desconsiderando os benefícios proporcionados pelos maiores teores a exemplo do CaO.

5.4.4 Avaliação da atividade pozolânica por pastas

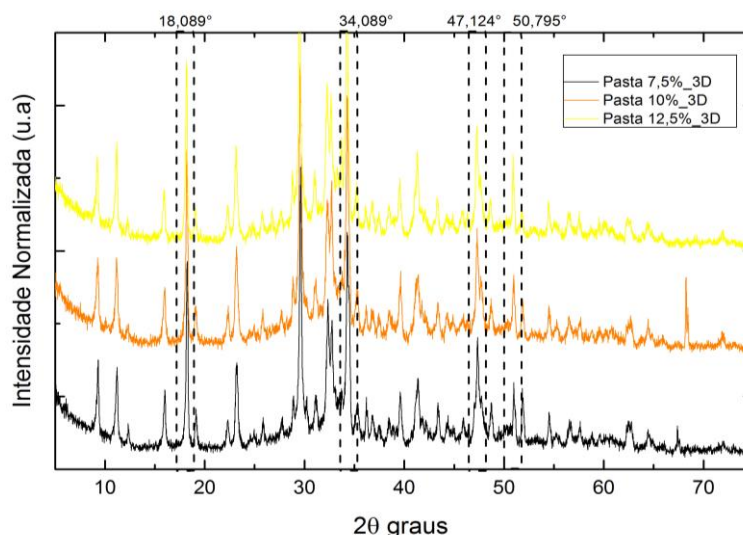
As figuras 42 e 43 apresentam os difratogramas que evidenciam a presença característica de picos de Portlandita para 2θ nos ângulos de $18,089^\circ$, $34,089^\circ$, $47,124^\circ$ e $50,795^\circ$ conforme destacados na literatura (NITA e JOHN, 2007).

Figura 42 – DRX pastas referência, 2,5% e 5% com 3 dias.



Fonte: autoria própria.

Figura 43 – DRX pastas 7,5%, 10% e 12,5 % com 3 dias.

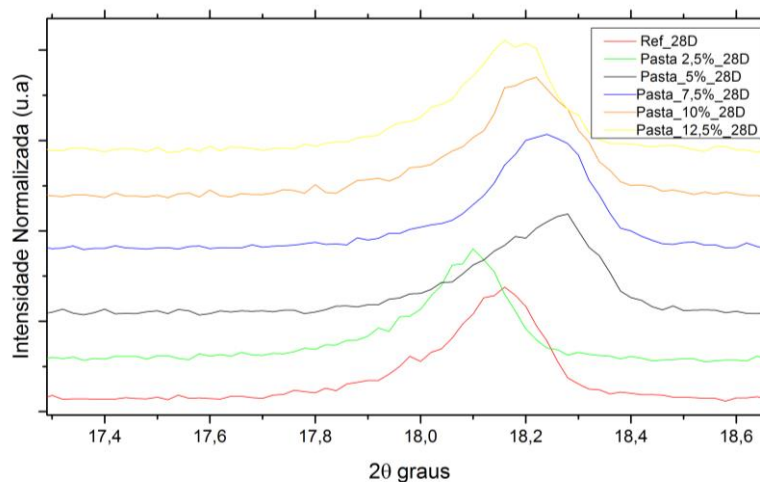


Fonte: autoria própria.

Nos difratogramas das figuras (44 a 47) são apresentados destaques para os quatro ângulos observados, nas referidas pastas com idade de 28 dias. Não é perceptível quantificar significativamente redução na produção da Portlandita ao longo do período. Os picos de referência, pastas 2,5% e pasta 5% apresentaram amplitudes mais bem definidas, ao tempo que com maior substituição dos percentuais (7,5%, 10% e 12,5%) ocorrendo um formato de abaulamento nesses picos, apontando possível redução da Portlandita.

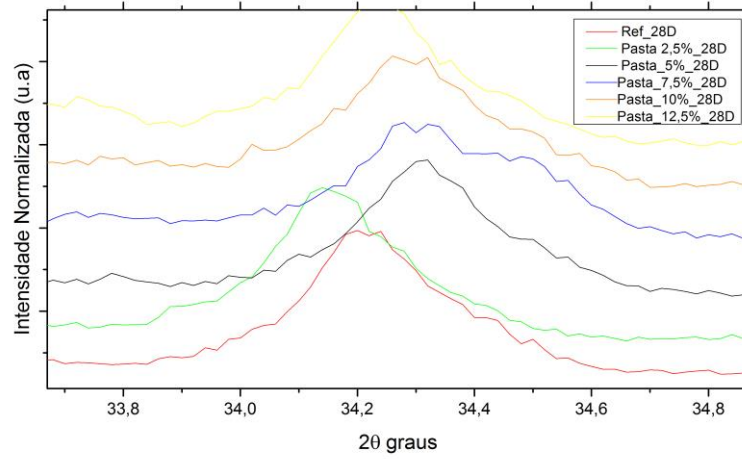
Partindo do princípio de que as pastas foram produzidas com uso do cimento sem pozolana em sua composição, as variações advindas estão vinculadas a presença da CC nas pastas, demonstrando um grau de atividade pozolânica mesmo que lento.

Figura 44 – Destaque dos picos de Portlandita no 18,089° nas pastas aos 28 dias.



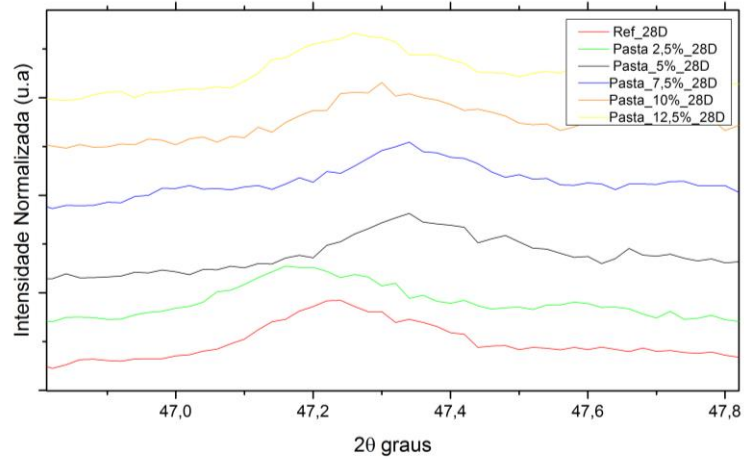
Fonte: autoria própria

Figura 45 - Destaque dos pico de Portlandita no 34,089°, nas pastas aos 28 dias.



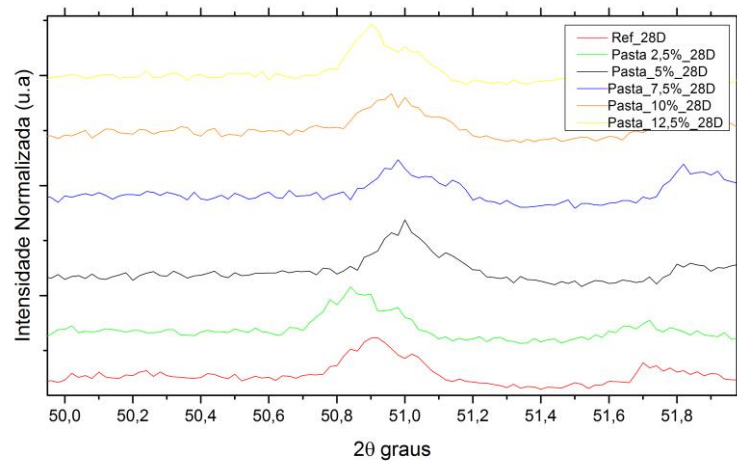
Fonte: autoria própria

Figura 46 - Destaque dos pico de Portlandita no 47,124° nas pastas aos 28 dias



Fonte: autoria própria

Figura 47 - Destaque dos pico de Portlandita no 50,795° nas pastas aos 28 dias



Fonte: autoria própria

Observando os resultados obtidos para todos os ensaios de atividade pozolânica, verifica-se nos difratômetros obtidos, uma leve redução dos picos de Portlandita aos 28 dias, que associado aos resultados de diminuição de condutividade elétrica pelo método de Luxán e o consumo de íons de CaO pelo método de Frattini, a presença das CC indicam um grau de atividade pozolânica existente no material. Por outro lado, o ensaio de IAP que quantifica a o somatório da composição química dos óxidos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ presentes no material e a resistência a compressão axial com substituição de 25% do cimento pelas CC, os resultados foram insatisfatórios.

