

Caracterização físico-química de cinzas de resíduos perigosos para uso na construção civil

Physicochemical characterization of ash from hazardous waste for use in civil construction

José Leonardo Vanderlei de Carvalho^{1,2} , André Carlos Silva² , Elenice Maria Schons Silva² , José Getúlio Gomes de Sousa³ 

¹Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro das Ciências Exatas e Tecnológicas. Rua Professor José Seabra de Lemos, 316, Recanto dos Pássaros, 47808-021, Barreiras, BA, Brasil.

²Universidade Federal de Catalão, Laboratório de Modelagem e Pesquisa em Processamento Mineral, Programa de Pós-Graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas. Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 1120, Vila Chaud, 75704-020, Catalão, GO, Brasil.

³Universidade Federal do Vale do São Francisco, Grupo de Pesquisas em Construção Civil. Av. Antônio C. Magalhães, 510, Country Club, 48902-300, Juazeiro, BA, Brasil.

e-mail: leonardo.carvalho@ufob.edu.br, ancarsil@ufcat.edu.br, eschons@ufcat.edu.br, jose.getulio@univasf.edu.br

RESUMO

Ações para tratamento, reutilização e destinação adequada de resíduos perigosos (RP), a exemplo dos gerados em serviços de saúde, atividades agrossilvopastoris e oficinas mecânicas ganham importância, observando que o descarte inadequado pode ocasionar problemas ambientais. Algumas pesquisas têm apontado uso das cinzas oriundas de RP, em substituição parcial do cimento Portland ou como agregado miúdo em matrizes cimentícias, conforme as propriedades dos materiais. O objetivo desta pesquisa foi identificar as características físicas, químicas e mineralógicas das cinzas geradas em uma incineradora de RP situada no estado da Bahia/Brasil, sendo essas submetidas aos ensaios de caracterização, tanto in natura quanto após etapa de calcinação à 1000 °C, denominadas de cinza pesada (CP) e cinza calcinada (CC), respectivamente. Determinou-se a distribuição granulométrica, perda ao fogo, propriedades térmicas, composição química, morfologia, carbono orgânico total e reatividade, sendo as amostras classificadas pela norma da ABNT NBR 12653/2014. Os resultados obtidos indicam significativas diferenças entre os materiais analisados, nos aspectos físicos, químicos e mineralógicos. O uso das técnicas e métodos possibilitou classificar as amostras estudadas de forma que não atendem os requisitos mínimos normativos, entretanto, não é possível descartar a utilização das CC em matrizes cimentícias.

Palavras-chave: Caracterização tecnológica; Reutilização; Matrizes cimentícias.

ABSTRACT

Actions for the treatment, reuse and proper disposal of hazardous waste (WH), such as those generated in health services, agroforestry activities and mechanical workshops gain importance, noting that improper disposal can cause environmental problems. Some researches have pointed to the use of ash from WH, in partial replacement of Portland cement or as a fine aggregate in cementitious matrices, according to the properties of the materials. The objective of this research was to identify the physical, chemical and mineralogical characteristics of the ash generated in a RP incinerator located in the state of Bahia/Brazil, which were subjected to characterization tests, both in natura and after the calcination step at 1000 °C, called heavy ash (AH) and calcined ash (AC), respectively. The granulometric distribution, loss on fire, thermal properties, chemical composition, morphology, total organic carbon and reactivity were determined, and the samples were classified according to the ABNT NBR 12653/2014 standard. The results obtained indicate significant differences between the analyzed materials, in the physical, chemical and mineralogical aspects. The use of techniques and methods made it possible to classify the studied samples in a way that they do not meet the minimum normative requirements, however, it is not possible to rule out the use of AC in cementitious matrices.

Keywords: Technological characterization; Reuse; Cement matrices.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a temática dos resíduos sólidos tem sido discutida em diversos eventos científicos relacionados ao meio ambiente, construção civil ou áreas correlatas. No Brasil, o tema vem ganhando importância ao longo da última década, destacando-se as legislações nº 12.305/2010 e nº 14.206/2020 que abordam a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e a Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB), enfatizando aspectos para implantação de sistemas de gestão e aproveitamento de resíduos em diversos níveis, BRASIL [1]. No bojo dessas leis, os resíduos perigosos têm destaque especial 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, necessitando avaliação de parâmetros para tratamento, reutilização e descarte adequado dos resíduos, estes estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).

No tratamento de Resíduos Sólidos Industriais (RSI) e Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) o tratamento por incineração vem sendo utilizado de forma ampla por proporcionar redução de massa em torno de 90% e pela redução de agentes patogênicos presentes nos resíduos. Essa tecnologia ocasiona a geração de cinzas de fundo, que permanecem na parte inferior da caldeira/forno, e cinzas volantes que são materiais coletados pelos equipamentos de controle da poluição atmosférica. No Brasil, as cinzas de fundo podem ser classificadas como classe I – resíduos perigosos, enquanto as cinzas volantes na classe IIB – inertes e resíduo não perigoso, ABNT NBR 10004/2004 [2]. Os principais elementos que classificam as cinzas de fundo em resíduo perigoso são a presença de metais pesados (chumbo, cádmio, mercúrio e cromo) e alguns sais que requerem gerenciamento seguro, além de compostos orgânicos clorados. De acordo com SILVA e LANGE [3], esses resíduos são em alguns casos dispostos em aterros industriais, mas suas características podem exigir cuidados especiais devido a composição dos resíduos incinerados.

