ENARC
FOZ DO IGUAÇU-2023

POTENCIAL DO USO DOS RESÍDUOS INDUSTRIAIS ORIGINADOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS COMO PRECURSORES GEOPOLIMÉRICOS

Potential Application of Industrial Waste from the State of Minas Gerais as Geopolymer Precursors

Aldo Ribeiro de Carvalho
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, MG | aldo.carvalho@aluno.ufop.edu.br

Julia Castro Mendes
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, MG | juliacastro.mendes@ufjf.br

Thaís Mayra de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora, MG | thais.mayra@ufjf.br

Guilherme Jorge Brigolini Silva
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, MG | guilhermebrigolini@ufop.edu.br

Resumo

Para o desenvolvimento econômico mais sustentável do país, é fundamental a reinserção de subprodutos industriais no ciclo produtivo. Existem várias opções de materiais inovadores nos quais é possível incorporar resíduos, e um exemplo são os geopolímeros, que são ligantes para a construção civil compostos de um material precursor e um agente ativo. Nesse aspecto, o objetivo desse trabalho é estudar alguns dos principais resíduos gerados no estado de Minas Gerais, resíduos de concreto, de mármore, de barragem de minério de ferro e de cerâmica vermelha, como potenciais precursores geopoliméricos. Para isso foi realizada uma revisão bibliográfica, seguida da caracterização física desses materiais. Além de identificar os principais aspectos dos precursores que influenciam nos geopolímeros, este trabalho verificou que é possível adotar esses resíduos como precursores geopoliméricos. Com isso, seu reaproveitamento em larga escala tem o potencial de mitigar os impactos ambientais causados por essas indústrias e o consumo de recursos naturais pela construção civil.

Palavras-chave: Precursores geopoliméricos; Resíduo de Concreto; Resíduo de Mármore; Rejeito de Barragem de Minério de Ferro; Resíduo de Cerâmica Vermelha.

ABSTRACT

For a more sustainable economic development of the country, it is essential to reintegrate industrial byproducts into the production cycle. There are several options for innovative materials in which it is possible to incorporate waste, and one example is geopolymers, which are binders for the civil construction industry composed of a precursor material and an activating agent. In this regard, the objective of this study is to investigate some of the main wastes generated in the state of Minas Gerais such as, concrete waste, marble waste, iron ore tailings, and red ceramic waste, as potential geopolymers precursors. To achieve this, a literature review was conducted, followed by the physical characterization of these materials. In addition to identifying the key aspects of the precursors that influence geopolymers, this study found that it is possible to adopt these waste materials as geopolymers precursors. Therefore, their large-scale reuse has the potential to mitigate the environmental impacts caused by these industries and reduce the consumption of natural resources by the civil construction sector.

Keywords: Geopolymer precursors; Concrete waste; Marble waste; Iron ore tailings; Red ceramic waste.

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos da indústria da construção civil representam cerca de 30% a 40% de todos os resíduos sólidos gerados em escala mundial, decorrentes da urbanização acelerada e reconstrução de cidades (AKHTAR; SARMAH, 2018; ISMAEEL; KASSIM, 2023; NAWAZ; CHEN; SU, 2023). Quando descartados de forma inadequada, esses resíduos causam impacto significativo ao meio ambiente e à sociedade (CONCEIÇÃO.*et.al.*, 2021). Outra indústria com expressivo volume de resíduos é a mineração - como exemplo, estima-se que para 1 tonelada de carvão produzida, 0,4 toneladas de rejeito são geradas (OSBORNE, 2013). Uma proporção similar de produção/rejeitos formados se repete para o processamento de minério de ferro no Brasil (IPT, 2021). Assim como os resíduos provenientes da construção civil, os resíduos de mineração podem causar grandes impactos aos ecossistemas. O rompimento de barragens de rejeitos é um crime ambiental que pode resultar na liberação de milhões de metros cúbicos de rejeitos, atingindo corpos d'água e estruturas urbanas. Como consequência, as pessoas podem ser desalojadas e até mesmo perderem suas vidas, como foi o caso de Mariana/MG em 2015 e Brumadinho/MG em 2019 (IBAMA, 2020; G1, 2021).