Dessa forma, conclui-se que três ensaios sendo dois diretos (Frattini e Luxán) e um indireto (consumo de Portlandita) implicam na existência de atividade pozolânica nas CC, em contraponto o ensaio de análise indireta, regulamentado pela NBR 12653/2014 indica o material como não pozolânico. O ensaio normativo, desconsidera por exemplo percentuais de CaO que podem não apresentar reação pozolânica com o cimento, mas podem ser usados como efeito filler no empacotamento e preenchimentos de espaços vazios nas matrizes cimentícias, resultando ganho de propriedades mecânicas, a exemplo da RCA e PA.

5.5 Avaliação das matrizes cimentícias

5.5.1 Avaliação do Índice de Consistência

A tabela 20 apresenta os resultados obtidos para o IC das argamassas e substituição ao cimento e ao agregado miúdo, observando que o Desp médio das argamassas diminuiu consideravelmente a partir da incorporação dos percentuais de CC nos traços. A maior diferença de Desp em relação ao traço de referência em relação aos traços de 12,5% de substituição dos materiais. Os valores encontrados mostram variações percentuais que pode atingir a ordem de quase 10% nos diâmetros médios de controle em relação ao pior cenário dos traços em substituição ao cimento. Para a substituição ao agregado miúdo, a variação máxima foi de 8% em relação ao controle.

É importante frisar que a relação água/aglomerante foi a mesma em todos os traços ensaiados e que o aumento gradativo dos percentuais de CC, apontaram menores resultados de Desp sem padronização de redução. Dessa forma, o uso da CC com granulometria abaixo de 75 μm , possuindo menor área de superfície, podem ser a explicação dessa influência significativa nos Desp das argamassas produzidas em comparação à amostra de controle.

Tabela 20 - Índice de consistência das argamassas

Traços	Desp 1 (mm)	Desp 2 (mm)	Desp 3 (mm)	Média (mm)	DP	DRM NBR 7215 (%)
CPV_Referência	238,00	237,00	235,00	236,67	1,53	0,70
CPV_2,5%CC	225,00	223,00	231,00	226,33	4,16	1,47
CPV_5%CC	223,00	219,00	220,00	220,67	2,08	1,06
CPV_7,5%CC	217,00	218,00	218,00	217,67	0,58	0,31
CPV_10%CC	216,00	215,00	216,00	215,67	0,58	0,31
CPV_12,5%CC	214,00	214,00	213,00	213,67	0,58	0,31
AR_2,5%CC	232,00	230,00	233,00	231,67	1,53	0,72
AR_5%CC	230,00	226,00	227,00	227,67	2,08	1,02
AR_7,5%CC	222,00	223,00	221,00	222,00	1,00	0,45
AR_10%CC	219,00	219,00	217,00	218,33	1,15	0,61
AR_12,5%CC	212,00	213,00	214,00	213,00	1,00	0,47

Fonte: autoria própria

5.5.2 Avaliação da resistência a compressão axial – RCA

Os dados obtidos mostram que nas idades analisadas, um total de cinco amostras tiveram valores médios superiores a amostra de controle, sendo a amostra CPV_5%CC em substituição ao cimento com em torno de 10% em relação ao controle, as amostras com teores de 2,5% e 7,5% tiveram próximo de 90% da referência, demonstrando que os teores de substituição podem melhorar ou manter um percentual significativo na RC.

Em relação a substituição do agregado miúdo (areia), um total de quatro amostras obtiveram valores maiores de RC, tendo as amostras AR_5%CC e AR_7,5%CC ganhos na ordem de 27% e 35% acima da amostra de referência, esse elevado ganho pode ser explicado pela diferença granulométrica, ganho da densidade específica e tipologia da composição química que possibilitam um processo de hidratação da argamassa maior.

A tabela 21 apresenta os resultados dos ensaios de RC das argamassas com seus respectivos DP, coeficiente de variação (CV) e DRM na relação água/aglomerante 0,4.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão em argamassas.

Argamassa	7 dias					28 dias				
	RC (MPa)	D.P (%)	CV (%)	DRM (%)	RC/Ref (%)	RC (MPa)	D.P (%)	CV (%)	DRM (%)	RC/Ref (%)

CPV_Referência	16,20	0,56	3,44	3,89	100,00	24,14	1,49	6,16	5,46	100,00
CPV_2,5%CC	15,22	0,23	1,52	0,88	93,97	22,55	0,38	1,69	0,09	93,43
CPV_5%CC	16,67	0,64	3,81	4,40	102,92	26,67	0,64	2,38	2,75	110,51
CPV_7,5%CC	16,05	0,53	3,29	0,66	99,09	21,05	0,77	3,86	4,24	87,23
CPV_10%CC	13,71	0,21	1,56	0,90	84,65	20,05	1,28	6,36	7,27	83,05
CPV_12,5%CC	11,80	0,26	2,24	0,85	72,84	18,47	0,55	2,98	3,07	76,51
AR_2,5%CC	15,28	0,96	6,30	6,02	94,32	20,61	0,58	2,83	1,23	85,40
AR_5%CC	23,13	1,57	6,79	1,95	142,78	30,63	2,28	7,43	3,10	126,90
AR_7,5%CC	24,02	0,72	3,00	2,78	148,25	32,68	1,29	3,94	4,08	135,41
AR_10%CC	17,50	0,28	1,60	1,30	108,00	25,50	0,28	1,10	0,89	105,63
AR_12,5%CC	16,69	0,38	2,28	0,84	103,02	27,36	1,22	4,44	4,36	113,34

Fonte: autoria própria.

Em relação aos resultados da RC nas pastas (tabela 22), são apresentados os valores obtidos aos 3, 7 e 28 dias e seus respectivos D.P. Destaca-se que a amostra com 2,5% e 12,5% obtiveram valores superiores a 93% em relação ao controle com 28 dias de ensaio. Percebeu-se uma evolução no tempo da resistência em todos os traços estudados, nenhum traço com inclusão de CC teve resistência maior que o traço de controle. Os materiais (Pasta 2,5% CC e Pasta 12,5% CC) mantiveram resistência dentro da margem de DP da amostra de referência, as Pasta 5% CC e Pasta 7,5% CC, mantiveram na ordem de 87% do valor de resistência, indicando que a substituição das CC ao cimento pode manter uma elevada resistência dentro dessa faixa estudada.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de RC nas pastas

Material	3 dias		7 dias		28 dias		RC/Referencia (%) 28 dias
	RC (MPa)	DP (%)	RC (MPa)	DP (%)	RC (MPa)	DP (%)	
Pasta_Referência	32,77	0,83	40,51	0,87	48,93	3,26	100,00
Pasta_2,5%CC	31,93	0,94	38,86	1,15	48,33	3,48	98,78
Pasta_5%CC	31,75	1,55	39,60	0,79	42,54	0,56	86,94
Pasta_7,5%CC	27,39	1,82	34,88	1,13	42,64	0,77	87,14
Pasta_10%CC	25,49	0,35	34,06	1,34	35,84	0,83	73,24
Pasta_12,5%CC	30,05	1,07	36,97	1,02	45,66	1,47	93,32

Fonte: autoria própria.

Ao analisar os valores de RC para argamassas e pastas, percebe-se que a utilização da CC proporcionou manutenção e/ou elevação de percentuais da característica, indicando que a sua incorporação dentro do processo de produção de argamassa pode trazer redução para o consumo de cimento e/ou agregado miúdo sem comprometimento da argamassa, impulsionando ganhos energéticos com a redução da produção de cimento pela indústria, fatores ambientais pela mitigação da exploração de recursos naturais e emissão de CO₂ e possíveis vantagens econômicas dentro dos aspectos da construção civil e de economia circular.