Na cidade de Santo Amaro/BA, durante as décadas de 60 e 70 devido ao gerenciamento inadequado dos resíduos de uma indústria da extração de chumbo, associado a falta de regulamentação específica nacional e o possível desconhecimento dos riscos à saúde pública, escórias com elevadas concentrações de chumbo foram amplamente utilizados pelo poder público para pavimentação das ruas, praças, pátios escolares e por diversos moradores que usaram o material na construção de casas e aterramento de quintais. Para ALONSO [4], o uso indevido ocasionou e vem ocasionando problemas de saúde pública, a exemplo de problemas respiratórios, doenças renais, câncer entre outras doenças que perpetuam por diversas gerações de familiares acometidos com a situação.

A reutilização adequada dos resíduos, perpassa pelo conhecimento técnico das propriedades e testes que comprovem segurança e atendam as legislações vigentes, evitando aplicações que venham impactar a saúde e ao meio ambiente da sociedade. A incorporação de resíduos, em especial das cinzas, tem aumentado o interesse desse material para diversas aplicações, sendo algumas investigadas com potencial em mistura asfáltica, fertilizantes, agregado de concreto entre outras possibilidades em função das características químicas e físicas apresentadas, as variações na produção de resíduos podem implicar em estudos específicos para uso setorial SILVA e LANGE [3]. Nesse sentido, na tentativa de equilibrar os impactos produzidos ao meio ambiente, pesquisas e ações que otimizem processos e permitam a incorporação de resíduos vem sendo implementadas e testadas em diversos setores. TORRALBA e JALALI [5] trazem em seu estudo que a incorporação das cinzas, influenciam a resistência mecânica das estruturas produzidas com uso desse material, em função da sua atividade pozolânica.

PHUA *et al.* [6] mostram que o destino final das cinzas e dos resíduos de poluição do ar oriundos da incineração dependem principalmente das políticas nacionais implementadas, associando o desenvolvimento de sistemas eficientes de controle da poluição do ar, sendo o foco mudado para tratamento e diminuição de emissões e aplicação das cinzas produzidas. HUANG e CHIUEH [7], trazem que em países mais desenvolvidos, o tratamento e reaproveitamento desses resíduos só é possível por causa das políticas ambientais e subsídios governamentais. SUN *et al.* [8], expõe que em vários países, esses resíduos de cinzas são simplesmente enterrados em aterros sanitários. Alguns pesquisadores a exemplo de GEYER [9]; MASUERO *et al.* [10]; VARGAS [11]; GONÇALVES *et al.* [12]; SOUZA [13]; DELLA *et al.* [14], desenvolveram estudos com utilização de resíduos, para incorporação e/ou substituição parcial em matrizes cimentícias de concretos ou argamassas, obtivendo resultados diversos de melhorias em relação a propriedades analisadas.

O objetivo desta pesquisa foi identificar as características físicas, químicas e mineralógicas das cinzas advindas do processo de incineração de resíduos perigosos, provenientes de uma indústria localizada na cidade de Barreiras/BA, Brasil, tendo sua classificação conforme a norma ABNT NBR 12653/2014 [15], na perspectiva de uma aplicação em matrizes cimentícias.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesse estudo, trata-se de cinzas advindas da incineração de resíduos, originários dos serviços de saúde, de atividades agrossilvopastoris e oficinas mecânicas. A indústria produtora das cinzas, possui um incinerador que trabalha na faixa de temperatura entre 850 °C e 900 °C, com capacidade de combustão de 70 kg/h, tem alimentação manual e sem segregação do material em ciclos de aproximadamente 20 minutos, produzindo uma cinza sem queima completa. Destaca-se, que a indústria utiliza gás liquefeito de petróleo (GLP) para manutenção da temperatura interna do incinerador quando o resíduo tem baixo poder calorífico e não atingi a faixa de temperatura determinada.

A coleta da amostra seguiu as recomendações da ABNT NBR 10.007/2004 [16], totalizando em torno de 90 kg de cinzas oriundas do fundo do incinerador, coletadas durante trinta dias de funcionamento para obtenção de uma amostra representativa. Após a coleta do material, este foi peneirado manualmente na própria indústria usando uma peneira com abertura de 2,79 mm para retirada do material grosseiro, a exemplo de vidros, objetos metálicos pontiagudos e cortantes que permanecem após a incineração. Em seguida, a amostra foi homogeneizada, armazenada em recipiente plástico e transportada para a Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), denominada como amostra de cinzas pesada (CP). Em virtude do processo de incineração na indústria ocorrer de forma incompleta, parcelas da amostra de CP foram submetidas a calcinação em forno mufla com alíquotas de aproximadamente 50 g por cadinho, rampa de aquecimento de 10 °C/min, partindo da temperatura ambiente até 1000 °C, mantidos por 1 hora, com posterior resfriamento natural, esse processo originou a denominação cinza calcinada (CC).

A distribuição granulométrica das amostras de CP e CC foi obtida por peneiramento a seco seguindo a ABNT NBR 7181/2016 [17], com tempo de peneiramento de 15 minutos. A fração fina das amostras foram analisadas por difração a laser em suspensão aquosa em um Helos/KR da Sympatec GmbH operando com dispersor Quixel na Clausthal Technical University, Alemanha. O ensaio de perda ao fogo (PF) foi realizado em um forno mufla, conforme recomendação da ABNT NBR NM 18/2012 [18]. Para determinação do Carbono Orgânico Total (COT), utilizou-se o analisador de COT da marca Shimadzu, modelo TOC-LCPN com injetor automático ASI-L. Para determinação da massa específica das cinzas utilizou-se um picnômetro a gás hélio da Micromeritics AccuPyc II 1340. Alíquotas dos dois materiais foram submetidas a espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) usando o espectrofotômetro IRAffinity-1S da SHIMADZU, equipado com detector DTGS (com maior sensibilidade do detector, formado pelo sal sulfato de triglicina deuturada). 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 de 400 e 4000 cm^{-1} , sendo realizadas 70 varreduras e com resolução de 4 cm^{-1} . Uma alíquota de 1g da CP foi analisada termicamente (TGA/DTA) em Simultaneous DTA-TG Apparatus DTG-60 da SHIMADZU, com variação controlada da temperatura, da temperatura ambiente (25 °C aproximadamente) até 1000 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min sob atmosfera inerte de N_2 .