Para o avanço do desenvolvimento sustentável nas indústrias, é imprescindível a reinserção dos resíduos no ciclo produtivo. A construção civil tem reconhecido potencial para absorver resíduos de outras indústrias especialmente para produção de matrizes cimentícias (CARVALHO *et al.*, 2023b; LOPES.*et.al.*, 2023), na confecção de cerâmicas (FARIA.*et.al.*, 2019; MARIAN.*et.al.*, 2023), de compósitos epóxi (PRIYADARSHINI; SOREN; DURGA, 2023), de tijolos (THEJAS; HOSSINEY, 2022) ou de painéis pré-moldados (FLANSBJER.*et.al.*, 2018). Outra alternativa é a aplicação de resíduos sólidos no desenvolvimento de materiais inovadores, como exercendo o papel de precursores geopoliméricos (SILVA; SANTANA; WÓJCIK, 2021).

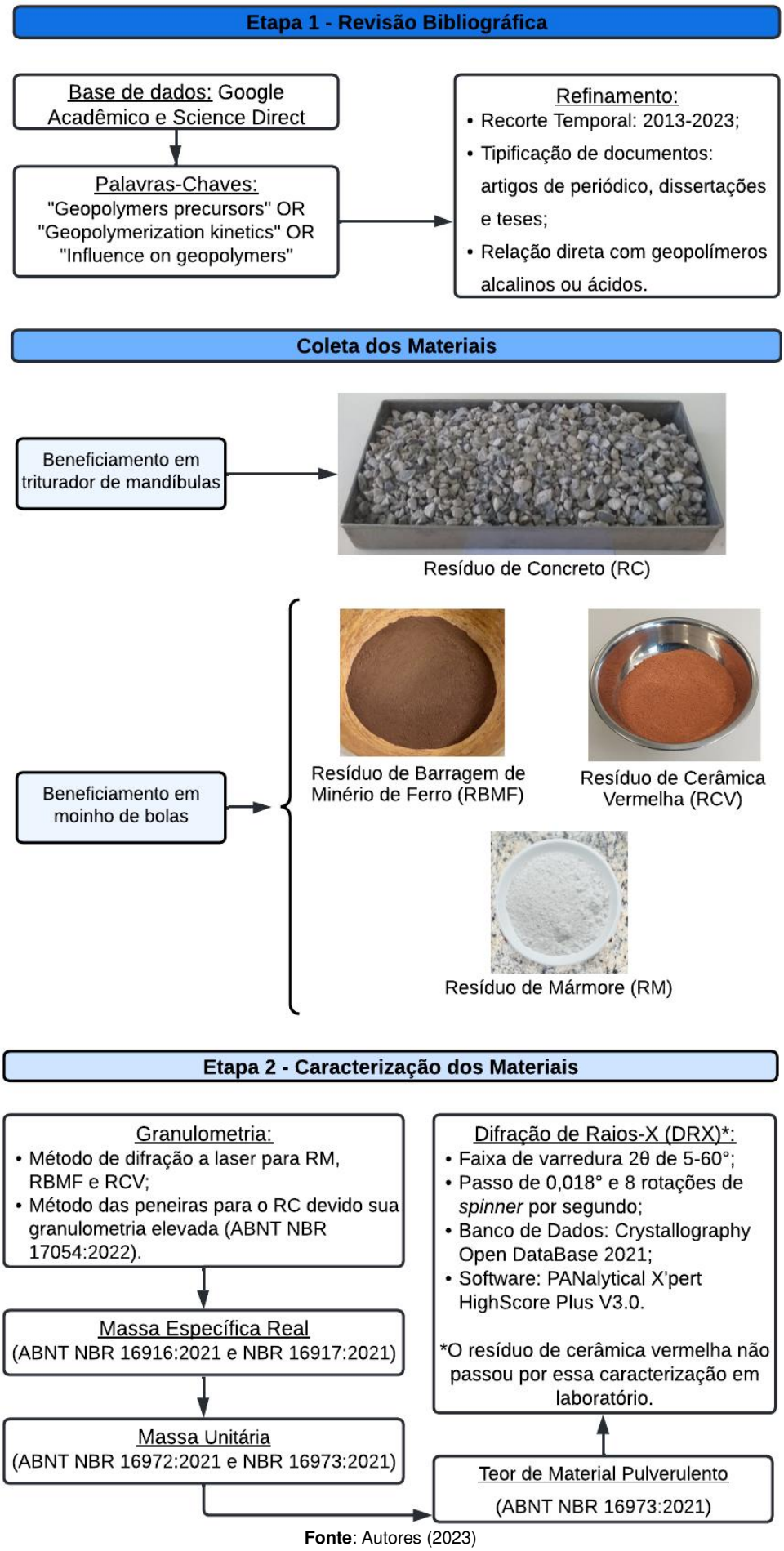
Os geopolímeros são compostos inorgânicos que atuam como ligantes e apresentam estruturas tridimensionais de aluminossilicatos com fases amorfas ou semicristalinas (CUI.*et.al.*, 2011; DAVIDOVITS, 2020). A formação dos geopolímeros é resultado da interação entre o agente ativo, de natureza ácida ou alcalina, e o material precursor normalmente rico em Al, Si e Fe, possibilitando o desenvolvimento de uma matriz densa, compacta e pouco porosa (KAZE.*et.al.*, 2021; CARVALHO *et al.*, 2023a). Geopolímeros possuem um amplo espectro de aplicações, desde revestimentos até o encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos, além de poderem ser utilizados como substituinte do cimento Portland na produção de argamassas e concretos geopoliméricos. (DOURI.*et.al.*, 2014). Dentre as principais características desse material, tem-se: alta resistência à compressão e durabilidade (XU.*et.al.*, 2015; ZENG; WANG, 2016; POUHET; CRY, 2016); elevada resistência ao fogo, ao ataque ácido; baixa retração e condutividade térmica (DOUXSON.*et.al.,* 2007; TCHAKOUTÉ *et.al.*, 2015; WANG.*et.al.*, 2015).