5.5.3 Avaliação da porosidade aparente

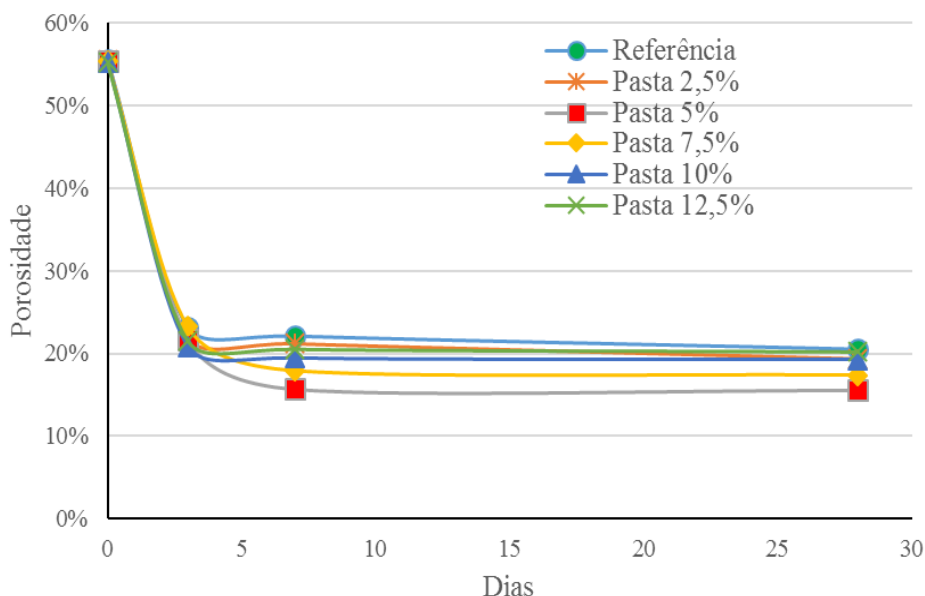
A tabela 23 apresenta a porosidade teórica (PT) inicial e os valores médios de PA das pastas com seus respectivos DP. Os resultados evidenciam que a PT das pastas pouco variou e o volume de vazios decresceu gradativamente ao longo do tempo, resultado das reações de hidratação dos aglomerantes. Na Figura 48 apresenta a variação da PA nas pastas na relação água/aglomerante 0,40.

Tabela 23 – Resultados dos ensaios de PA das pastas

Pasta	Porosidade	3 dias		7 dias		28 dias	
	Teórica (%)	PA (%)	DP(%)	PA (%)	DP(%)	PA (%)	DP(%)
Referência	55,52	23,11	1,04	22,10	0,77	20,51	2,04
Pasta 2,5%	55,45	21,87	1,34	21,17	0,81	19,33	1,88
Pasta 5%	55,38	21,64	2,38	15,67	2,84	15,54	2,15
Pasta 7,5%	55,32	23,20	2,96	17,93	1,32	17,39	1,39
Pasta 10%	55,25	20,82	1,40	19,44	1,86	19,26	2,26
Pasta 12,5%	55,19	21,47	3,21	20,50	2,33	20,17	2,73

Fonte: autoria própria.

Figura 48 – Porosidade aparente das pastas



Fonte: autoria própria.

As pastas contendo CC em sua grande maioria apresentaram pequena redução nos teores de porosidade em relação a pasta de controle. Vale ressaltar a pasta 5% que obteve uma redução do valor da PA superior a 24% em relação ao controle, esse valor significativo encontrado nessa amostra indica uma ocupação de vazios de forma eficiente, entretanto não representado em ganho de resistência.

Em relação à porosidade das argamassas, a tabela 24 apresenta os valores encontrados, observando uma variação acentuada quando da retirada de cimento e areia e substituição por CC, situação explicada pela variação de densidade dos materiais. Os dados obtidos apontam que a PA no sétimo de ensaio, se mantiveram sem variações significativas. Aos 28 dias ocorreram oscilações de porosidades nas amostras com redução significativa em todas as argamassas, entende-se que com o aumento da idade acontece as reações de hidratação dos aglomerantes diminuindo os espaços de vazios.

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de PA em argamassas.

Argamassa	Porosidade Teórica (%)	7 dias		28 dias	
		PA (%)	DP (%)	PA (%)	DP (%)
CPV_Referência	24,59	19,15	2,50	16,12	1,58
CPV_2,5%CC	24,63	19,37	2,65	18,01	2,38
CPV_5%CC	24,64	20,57	5,27	18,35	3,33
CPV_7,5%CC	24,68	17,98	5,00	17,62	3,17

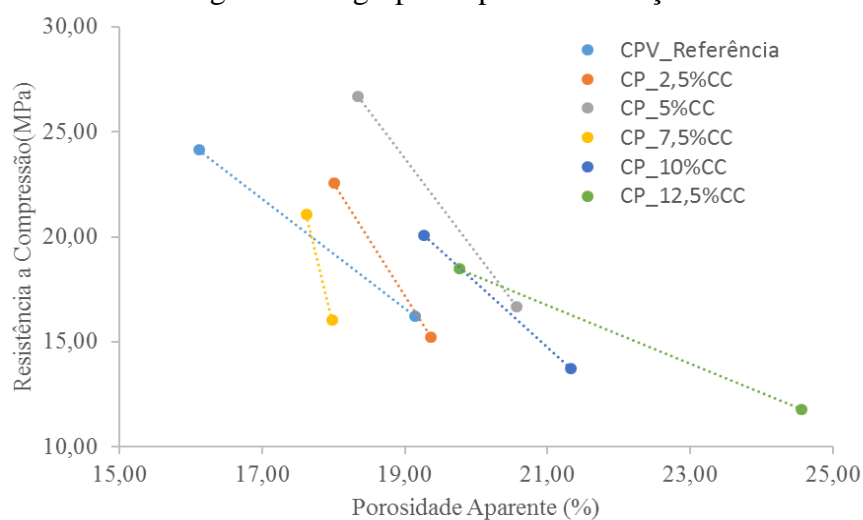
CPV_10%CC	24,70	21,33	2,52	19,27	2,00
CPV_12,5%CC	24,72	22,32	2,21	19,76	1,85
AR_2,5%CC	25,92	20,02	2,14	19,56	2,02
AR_5%CC	27,19	20,44	1,13	19,79	1,13
AR_7,5%CC	28,44	20,89	1,29	18,75	1,10
AR_10%CC	29,64	21,98	1,81	20,95	0,95
AR_12,5%CC	30,81	22,32	2,21	21,10	1,54

Fonte: autoria própria.

5.5.4 Relação RC x PA nas argamassas

As figuras 49 e 50 apresentam as relações e as equações da substituição das CC em relação ao cimento e a areia, detectado que, à medida que a porosidade diminui aumenta-se a resistência em todas as argamassas analisadas. Identificou-se que as CC têm um efeito de preenchimento dos vazios de forma significativa quando utilizada na substituição do agregado miúdo.

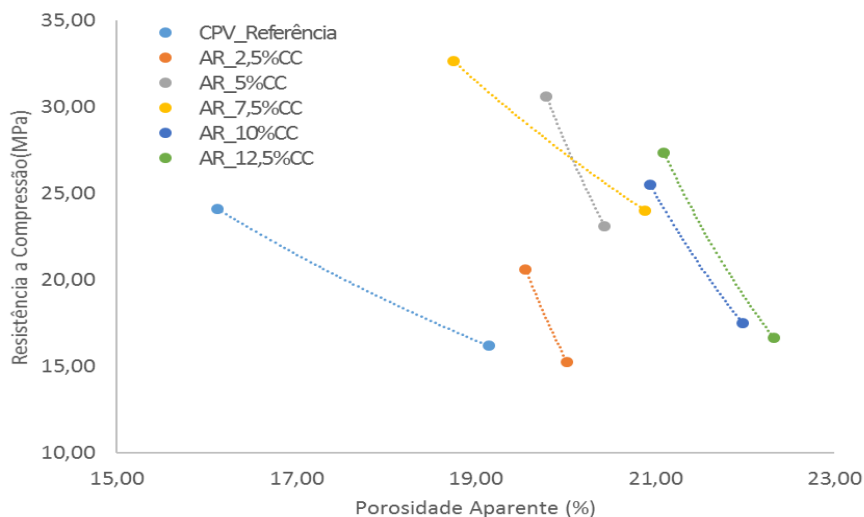
Figura 49 – RC e PA das argamassas agrupados para substituição ao cimento



Argamassa – Equações Exponenciais	
CPV_Referência RC = $201,34e^{-0,132p}$	CPV_7,5%CC RC = $1E+07e^{-0,753p}$
CPV_2,5%CC RC = $4112,3e^{-0,289p}$	CPV_10%CC RC = $701,95e^{-0,185p}$
CPV_5%CC RC = $1297,1e^{-0,212p}$	CPV_12,5%CC RC = $117,27e^{-0,094p}$

Fonte: autoria própria.