Os óxidos majoritários presentes nas amostras foram determinados por fluorescência de raio-X (FRX) em um MiniPa14 da PANalytical. A composição elementar foi determinada por espectrometria de emissão óptica com plasma (ICP-OES) em um Plasma II da Perkin Elmer foi realizada Clausthal Technical University, na Alemanha. A composição mineralógica das amostras foi verificada por difração de raios X (DRX) em um difratômetro da Rigaku, modelo Ultima IV, com radiação $\text{CuK}\alpha$ de 40 kV e 30 mA, com velocidade de 2 °/min e ângulo 2 θ variando de 2 a 70 °. A identificação das fases foi realizada no software X'pert HighScore Plus da PANalytical operando com o banco de dados do ICDD software JADE 3.0.

Para realização das análises microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizou-se um microscópio eletrônico da marca: LEO, modelo 440, acoplado com detector Espectroscopia de Energia Dispersiva por raios-X (EDS), para realização das microanálises, permitindo a identificação dos elementos químicos presentes na amostra através de análises por área, pontual e em linha.

A avaliação da atividade pozolânica, ocorreu conforme os procedimentos de preparação e execução estabelecidos na norma ABNT NBR 5752:2015 [19], determinando o índice de desempenho com cimento Portland aos vinte e oito dias. Os resultados obtidos do processo de caracterização, auxiliaram na classificação das cinzas analisadas conforme a ABNT NBR 12653/2014 [15].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização física

A calcinação das amostras de CP em mufla produziu uma diminuição de massa de $46,63\% \pm 0,73\%$, corroborando com o resultado para o ensaio de PF em que obteve-se uma redução de $47,59\% \pm 0,03\%$. Os resultados dos ensaios de COT, apresentaram um quantitativo de $43,82\% \pm 2,64\%$ e $0,50\% \pm 0,02\%$ de presença de carbono

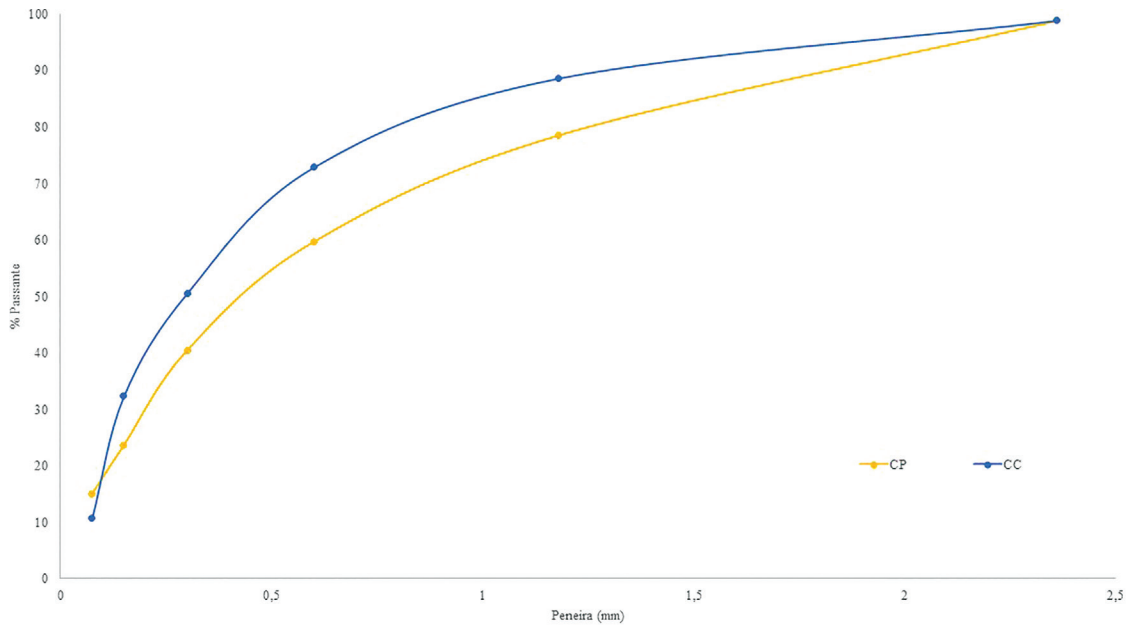


Figura 1: Curva granulométrica da CP e CC.

nas CP e CC, respectivamente. Os valores mensurados sinalizam que a cinza ao sair do processo de incineração na indústria ainda possui uma grande quantidade de matéria orgânica, destacando-se o elemento carbono e a sua coloração preta, após o processo de calcinação a tonalidade muda para branca. SILVA e LANGE [3], encontraram para RSS, valor de PF na ordem de 46,5%, semelhante ao encontrado nesse estudo, que tem uma diversidade de resíduos em sua composição e processo incompleto de queima. JEONG *et al.* [20] realizando estudos em processos de incineração completos encontraram o valor de 4,4% para PF nas amostras analisadas para cinzas de fundo, o que demonstram que os parâmetros de temperatura e tempo de exposição durante o processo de incineração influencia na composição da cinza gerada.

A área superficial BET encontrada foi de 0,603 m²/g e 0,5126 m²/g para a CC e CP, respectivamente. Os valores de densidade obtidos foram de 2,1455 g/cm³ ± 0,0086 e 2,8036 g/cm³ ± 0,0020 para a CC e CP. Em seus estudos SILVA e LANGE [3], encontraram valores de densidade para cinzas de fundo oscilando de 1,93 a 2,18 g/cm³ para os ensaios realizados de caracterização de cinzas de RSS. MENDONÇA [21], obteve o valor de 2,03 g/cm³ para o mesmo tipo de resíduo analisado. O valor de densidade encontrado para a CP, apresentam características de densidade semelhante a outras pesquisas enquanto com o de processo calcinação e eliminação dos orgânicos existe um incremento superior a 30% entre os materiais no parâmetro.

As Figuras 1 e 2, apresentam proporções de 15,10% e 21,65% 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 de fração fina. Os valores encontrados na CC para os parâmetros de D₁₀, D₅₀ e D₉₀, foram de 7,00 µm, 95,43 µm e 933,07 µm, respectivamente. KEBER *et al.* [22], estudando cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos na Alemanha, obtiveram valores de D₉₀ em 145 µm e com 22% de finos abaixo de 10 µm. FLOREA *et al.* [23] encontraram em seus estudos com cinzas de fundo de incineração, D₁₀, D₅₀ e D₉₀, com 13,32 µm, 70,72 µm e 256 µm, respectivamente. DE BOOM e DEGREGZ [24], acharam valores de D₁₀, D₅₀ e D₉₀, 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 o processo de incineração usado.

3.2. Caracterização química

A análise termogravimétrica, TG/DTA realizado nas CP (Figura 3) permitiu identificar estágios de transformações e perdas na amostra. No primeiro estágio entre a temperatura ambiente e 396,29 °C a perda de massa é de 3,745% relacionada umidade higroscópica e água quimicamente combinada. Os demais estágios apresentam características endotérmicas, em que entre 396,29 °C e 627,58 °C a perda foi de 8,72% sinalizando a presença de material orgânico e formações de C-S-H. Entre 627 °C e 989,24 °C, ocorreu 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 dióxido de carbono. A redução total em massa foi de 40,46%, indicando que a incineração

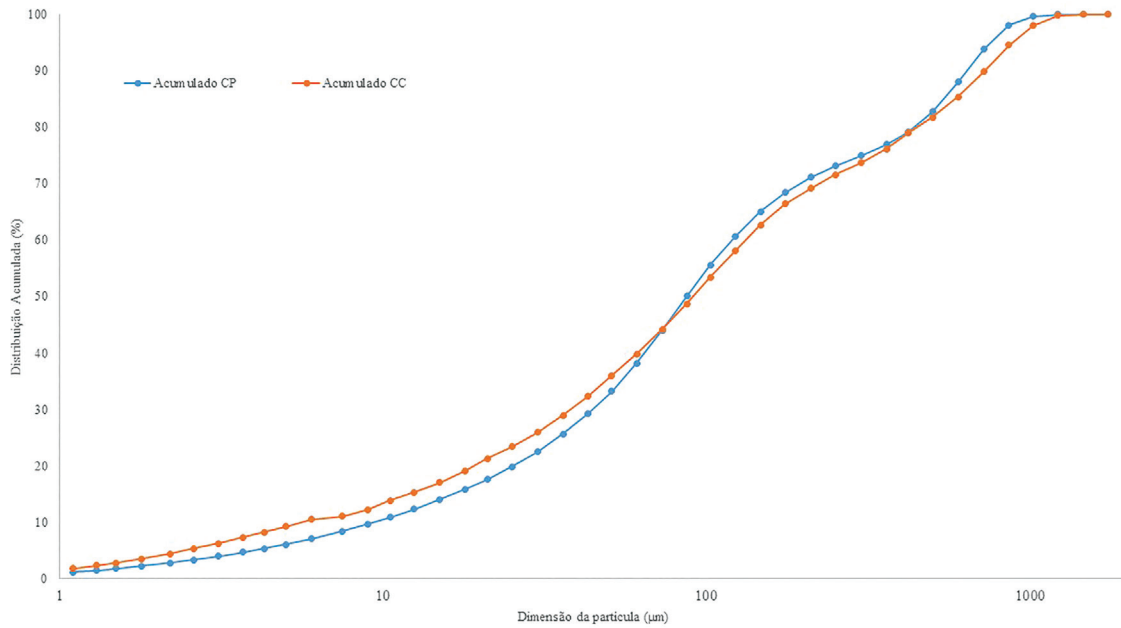


Figura 2: Distribuição granulométrica a laser CP e CC.