Figura 50 – RC e PA das argamassas agrupados para substituição a areia



Argamassa – Equações Exponenciais	
CPV_Referência RC = $201,34e^{-0,132p}$	AR_7,5%CC RC = $486,14e^{-0,144p}$
AR_2,5%CC RC = $7E+06e^{-0,651p}$	AR_10%CC RC = $54027e^{-0,366p}$
AR_5%CC RC = $151769e^{-0,43p}$	AR_12,5%CC RC = $140834e^{-0,405p}$

Fonte: autoria própria.

5.5.5 Avaliação das argamassas com CC + FC

Na tabela 25 são apresentados os resultados para o IC e Desp das argamassas produzidas com composições de CC + FC, tendo as amostras CPV_2,5%CC_FC e controle sem diferenças no Desp médio, na ordem de 234 mm. Observou-se reduções significativas de 8,07% e 6,15% para as amostras com 5% e 7,5% de CC + FC, respectivamente. Essa explicação ocorre pela variação da presença de finos na argamassa relação ao controle. Cecol (2019) identificou que argamassas com presença de FC, tendem ao maior consumo de água para manter uma mesma consistência em relação a referência, podendo chegar a 12% de variação, os valores encontrados estão dentro do esperado.

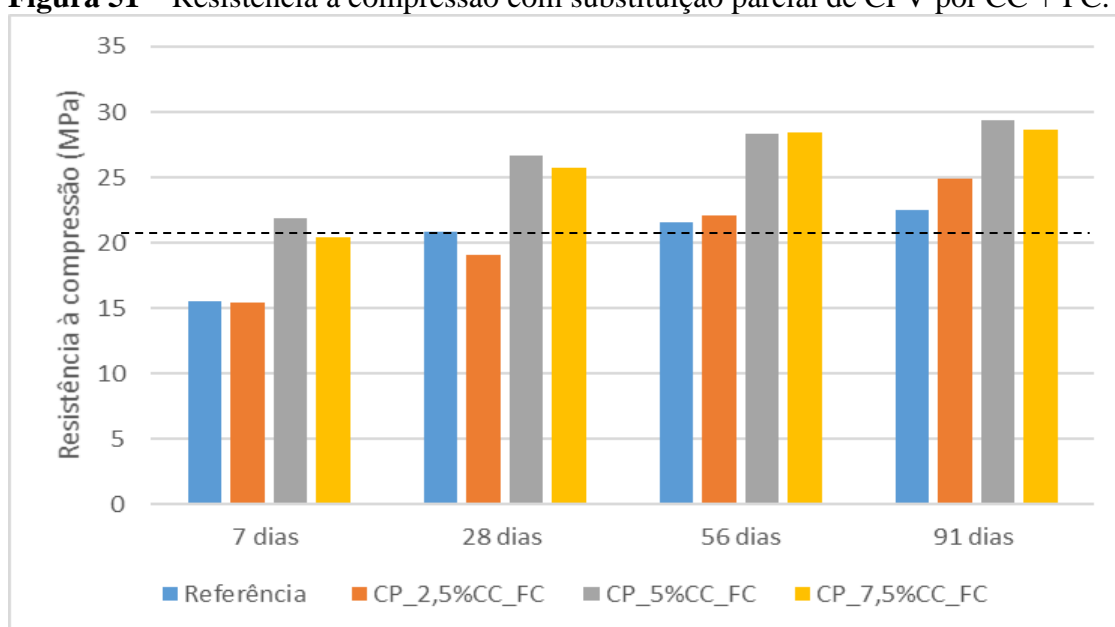
Tabela 25 – Índice de consistência das argamassas produzidas com CC + FC.

Traços	Média (mm)	DP (%)	DRM (%)
CPV_Referência CC_FC	234,20	0,31	1,60
CPV_2,5%CC_FC	234,70	0,78	3,55
CPV_5%CC_FC	215,30	0,50	3,40
CPV_7,5%CC_FC	219,80	0,25	1,44

Fonte: autoria própria

A figura 51 apresenta os dados com utilização de CC + FC em substituição ao cimento CPV_ARI. Em que aos 7 dias, foi possível observar um acréscimo na resistência a compressão na ordem de 41,07% e 31,46% das argamassas com 5% e 7,5% de substituição ao traço de referência. Aos 28, 56 e 91 dias o valor de resistencia do traço de referência praticamente estabilizou na faixa entre 21 e 22 MPa, enquanto os traços com 5% e 7,5% obtiveram valores de incremento em média na faixa de 30% e 27%, demonstrando que uma composição de finos entre cimento + CC + FC representaram ganhos significativos para a argamassa.

Figura 51 – Resistência à compressão com substituição parcial de CPV por CC + FC.



Fonte: autoria própria

A tabela 26 apresenta os resultados médios obtidos para a PA das argamassas compostas por CC + FC. Observa-se em todas as idades uma redução da porosidade nos traços que contém a inclusão das CC + FC. Em algumas idades a diminuição dos espaços vazios foi superior a 20% em relação ao controle.

Tabela 26 – Resultados dos ensaios de porosidade aparente nas argamassas com CC + FC.

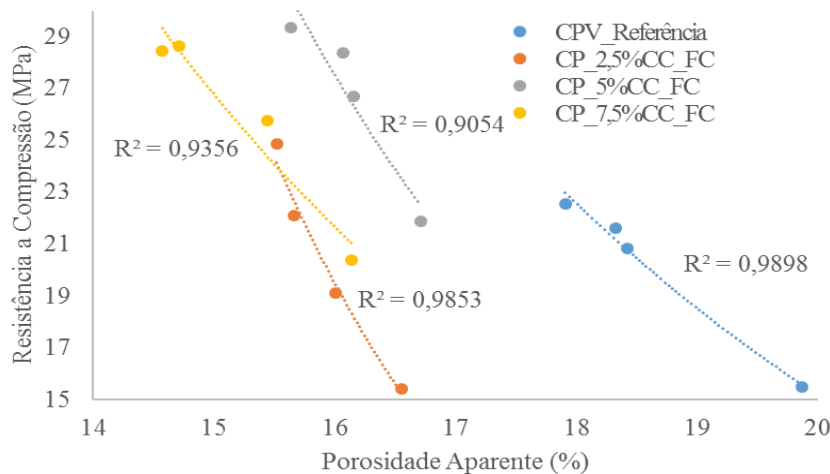
Argamassa	7 dias		28 dias		56 dias		91 dias	
	PA (%)	DP (%)	PA (%)	DP (%)	PA (%)	DP (%)	PA (%)	DP (%)
CPV_Referência CC_FC	19,87	0,32	18,42	1,09	18,63	1,20	18,91	0,74
CPV_2,5%CC_FC	16,55	0,45	17,01	2,65	18,66	2,09	18,92	1,12

CPV_5%CC_FC	16,31	1,37	17,16	1,57	16,57	1,87	16,64	1,95
CPV_7,5%CC_FC	14,14	1,78	15,44	3,54	14,57	2,33	14,71	2,11

Fonte: autoria própria.

A figura 52 apresenta a relação entre a RC e PA para argamassas com percentuais de CC + FC, destacando de forma bem acentuada que quanto menor for a porosidade aumentase a resistência. A associação entre CC + FC acentuou ainda mais o efeito de preenchimento dos vazios em relação as argamassas com substituição do cimento e agregado miúdo.

Figura 52 - Resistência à compressão e porosidade das argamassas agrupados para CC+FC.



Argamassas – Equações Exponenciais

CPV_Referência CC_FC RC = $793,96e^{-0,198pa}$	CPV_5%CC_FC RC = $2604,6e^{-0,284pa}$
CPV_2,5%CC_FC RC = $23723e^{-0,444pa}$	CPV_7,5%CC_FC RC = $640,59e^{-0,212pa}$

Fonte: autoria própria.

Em relação à análise dos resultados mecânicos obtidos para os ensaios com argamassas envolvendo a substituição de CC+ FC, a composição mostrou dados satisfatórios de manutenção de trabalhabilidade (consistência), atrelados à diminuição significativa de espaços vazios, (porosidade) o que implicou no ganho acentuado de RC, destacando entre as principais características quando a aplicação de argamassa em médio e longo prazo.

5.5.6 Análise estatística

A tabela 27 traz os resultados obtidos para a análise ANOVA individual e comparativa entre as propriedades estudadas de RC e PA com análise de forma independente por grupo de substituição e idade. Os dados mostram que das doze análises

realizadas nas propriedades, apenas a relacionada a PA na substituição de areia aos 7 dias teve a hipótese H_1 rejeitada, indicando que essa propriedade não apresentou efeitos significativos nessa idade. Vale ressaltar que o valor de p encontrado de 0,061 nessa amostra rejeitada, é um valor próximo do limite de confiança de 0,05, indicando que a característica com o passar dos dias pudesse apresentar diferenças significativa, algo que ocorreu nas amostras mensuradas com 28 dias.

Tabela 27 – Resultados ANOVA para argamassas contendo substituição de cimento, agregado miúdo e com combinação CC + FC.

Grupo de Amostras/Idade	Idade	SQ	GL	QM	F	valor-P	Efeito significativo
RC	7	51,82	5	10,36	53,48	0,0004	H_1 aceito
CC_cimento	28	131,28	5	26,25	29,79	0,0002	H_1 aceito
RC	7	209,95	5	41,99	76,86	0,0001	H_1 aceito
CC_Areia	28	282,98	5	56,59	39,22	0,0001	H_1 aceito
RC	7	99,50	3	33,17	13,95	0,002	H_1 aceito
CC+FC_cimento	28	122,05	3	40,68	14,28	0,001	H_1 aceito
PA	7	35,23	5	7,04	6,88	0,003	H_1 aceito
CC_cimento	28	24,90	5	4,97	3,94	0,024	H_1 aceito
PA	7	21,51	5	4,30	2,89	0,061	H_0 aceito
CC_Areia	28	49,94	5	9,98	4,94	0,011	H_1 aceito
PA	7	50,32	3	16,77	73,74	0,0001	H_1 aceito
CC+FC_cimento	28	24,15	3	8,05	68,51	0,0001	H_1 aceito

Fonte: autoria própria.

SQ = Soma Quadrada; GL = Graus de liberdade; MQ = Média quadrada; F = Valor calculado de F; Valor - P = Nível de significância; Fc = F Crítico; Se $p < 5\%$ e $F_c < F$, o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

A tabela 28 apresenta quatro agrupamentos estatísticos realizados por Tukey, tendo a amostra CPV_5%CC o melhor resultado médio de RC com 7 e 28 dias, porém sem diferença significativa para a amostra CPV_Referência. A amostra CPV_12,5%CC teve o pior desempenho para o parâmetro analisado com redução média significativa de quase 23% em relação a amostra de controle do grupo com 28 dias, indicando que percentuais elevados produzem uma perda significativa de RC.

Tabela 28 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x RC para amostras com substituição do cimento por CC aos 7 e 28 dias

Argamassa	Média (MPa) 7 dias	Média (MPa) 28 dias
CPV_5%CC	16,67 a	26,67 a
CPV_Referência	16,20 a, b	24,13 a, b
CPV_7,5%CC	16,05 a, b	21,05 c
CPV_2,5%CC	15,22 b	22,55 b, c
CPV_10%CC	13,71 c	20,04 c,d
CPV_12,5%CC	11,80 d	18,46 d

Fonte: autoria própria. *Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Na tabela 29, foram detectados três e quatro agrupamentos para as amostras com substituição do agregado miúdo (areia) aos 7 e 28 dias respectivamente, tendo a amostra de AR_7,5%CC e AR_5%CC os melhores resultados médios e com diferença significativa para as amostras AR_2,5%CC e CPV_Referência que apresentaram os piores desempenhos do parâmetro. A diferença entre as amostras AR_7,5%CC e CPV_Referência, foi na ordem de 26%, indicando um ganho significativo nesse percentual aos 28 dias.

Tabela 29 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x RC para amostras com substituição ao agregado miúdo (areia) por CC aos 7 e 28 dias.

Argamassa	Média (MPa) 7 dias	Média (MPa) 28 dias
AR_7,5%CC	24,02 a	32,68 a
AR_5%CC	22,98 a	30,31 a, b
AR_10%CC	17,49 b	27,35 b, c
AR_12,5%CC	16,69 b, c	25,49 c
CPV_Referência	16,20 b, c	24,13 c
AR_2,5%CC	15,28 c	20,61 d

Fonte: autoria própria. *Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Na tabela 30, que trazem as análises com 7 e 28 dias para uso de CC + FC em substituição ao cimento e verificando a propriedade de RC, identificou-se dois agrupamentos, o primeiro “A” composto pelas amostras CPV_5%CC_FC e CPV_7,5%CC_FC e o segundo “B” contendo as amostras CPV_Referência CC_FC e CPV_2,5%CC_FC sem diferença significativa entre os grupos. A média da melhor amostra identificada, apresentou ganho de 28% em relação a pior amostra do grupo com 28 dias.

Tabela 30 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x RC para amostras com substituição ao cimento por CC + FC aos 7 e 28 dias.

Argamassa	Média (MPa) 7 dias	Média (MPa) 28 dias
-----------	--------------------	---------------------

CPV_5%CC_FC	21,87 a	26,70 a
CPV_7,5%CC_FC	20,39 a	25,70 a
CPV_Referência CC_FC	15,51 b	20,84 b
CPV_2,5%CC_FC	15,43 b	19,12 b

Fonte: autoria própria. *Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Em síntese, a partir da análise estatística dos grupos de amostras para os ensaios de RC, é possível afirmar que as amostras CPV_5%CC, AR_7,5%CC e CPV_5%CC_FC tiveram desempenhos satisfatórios ou iguais em relação as amostras de referências e outras analisadas em cada grupo de forma individual. O uso de percentuais de CC isolada ou composto de CC + FC em substituição ao cimento ou agregado miúdo, possibilita interferência significativamente positiva da propriedade analisada de RC.

Observando os dados dos ensaios de PA (tabelas 31) para substituição de cimento por CC, destacados de forma individual por tipo de argamassa, podemos constatar que com sete dias de ensaio existiram três classificações de agrupamento, sendo reduzida para duas posteriormente. A tendência da propriedade foi diminuição dos valores médios em todas as amostras, apontando que não existe diferença significativa entre as amostras nesse parâmetro com presença de CC. A argamassa CPV_12,5%CC teve o maior valor médio de PA. A amostra de referência apresentou diferença significativa das demais aos 28 dias.

Tabela 31 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x PA nas amostras com substituição do cimento por CC aos 7 e 28 dias.

Argamassa	Média PA(%) 7 dias	Média PA(%) 28 dias
CPV_12,5%CC	22,12 a	19,76 a
CPV_10%CC	21,33 a, b	19,27 a
CPV_5%CC	20,57 a, b, c	18,35 a, b
CPV_2,5%CC	19,37 a, b, c	18,01 a, b
CPV_Referência	19,15 b, c	16,12 b
CPV_7,5%CC	17,98 c	17,62 a, b

Fonte: autoria própria. *Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Na tabela 32, são apresentados os dados das CC em substituição ao agregado miúdo, apontando que não existiu diferença significativa nas amostras no sétimo dia. Com 28 dias de ensaios ocorreu a tendência da diminuição dos valores médios em todas as amostras, semelhante ao observado com cimento. É possível afirmar que o uso de 10% e 12,5% de CC alteram a PA de forma negativa quando em substituição ao agregado miúdo.

Tabela 32 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x PA nas amostras com substituição ao agregado miúdo (areia) por CC aos 7 e 28 dias.

Argamassa	Média PA(%) 7 dias	Média PA(%) 28 dias
AR_12,5%CC	22,32 a	21,10 a
AR_10%CC	21,98 a	20,95 a
AR_7,5%CC	20,89 a	18,75 a,b
AR_5%CC	20,44 a	19,79 a,b
AR_2,5%CC	20,02 a	19,56 a,b
CPV_Referência	19,15 a	16,12 b

Fonte: autoria própria. *Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Na tabela 33 são apresentados os dados para uso das CC + FC em substituição ao cimento com 7 e 28 dias, apontando a existência de três grupos e com diferenças significativas nas amostras. Na idade de 28 dias, observa-se diminuição dos valores médios nas amostras em percentuais menores quando comparados com os outros ensaios de porosidade. É possível afirmar que o uso de CC + FC alteram positivamente a PA da argamassa em substituição ao cimento.