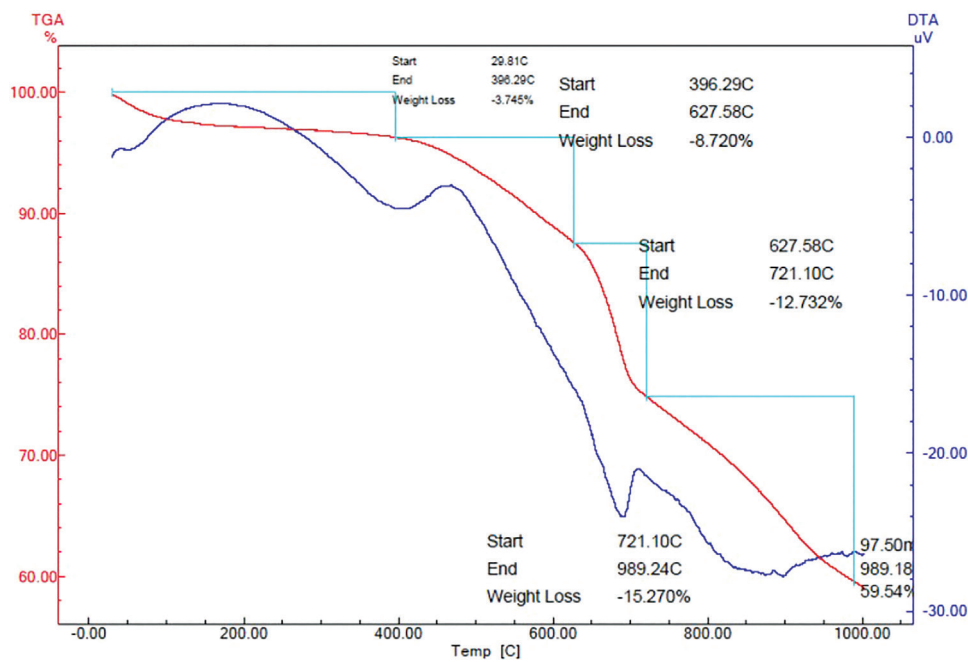


Figura 3: Análise termogravimétrica da CP.

das cinzas não ocorreu em sua totalidade, possivelmente pela faixa de temperatura entre 850 °C e 900 °C no incinerador e pelo tempo de permanência dos resíduos no processo.

Os espectros obtidos para FTIR (Figura 4), 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.* [25]; SHAN *et al.* [26], 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.* [27], mostram que as bandas FTIR entre 1480 e 1450, está associada 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

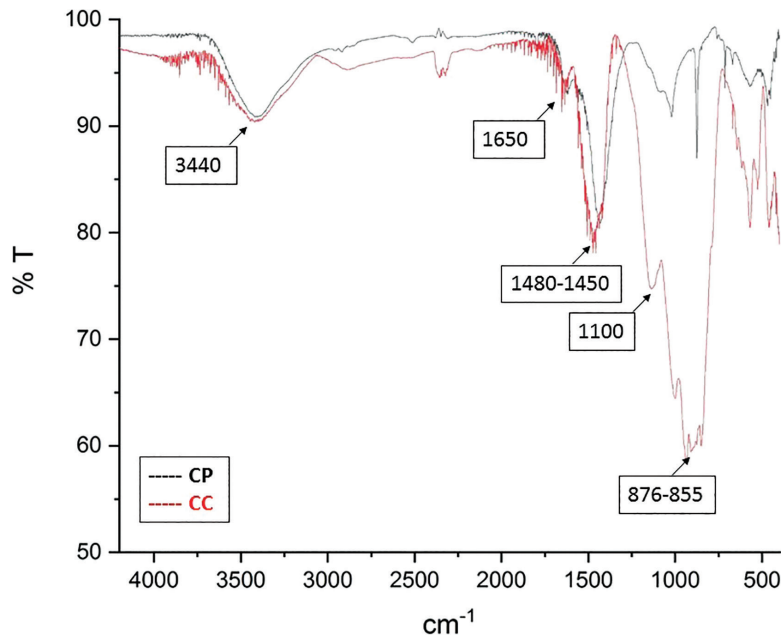


Figura 4: Espectro de FTIR para CP e CC.

Tabela 1: Composição elementar FRX dos óxidos e elementos nas cinzas de CP e CC.

ÓXIDOS/ELEMENTOS	CP (%)	CC (%)
Al ₂ O ₃	1,737	3,307
SiO ₂	4,321	8,227
SO ₃	0,876	1,667
K ₂ O	0,356	0,678
CaO	26,655	50,746
TiO ₂	4,108	7,821
Fe ₂ O ₃	0,930	1,771
ZnO	1,201	2,287
In ₂ O ₃	0,519	0,988
Cl	11,660	22,198
Perda ao Fogo	47,64	—

e PALMER [28], apontam que os picos nas proximidades de 876 cm⁻¹ e 855 cm⁻¹ são associados a SiO₄ e AlO₆, respectivamente. APOLONIO *et al.* [29], associam os picos próximos a faixa de 465 cm⁻¹ com vibrações de deformação angular e grau de amorfização da amostra.

Os resultados de ICP-OES, quantificou de forma majoritária 33,5% de carbono e 17,20% de cálcio, outros elementos como cloro, potássio, ferro, cromo, níquel e manganês também foram identificados em proporções menores na amostra CP. A Tabela 1, apresenta os resultados de FRX quanto a composição elementar dos óxidos identificados, destacando-se a potencialização do CaO (50,74%) e SiO₂ (8,22%) sendo os óxidos predominantes nas CC. HARTMANN *et al.* [30], encontraram em cinzas de fundo percentuais de CaO e SiO₂, na ordem de 20,23% e 10,93%, respectivamente. FLOREA *et al.* [18], estudando cinzas de fundo obteve valores de 30,21% e 11,13%, dos respectivos óxidos, demonstrando relações com estudos da literatura e variabilidade de percentuais. O elevado teor de CaO, pode estar relacionado aos resíduos oriundos da atividade agrossilvopastoris.

A quantificação do ensaio de 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. Os espectros e as imagens microscópicas na Figura 5, permitem visualizar os elementos identificados para as amostras de CP

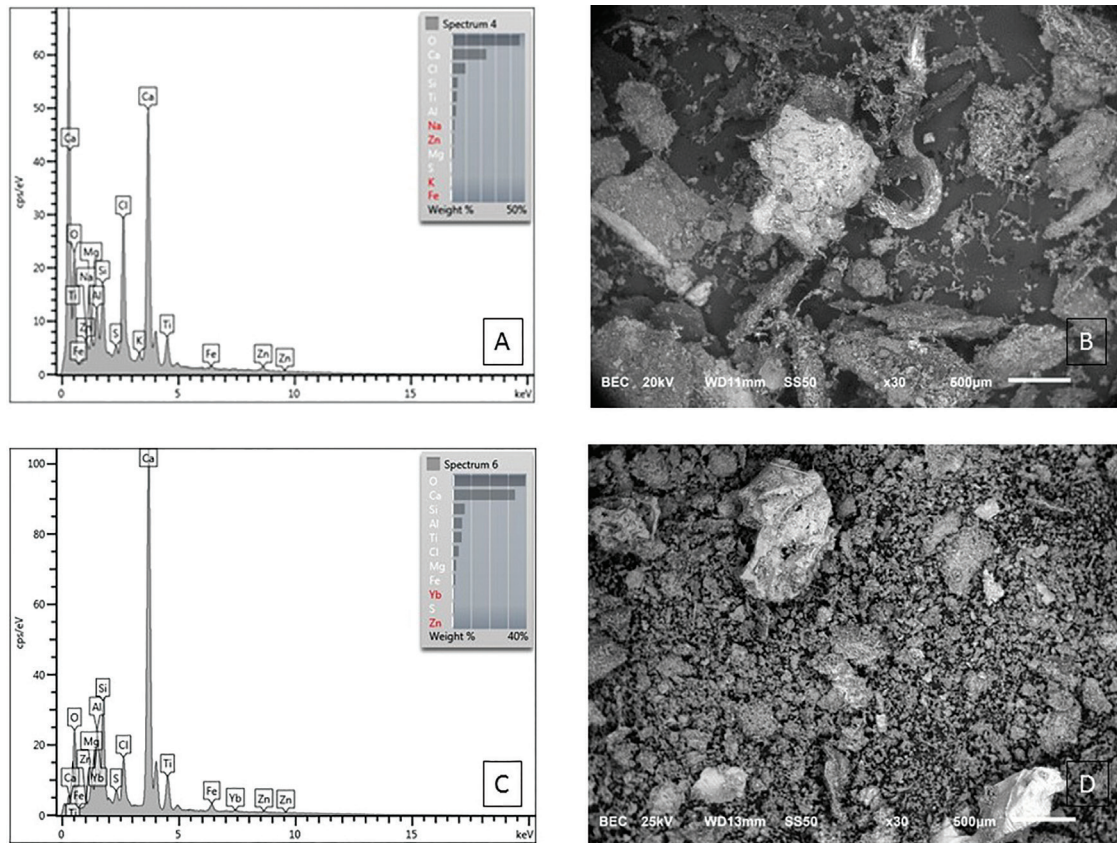


Figura 5: Espectro do MEV-EDS das CP e CC. (a) Espectro da CP, (b) MEV da CP, (c) Espectro da CC, (d) MEV da CC.

e CC. Ambas amostras apresentam formatos diversificados em suas superfícies irregulares, que relaciona com a distribuição granulométrica e o tamanho das partículas, sendo as frações finas observadas na CC (Figura 5d). STRZALKOWSKA [31] expõe que a morfologia diversificada e a falta de esfericidade nas cinzas ocasionam diminuição do deslizamento dos grãos, da trabalhabilidade e da fluidez para aplicações em matrizes cimentícias.

3.3. Caracterização mineralógica

No difratograma da CP (Figura 6), foi possível identificar as fases cristalinas com presença de calcita, óxido de alumínio, halita e quartzo, identificados também nos estudos conduzidos por HARTMANN *et al.* [30]; ZHAN *et al.* [32] e LOGINOVA *et al.* [33] em cinzas de fundo. Verifica-se também fases amorfas, que indicam presença de matéria orgânica, carbono residual e fases vítreas de aluminossilicatos. No difratograma (Figura 7) com calcinação em temperaturas diferentes, correlacionando com o TG/DTA, com a elevação da temperatura ocorre a potencialização da presença de alguns minerais (SiO_2 , NaCl e Al_2O_3), impactando na redução de CaCO_3 , com a eliminação do carbono presente.

3.4. Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

A análise do IAP indicando pela ABNT NBR 12653/2014 [15], traz 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, denotando um desempenho químico insatisfatório para classificação como material pozolânico, o requisito mínimo estabelecido é de 70%. Ao avaliar a resistência a compressão em corpos de provas (cps) com substituição parcial ao cimento Portland e tempo de 28 dias de cura úmida, obteve-se o percentual de 25,34% para a inserção das CP e 65,97% para as CC, tendo como referência o valor mensurado para os cps sem inclusão das cinzas, ambos percentuais encontrados estão abaixo dos 90% estabelecidos pela norma NBR 5752/2014 [19]. Entretanto, a CC pode apresentar potencial nucleador dos grãos de cinzas e efeito filler, colaborando com a resistência mecânicas de compostos cimentícios formulados em percentuais menores de substituição. MEHTA e MONTEIRO [34], argumentam a classificação adotada pela norma quanto ao teor mínimo do somatório dos óxidos de Si, Al e Fe. Esses, 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 de óxido de cálcio.