Tabela 33 – Agrupamento usando método de Tukey: argamassa x porosidade aparente nas amostras com substituição ao cimento por CC + FC aos 7 e 28 dias

Argamassa	Média PA(%) 7 dias	Média PA (%) 28 dias
CPV_Referência CC_FC	19,87 a	18,42 a
CPV_2,5%CC_FC	16,55 b	16,01 b
CPV_5%CC_FC	16,31 b	16,16 b
CPV_7,5%CC_FC	14,14 c	14,44 c

Fonte: autoria própria. *Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

É possível afirmar que as amostras contendo CC + FC tiveram melhorias satisfatórias nas argamassas estudadas. O uso da CC de forma isolada em substituição ao cimento ou ao agregado miúdo entre 2,5% e 7,5% tiveram desempenho semelhante a amostra de controle, demonstrando que essa faixa de CC não compromete a PA, percentuais maiores de substituição, apresentaram desempenho diferente e interferência significativamente negativa da propriedade analisada.

6. CONCLUSÕES

A partir dos ensaios para caracterização e os experimentos usando as cinzas oriundas da incineração de resíduos perigosos industriais, é possível chegar nas seguintes conclusões:

- A cinza bruta, denominado de cinza pesada (CP) possui uma composição química elementar com elevado teor de matéria orgânica, na ordem de 43,82% do material conforme ensaios de COT, identificando a presença de Ca, Al, Si, Fe entre outros elementos em menores percentuais que possivelmente possam ter outras aplicações, a exemplo da agricultura;
- A cinza calcinada (CC), após o processo de beneficiamento com a queima completa e moagem, apresentou características físicas com massa específica de 2,80 g/cm³, teores de 50,8% de óxido de cálcio (CaO) e 13,2 % de sílica (SiO₂) em sua composição, perda ao fogo na ordem de 2,0%, granulometria em que 50% das partículas menores que 95,43 µm e superfície específica de 0,515 m²/g.
- Em relação aos ensaios de lixiviação, mesmo destacando o curto período de análise, foi possível detectar a presença dos elementos (Ca, Ag, Fe, K, Al e Na), apresentando as maiores concentrações e taxas de decaimento nas amostras de CP em comparação a CC;
- Para análise da atividade pozolânica, no ensaio de Frattini detectou-se que a presença das CC aumentou a concentração de OH⁻ para a faixa de 70 mmol/L, reduzindo a concentração de CaO entre 4,71 mmol/L indicando que as amostras são cimento pozolânico; no ensaio de condutividade apresentou uma variação de 0,74 mS/cm, enquadrando o material como atividade pozolânica moderada, segundo Luxán (1989);
- No ensaio de IAP, a composição química mensurada das CC foi de 22,68% dos percentuais de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ e a resistência a compressão obteve-se 77,57% em relação ao valor de referência, ambos parâmetros inferiores aos estabelecido pela NBR 12653/2014, não sendo enquadrado com material pozolânico;

- Em relação ao consumo Portlandita, os ensaios de DRX das pastas indicaram, qualitativamente, picos crescentes de Portlandita para os ângulos 18,089°, 34,089°, 47,124° e 50,795° (2 theta) na amostra de referência. Por outro lado, as pastas com CC apresentaram redução crescente em todos os picos principais, demonstrando atividade pozolânica;
- A influência das CC nas pastas ocasionou a diminuição da porosidade aparente em todas os traços analisados, sendo o traço PASTA 5% com 24% de diferença o mais representativo em relação à pasta de referência;
- A presença das CC na composição das argamassas como aglomerante em substituição ao cimento, reduziu a resistência à compressão axial das argamassas com exceção da argamassa CPV_5%CC. Por outro lado, em relação à substituição do agregado miúdo todas as amostras apresentaram elevação da resistência em relação a referência, com exceção da amostra AR_2,5%CC. Destaca-se ganho na ordem de 35% na amostra de AR_5%CC;
- O uso de CC + FC em argamassas mostrou dados satisfatórios para diminuição da porosidade e elevação da resistência a compressão na ordem de 30% com substituição de 5% da composição.

Nesse sentido, conclui-se que a utilização de percentuais orbitando em 5% de CC, de forma isolada ou em conjunto com FC em substituição ao cimento ou agregado miúdo, o material se mostra tecnicamente viável, em virtude de apresentar grau de reatividade pozolânica, sendo obtidos percentuais de parâmetros com desempenho superiores a argamassa de referência.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

- Testar o uso da CP em outra área de conhecimento, a exemplo da incorporação do material como fertilizante na agricultura e afins;
- Avaliar a incorporação/uso da CP em solos deficitários e com passivos ambientais;
- Desenvolver uma rota de extração de elementos presentes nas cinzas;
- Verificar o comportamento e a influência da CC em temperaturas diferentes em pastas e argamassas com relações água/aglomerante diferente;
- Realizar moldagem de corpos de prova com composições de CC + FC que amplie a discussão do uso do material na matriz.

REFERÊNCIAS

ABABNEH A, AL-ROUSAN R, GHARAIBEH W, ABU-DALO M., **Recycling of pre-treated medical waste fly ash in mortar mixtures**. *J Mater Cycles Waste Manag* 22(1):207–220, 2020.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos de 2022**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 02 maio 2023.

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

_____. **NBR 10005: Sólidos -Lixiviação de resíduos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 7181: Análise Granulométrica**, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15895: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado**, Rio de Janeiro, 2010

_____. **NBR 15839: Caracterização reológica pelo método squeeze-flow**, Rio de Janeiro, 2010

_____. **NBR 5739: Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2007

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

_____. **NBR 5753: Cimento Portland - Ensaio de pozolanidade para cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 2016

_____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos**, Rio de Janeiro 2015

AHMARUZZAMAN, M. **A review on the utilization of fly ash. Progress in energy and combustion science**, v. 36, n. 3, p. 327-363, 2010.

ALONSO, G. M. M., **Análise crítica de dois modelos de avaliação de riscos à saúde humana: o caso da contaminação do solo por chumbo e cádmio em Santo Amaro – BA**, Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2015.

APOLONIO, P. H. *et al.* **Production of geopolymers using rice husk ash as supplementary source of silica**, *Cerâmica*, v. 66, pp. 172-178, 2020.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulin**. Porto Alegre, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1998.

BASSANEZI, R.C.; FERREIRA JÚNIOR, W. C. **Equações diferenciais com aplicações**. São Paulo: Editora Harbra, 1988. 572 p.

BIE R., CHEN P., SONG X., JI X., **Characteristics of municipal solid waste incineration fly ash with cement solidification treatment**. J Energy Inst 89(4):704–712, 2016.

BRASIL, **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Brasília, 2010.

BRASIL, **Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020 – Política Nacional de Saneamento Básico**, Brasília, 2010.

CECEL, R. T. **Influência do uso de filler calcário como material cimentício suplementar nas propriedades de fratura de pastas de cimento**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHANG C.Y., WANG C. F., MUI D., CHIANG H. L., **Application of methods (sequential extraction procedures and high-pressure digestion method) to fly ash particles to determine the element constituents: a case study for BCR 176**. J Hazard Mater 163(2):578–587, 2009.

CHANDLER A. J., EIGHMY T., HJELMAR O., KOSSON D., SAWELL S., VEHLLOW J, VAN DER S. H., HARTLÉN J., **Municipal solid waste incinerator residues**, Elsevier, acesso em 11 de maio de 2022, <https://www.elsevier.com/books/municipalsolid-waste-incinerator-residues/chandler/978-0-444-82563-6>, 1997.

CHAVÉZ, T.C.; CASTRO, L.J.; DÍAZ-BARRIGA, M.F; MONROY, F.M.. **Modelo Conceptual de Riesgo Ambiental por Arsénico y Plomo en el Distrito Minero de Santa María de la Paz, San Luis de Potosí, México**. Revista digital Científica y Tecnológica, v.9, p 1-25. 2011.

CHIARO, S. X., PETRY N. S., TIECHER F. B. C., KIRCHHEIM, A. P., **Avaliação da potencialidade de desenvolvimento da reação álcali-agregado de agregados oriundos de resíduos de ágata**. In: XII Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia, 2013, Cartagena. XII Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia, 2013.

CINCOTTO, M. A., COSTA, M. R. M. M., **Metodologia de caracterização de argamassas colantes**. Relatório Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

COLLIVIGNARELLI, C., SORLINI, S. **Reuse of municipal solid wastes incineration fly ashes in concrete mixture**, Waste Management, v. 22, (Jun), pp. 909-912, 2002.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº430 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrão de lançamento de efluentes complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005 do CONAMA.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso: 05 de janeiro de 2023.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 283, de 12 de julho de 2001. Dispõe sobre o tratamento e a destinação final dos resíduos dos serviços de saúde.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso: 05 de janeiro de 2023.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** 445f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

COUTINHO, A. S.; GONÇALVEZ, A. **Fabrico e propriedades do betão.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1997.

DAL MOLIN D., MASUERO A.B., PETRY N. A., SIMONE A. V., **Metodologia para Avaliação do Potencial Deletério de Resíduos em Matrizes Cimentícias: Contribuição à Norma de Desempenho.** 2016

DE BOOM A., DEGREGZ M., **Belgian MSWI fly ashes and APC residues: a characterisation study.** Waste Manag 32(6):1163–1170, 2012.

DE PAULA M. O., TINOCO I. F.F., RODRIGUES C. S., SILVA E. N., SOUZA C.F., **Avaliação da atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar.** Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, V.17, n.1, p.15-20, jan-fev., 2009.

DELLA, V. P.; HOTZA, D.; JUNKES, J.A.; OLIVEIRA, A.P.N. **Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz.** Química Nova. v. 29, n. 6, p. 1175-1179, 2006.

DEMBOVSKA, L., *et al.* **Effect of pozzolanic additives on the strength development of high performance concrete.** Procedia Engineering, v. 172, p. 202-210, 2017.

DEMPSEY, C.R., OPPELT, E.T., **Incineration of hazardous waste: a critical review update.** Air Waste 43, 25–73, 1993.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. R. **Comparison of test methods to assess pozzolanic activity.** Cement and Concrete Composites, v. 32, n. 2, p. 121-127, 2010.

FLOREA M, QUAAS L, BROUWERS H, SCHMIDT W, MSINJILI N., **MSWI by-products and immobilisates as concrete constituents.** Advances in Cement and Concrete Technology in Africa, 2nd International Conference, Dar es Salaam, Tanzania, 2016.

FREIRE, W.J.; BERALDO, A.L. **Tecnologia e Materiais Alternativos de Construção.** V1. Ed. UNICAMP, 2004.

GENAZZINI C, GIACCIO G, RONCO A, ZERBINO R., **Cement-based materials as containment systems for ash from hospital waste incineration.** Waste Manage 25(6):649–654. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.004>, 2005.

GEYER, R. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

GHAZALI E., JOHARI M. A. M., FAUZI M. A., NOR N. MD. **An Overview of Characterisation, Utilisation, and Leachate Analysis of Clinical Waste Incineration Ash,** Int J Environ Res 1-22, 2022.

GOBBI, A. **Atividade Pozolânica de Adições Mineraias pelas NBR 5.751:2012 e NBR 5.752:2012: uma Análise Crítica a Partir de Métodos Complementares.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba, 2014

GÓES, P. B. B. **Análise da pozolanicidade por meio da difração de raio-x em pastas de cimento portland e com substituição por cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2016.

GONÇALVES, J. P; MOURA, W. A.; DAL MOLIN, D. C. C. **Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 53-68, 2002

GONÇALVES, M.C. MARGARIDO, F., **Ciência e Engenharia de Materiais de Construção**, 1 ed., IST Press 2012

HARTMANN S., KOVAL L., ŠKROBÁNKOVÁ H., MATÝSEK D., WINTER F., PURGAR A., **Possibilities of municipal solid waste incinerator fly ash utilization,** Waste Management Research, v. 33, pp. 740–747, 2015

HE P. J., PU H. X., SHAO L. M., ZHANG H., **Impact of co-landfill proportion of bottom ash and municipal solid waste composition on the leachate characteristics during the acidogenesis phase.** Waste Manag 69:232–241, 2017.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos.** Porto Alegre, Dissertação no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

HOPPE FILHO, J. *et al.* **Reactivity assessment of residual rice-husk ashes.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 29, n. 6, p. 04017003, 2017.

HUANG, T.Y., CHIUEH, PEI-TE., **Life Cycle Assessment of Reusing Fly Ash from Municipal Solid**, Waste Incineration, Procedia Engineering, v.118, pp. 984-991, 2015.

HUNCE, S. Y.; AKGUL, D.; DEMIR, G.; MERTOGLU, B. **Solidification/stabilization of landfill leachate concentrate using different aggregate materials**. Waste Management, v. 32, p. 1394-1400, 2012

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Estimativa populacional 2021**, Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ba/barreiras.html>, acesso em 10 de maio de 2022.

ISAIA, GERALDO C. **Materiais de Construção Civil e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1ª Edição. Volume 1 e 2. São Paulo: IBRACON, 2007

JEONG, S. M.; OSAKO, M.; KIM, Y.J. **Utilizing a database to interpret leaching characteristics of lead from bottom ashes of municipal solid waste incinerators**, Waste Management, v. 25, n. 7, p. 694-701, 2005

JIANG, X., LI, Y., YAN, J., **Hazardous waste incineration in a rotary kiln: a review**. Waste Disposal Sustain.Energy 1, 3–37, 2019.

JOSEPH, A. M., *et al.*, **The use of municipal solid waste incineration ash in various building materials: a Belgian point of view**. Materials, v. 11, n. 1, p. 141, 2018.

KEBER, S., ELWERT, T., SCHIRMER, T., GOLDMANN, D. **Characterization of Fine Fractions from the Processing of Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ashes for the Potential Recovery of Valuable Metals**. Minerals, v.10, 1-18, 2020

KOCH, M., KRAMMER G., **The permeability distribution (PD) method for filter media characterization**. Aerosol, Sci, Technol, 42, 433–444, 2008.

LEE T-C **Recycling of municipal incinerator fly-ash slag and semiconductor waste sludge as admixtures in cement mortar**. Constr Build Mater 23(11):3305–3311, 2009.

LI, W., MA, Z., HUANG, Q., JIANG, X., 2018. **Distribution and leaching characteristics of heavy metals in a hazardous waste incinerator**. Fuel 233, 427–441.

LIU, H. *et al.*, **Ash formation and the inherent heavy metal partitioning behavior in a 100 t/d hazardous waste incineration plant**. Science of The Total Environment, v. 814, p. 151938, 2022.

LOGINOVA E., PROSKURNIN M., BROUWERS H. J., **Municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash composition analysis: a case study of combined chelutant-based washing treatment efficiency**, J. Environ Manag, v. 235, pp. 480–488, 2019

LUXAN, M. P. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement**. Cement and Concrete Research, v.19, p.63-68. 1989

MANGIALARDI, T., **Sintering of MSW fly ash for reuse as a concrete aggregate**, Journal Hazardous Materials. B87 (May), pp. 225-239, 2001.

MARTINEZ, J. D.; VÁSQUEZ, T. G. P.; JUNKES, J. A.; HOTZA, D.; **Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado**. Química Nova, vol. 32, Nº5, p.1110-1114, 2009.

MASUERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. **Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos**. Revista ambiente construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2p. 57 – 81, abr./jun. ISSN 1415-8876, 2004.

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

MELCHERT M. B. M., **Solidificação e estabilização de resíduos de catalisadores contendo níquel e alumínio em cimento Portland**, Tese (doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 142p, São Paulo, 2012.

MENDONÇA, F. L, **Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde para inserção em ciclos produtivos e ambientais**. 26f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018

MONTEIRO *et al.* **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**, IBAM, 2001. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/cartilha4/apresentacao/dados.php>>. Acessado em: 10 janeiro 2018.

MOURA, W. A. **Utilização de Escória de Cobre como Adição e como Agregado Miúdo para Concreto**. 2000. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

NEVES, G.; PATRICIO, S. M. R.; FERREIRA, H. C.; SILVA, M.C.; **Utilização de resíduos da serragem de granitos para a confecção de tijolos cerâmicos**. In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis/SC. 1999

NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto**. Editora Bookman. 5.ed. Porto Alegre, 2015.