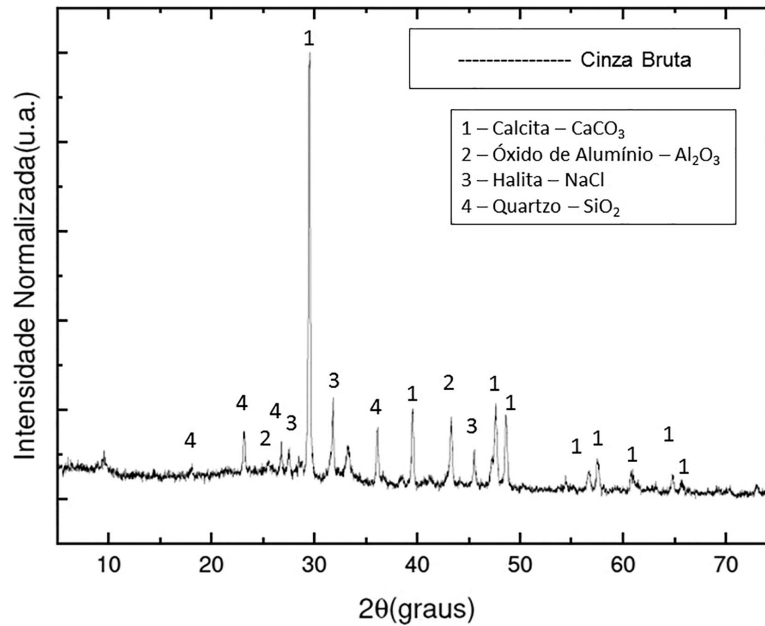


Figura 6: Difratoograma das CP.

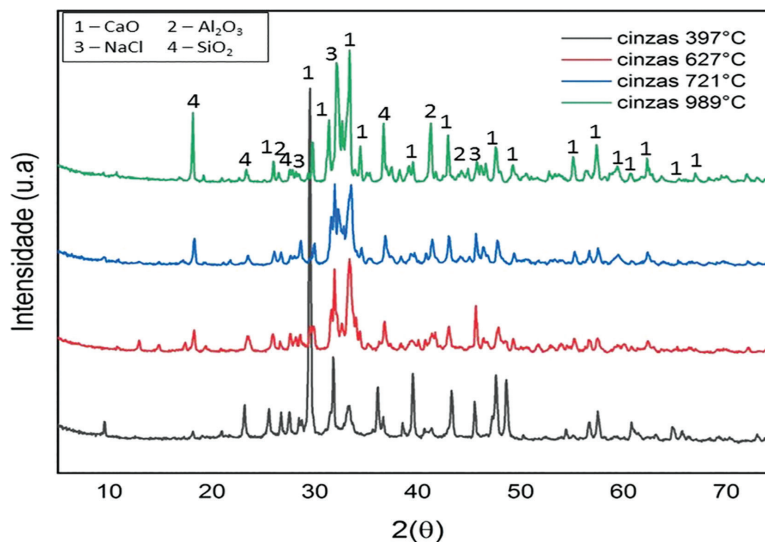


Figura 7: Difratoograma das CC.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas utilizadas para caracterização e a análise da atividade pozolânica das cinzas advindas da incineração de resíduos perigosos, permitem algumas considerações:

- A CP apresentou uma diversidade de formação em sua superfície que corrobora com a baixa densidade mensurada de 2,1455 g/cm³, indicando uma maior porosidade. As técnicas químicas e mineralógica apresentam fases de calcita, óxido de alumínio, halita e quartzo com perda de massa superior a 40%, observada nos ensaios de perda ao fogo, no COT e na análise termogravimétrica, destacando a presença do elemento carbono.
- A CC apresentou uma maior homogeneidade morfológica, resultado compatível com a densidade de 2,8036 g/cm³ e com o ensaio de granulométrica a laser. No processo de calcinação, tem a manutenção das fases halita, quartzo e óxido de alumínio e a reação da calcita para óxido de cálcio, potencializados pela eliminação do dióxido de carbono.
- A composição das propriedades químicas, estabelecida pelo somatório dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ mensurou percentuais de 13,31% e 22,68% para CP e CC, respectivamente, valores abaixo do mínimo de

70% estabelecido na ABNT NBR 12653/2014. Em relação a propriedade mecânica, mensurado pelo ensaio de resistência a compressão, os cps obtiveram 25,34% e 65,97% para CP e CC, respectivamente, referente ao valor dos cps de referência, esses inferiores a 90% conforme estabelecido pela ABNT NBR 12653/2014. Dessa forma, permite-se classificar que ambas amostras são insatisfatórias aos requisitos normativos, entretanto, não se pode descartar o uso das CC como efeito nucleador e como filler em matrizes cimentícias.