NITA, C.; JOHN, V. M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo: EPUSP, 2007. 13p.

NOWAK B, ROCHA SF, ASCHENBRENNER P, RECHBERGER H, WINTER F., **Heavy metal removal from MSW fly ash by means of chlorination and thermal treatment: influence of the chloride type**. Chem Eng J179:178–185, 2012.

OMS, ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Global analysis of health care waste in the context of COVID-19: status, impacts and recommendations**, disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240039612>, acessado em 05 de junho de 2023

PÁDUA, P. G. L. **Desempenho de compósitos cimentícios fabricados com cimentos aditivados com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar in natura e beneficiadas**. Tese (doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. 210 f. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.

PERKINS, R.B., PALMER, C.D., **Solubility of ettringite ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) at 5 -75°C**, *Geochim Cosmochim Acta*, v. 63, pp. 1969-1980, 1999

PETRY, N. S.; **Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassas de cimento Portland branco**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015. 178p.

PHILIPPI JR, A.; ROMÉRIO, M. A.; COLLET, G. **Incineração: Curso de Gestão Ambiental**. Coleção Ambiental. Bruna Editores: Barueri, 2004

PHUA Z., GIANNIS A., DONG Z. L., LISAK G., NG W. J., **Characteristics of incineration ash for sustainable treatment and reutilization**, *Environ Sci Pollut, Res Int Epub*, May 1, 2019

PNUMA, PROGRAMA AMBIENTAL DAS NAÇÕES UNIDAS, **Alerta para efeitos da “crise global de resíduos”**, 2012, acesso em 15 de maio de 2022: <https://news.un.org/pt/story/2012/11/1418951-pnuma-alerta-para-efeitos-da-crise-global-de-residuos>

POLESE, M. O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G.; SILVA, M. R. **Caracterização Microestrutural da Escória de Aciaria**. *Revista Matéria*, v.11, n 4, pp 554-454, ISSN 1517-7076, 2006.

PRATA, J.C., SILVA, A.L., WALKER, T.R., DUARTE, A.C., ROCHA-SANTOS, T., **COVID-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics**. *Environ. Sci. Technol.* 54, 7760–7765. 2020

QIAN, G.R., SHI, J., CAO, Y.L., XU, Y.F., CHU, P.C., **Properties of MSW fly ashe calcium sulfoaluminate cement matrix and stabilization/solidification on heavy metals** *J. Hazard.* v. 152, pp. 196-203, 2008.

QUINA M. J., BORDADO J. C., QUINTA-FERREIRA R. M., **Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: an overview**. *Waste Manag* 28(11):2097–2121 (2008a)

QUINA M. J., BORDADO J. C., QUINTA-FERREIRA R. M., **Characterization of air pollution control residues produced in a municipal solid waste incinerator in Portugal**. *J Hazard Mater* 152(2): 853–869, (2008b)

RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLÈRE, A. M., DRON, R. **Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires**. 7e. Congrès International de la Chimie des Ciments, V. III, 36. Paris, 1980.

RIBEIRO, D.V.; MORELLI, M. R. **Resíduos Sólidos Problema ou Oportunidade**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

SALEEM, M., KRAMMER, G., ULLAH KHAN, R., TAHIR, M.S., **Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulse-jet bag filter**, Powder Technol. 224, 28–35, 2012.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F.R. **Concreto e seus Materiais – Propriedades e Ensaios**. 1ª Edição. São Paulo: PINI, 1986

SCHMIDT, E., **Experimental investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media**, Filtr, Sep, 32, 789–793, 1995.

SHI D, WANG P, XU X, GU L, LI L, MA H, HU C **Effect of sourceclassified collection of municipal solid waste on heavy metals and pozzolanic properties of incineration residues**. Int J Environ Res 12(5):661–670, 2018

SHI H, KAN L., **Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete**. J Hazard Mater 164(2–3):750–754, 2009.

SHAN, C.C., JING, Z.Z., PU, L., PAN, X.H., **Solidification of MSWI ash at low temperature of 100°C**, Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 51, pp. 9540-9545, 2012

SIDDIQUE R., MEHTA A., **Utilization of industrial by-products and natural ashes in mortar and concrete development of sustainable construction materials**. In Nonconventional and Vernacular Construction Materials (pp. 247-303). (2020) Woodhead Publishing.

SILVA, M.E.; LANGE L.C. **Caracterização das cinzas de incineração de resíduos industriais e de serviços de saúde**. Química Nova, Vol. 31, No. 2, 199-203, 2008

SILVA, F. G. S. **Estudo do uso de resíduo catalítico do refino de petróleo na construção civil**. 215 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO, **Relatório Anual da produção de cimento**. Disponível em: < http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico>. Acesso em 31 mai. 2023.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. 287 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

STRZALKOWSKA, E., **Morphology and chemical composition of mineral matter presente in fly ashes of bituminous coal and lihnite**, International Journal of environmental Science and Technology, 2020

SUN, X., et al, **A review on the management of municipal solid waste fly ash in American**, Procedia Environmental Sciences, v. 31, pp. 535-540, 2016

TIAN S., ZHU Y., MENG B., GUAN J., NIE Z., DIE Q., XU W., YU M. HUANG, **Chemical speciation of lead in secondary fly ash using X-ray absorption spectroscopy**. Chemosphere 197:362–366, 2018.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. A., **Sustentabilidade dos Materiais de Construção**, 2 ed. Portugal, TecMinho, 2010.

TSUTIYA, M.T., COMPARINI, J.B., SOBRINHO, P.A., HESPANHOL, I. CARVALHO, P.C.T., MELFI, A.J., MELO, W.J., MARQUES, M.O., **Biossólidos na agricultura**, 1ª ed. São Paulo, SABESP, 2001.

VARGAS, A. S. **Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2002. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002

YAN K, GAO F, SUN H, GE D, YANG S., **Effects of municipal solid waste incineration fly ash on the characterization of cement stabilized macadam**. Constr Build Mater 207:181–189, 2019.

YANG, W., PUDASAINEE, D., GUPTA, R., LI, W., WANG, B., SUN, L., **An overview of inorganic particulate matter emission from coal/biomass/MSW combustion: sampling and measurement, formation, distribution, inorganic composition and influencing factors**. Fuel Process. Technol. 213, 106657, 2021.

ZAHRA S-M, REZA T-M, MEHRZAD N., HOSSEIN A-KI, **A bi-level and robust optimization-based framework for a hazardous waste management problem: A real-world application**, Journal of Cleaner Production, Volume 252, 2020.

ZAMPIERI, V. A., **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. 1989. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E. M.; MARTELLO, L. S.; SALVASTANO, H. Jr.; **Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “filler” em compostos com fibrocimento**. I Conferência latino-americana de construção sustentável. X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. 18-21, julho 2004. ISBN 85-89478-08-4.

ZHAN X, WANG L, HU C, GONG J, XU T, LI J, YANG L, BAI J, ZHONG S. **Co-disposal of MSWI fly ash and electrolytic manganese residue based on geopolymeric system** Waste Management Research, v. 82, pp. 62–70, 2018

ZHANG, G.; HAI, J.; CHENG, J., **Characterization and mass balance of dioxin from a large-scale municipal solid waste incinerator in China**. Waste management, v. 32, n. 6, p. 1156-1162, 2012.

ZHAO, H., LIU, H., WEI, G., WANG, H., ZHU, Y., ZHANG, R., YANG, Y., **Comparative life cycle assessment of emergency disposal scenarios for medical waste during the COVID-19 pandemic in China.** Waste Manag. 126, 388–399, 2021.

ZHEN G., LU X., ZHAO Y., NIU J., CHAI X., SU L., LI Y.Y., LIU Y., DU J., HOJO T., HU Y., **Characterization of controlled low-strength material obtained from dewatered sludge and refuse incineration bottom ash: Mechanical and microstructural perspectives,** Journal of Environmental Management, v. 129, pp 183-189, 2013

ZULIANI, D.Q.; OLIVEIRA, M.L.J. & MARQUES, J.J.G.S.M. **Águas superficiais afetadas pelo depósito de lixo da cidade de Nazareno-MG.** Anais do XI Congresso da Pós-Graduação da UFLA. Lavras: UFLA, 2002.