- A caracterização do resíduo (cinza) permite ampliar o embasamento técnico da área para o material, possibilitando ampliação da discussão da temática. Na indústria, o conhecimento adquirido poderá possibilitar aperfeiçoamento dos processos internos, de forma elevar a segurança e desenvolvimento de uma rota sustentável para recuperação de elementos e/ou reaproveitamento das cinzas em aplicações ambientais.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecer a empresa privada do ramo de incineração de resíduos perigosos do estado da Bahia pela disponibilização do resíduo (cinzas) utilizadas nessa pesquisa. Agradecimentos a Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), Universidade Federal de Catalão (UFCAT), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Universidade de São Paulo (USP) Campus Ribeirão Preto, Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) e Universidade de Clausthal na Alemanha pela disponibilização de equipamentos e da estrutura dos laboratórios para realização dos ensaios.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] BRASIL, “Lei n ° 12.305 de 02 de agosto de 2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos”, *Diário Oficial da União*, 2010.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 10004 Resíduos Sólidos – Classificação*, Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- [3] SILVA, M.E., LANGE, L.C., “Caracterização das cinzas de incineração de resíduos industriais e de serviços de saúde”, *Química Nova*, v. 31, n. 2, pp. 199-203, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422008000200002>.
- [4] 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 de D.Sc., Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2015.
- [5] TORGAL, F.P., JALALI, S., *A sustentabilidade dos materiais de construção*, 2 ed., Portugal, TecMinho, 2010.
- [6] PHUA Z., GIANNIS A., DONG Z. L., *et al.*, “Characteristics of incineration ash for sustainable treatment and reutilization”, *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 26, n. 17, p. 16974-16997, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-019-05217-8>.
- [7] HUANG, T.Y., CHUIEH, P.T., “Life cycle assessment of reusing fly ash from municipal solid waste incineration”, *Procedia Engineering*, v. 118, pp. 984-991, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.539>.
- [8] SUN, X., LI, J., ZHAO, 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. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.079>.
- [9] GEYER, R.T., “*Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*”, Tese de D.Sc, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2001.
- [10] MASUERO, A.B., VILELA, A.C., DAL MOLIN, D., “Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos”, *Revista Ambiente Construído*, v. 4, n. 2, p. 57-81, Abr./Jun. 2004.
- [11] VARGAS, A.S., “*Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2002.
- [12] 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”, *Revista Ambiente Construído*, v. 2, n. 1, p. 53-68, 2002.
- [13] SOUZA, P.S.L., “*Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2003.

- [14] DELLA, V.P., HOTZA, D., JUNKES, J.A., *et al.*, “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, pp. 1175–1179, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422006000600005>.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 12653 Materiais Pozolânicos – Requisitos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 10007 Amostragem de Resíduos Sólidos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7181 Análise Granulométrica*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 18 Cimento Portland – Análise Química – Determinação de Perda ao Fogo*, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5752 Materiais Pozolânicos – Determinação Do Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias*, Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- [20] 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 (New York, N.Y.)*, v. 25, n. 7, pp. 694–701, 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.015>. PubMed PMID: 16009303.
- [21] MENDONÇA, F.L., “Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde para inserção em ciclos produtivos e ambientais”, Trabalho de Conclusão de Curso, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2018.
- [22] KEBER, S., SCHIRMER, T., ELWERT, T., *et al.*, “Characterization of fine fractions from the processing of municipal solid waste incinerator bottom ashes for the potential recovery of valuable metals”, *Minerals (Basel)*, v. 10, n. 10, pp. 838, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/min10100838>.
- [23] FLOREA, M., QUAAS, L., BROUWERS, H., *et al.*, “MSWI by-products and immobilisates as concrete constituents Advances in Cement and Concrete Technology in Africa”, In: *Proceedings of the 2nd International Conference*, Dar es Salaam, Tanzania, 2016.
- [24] DE BOOM, A., DEGREGZ, M., “Belgian MSWI fly ashes and APC residues: a characterisation study”, *Waste Management (New York, N.Y.)*, v. 32, n. 6, pp. 1163–1170, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.017>. PubMed PMID: 22244614.
- [25] QIAN, G.R., SHI, J., CAO, Y.L., *et al.*, “Properties of MSW fly ashe calcium sulfoaluminate cement matrix and stabilization/solidification on heavy metals”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 152, n. 1, pp. 196–203, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.118>. PubMed PMID: 17728061.
- [26] SHAN, C.C., JING, Z.Z., PU, L., *et al.*, “Solidification of MSWI ash at low temperature of 100 °C”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 51, n. 28, pp. 9540–9545, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ie203040d>.
- [27] ZHEN, G., LU, X., ZHAO, Y., *et al.*, “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. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.07.008>. PMID:23933484.
- [28] PERKINS, R.B., PALMER, C.D., “Solubility of ettringite (Ca₆[Al(OH)₆]₂(SO₄)₃·26H₂O) at 5–75 °C”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 63, n. 13–14, pp. 1969–1980, 1999. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00078-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00078-2).
- [29] APOLONIO, P.H., LIMA, J.S., MARINHO, E.P., *et al.*, “Production of geopolymers using rice husk ash as supplementary source of silica”, *Cerâmica*, v. 66, n. 378, pp. 172–178, Jun., 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132020663782914>.
- [30] HARTMANN, S., KOVAL, L., ŠKROBÁNKOVÁ, H., *et al.*, “Possibilities of municipal solid waste incinerator fly ash utilization”, *Waste Management (New York, N.Y.)*, v. 33, n. 8, pp. 740–747, 2015. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X15587545>. PubMed PMID: 26060198.
- [31] STRZALKOWSKA, E., “Morphology and chemical composition of mineral matter presente in fly ashes of bituminous coal and lihnite”, *International Journal of envirenmental Science and Technology*, v. 18, pp. 2533–2544, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03016-0>.

- [32] ZHAN, X., WANG, L., HU, C., *et al.*, “Co-disposal of MSWI fly ash and electrolytic manganese residue based on geopolymeric system”, *Waste Management & Research*, v. 82, pp. 62-70, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.014>. PubMed PMID: 30509596.
- [33] LOGINOVA, E., PROSKURNIN, M., BROUWERS, H.J., “Municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash composition analysis: a case study of combined chelatatant-based washing treatment efficiency”, *Journal of Environmental Management*, v. 235, pp. 480-488, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.096>. PubMed PMID: 30710857.
- [34] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.M., *Concrete: microestructure, properties and material*, University of California, Berkeley, 1996.