Os resíduos de concreto, da produção de mármore, da mineração de ferro e da cerâmica vermelha são materiais comumente encontrados no estado de Minas Gerais (LOPES.*et.al.*, 2023) que possuem características promissoras para utilização em geopolímeros. Assim, o objetivo deste trabalho é estudar o potencial de aplicação desses resíduos como precursores geopoliméricos. Para isso, realizou-se uma breve revisão bibliográfica dos fatores que influenciam na formação dos geopolímeros, seguida da caracterização física dos materiais.

2 METODOLOGIA

Adotou-se a revisão bibliográfica de cunho exploratório (PRODANOV; FREITAS, 2013) para identificar as características dos precursores geopoliméricos que influenciam no produto desenvolvido. Em seguida, foi realizada a caracterização dos materiais adotados (Figura 1). Os materiais utilizados foram: resíduos de concretos(RC) coletados em obras de demolição na cidade de Juiz de Fora/MG, sem distinção quanto à função original do concreto; pó de mármore (RM) resultante do beneficiamento de rochas calcárias em Mar de Espanha/MG; rejeito de minério de ferro (RBMF) originário da barragem de Fundão, em Mariana/MG, e coletado após seu rompimento e assoreamento no município de Gesteira/MG; e a cerâmica vermelha (RCV) proveniente de resíduos de demolição da construção de obras da Universidade Federal de Juiz de Fora, especialmente de blocos cerâmicos.

Figura 1: Fluxo metodológico adotado



Fonte: Autores (2023)

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA GEOPOLIMERIZAÇÃO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos aspectos que afetam a resistência a compressão do geopolímero trata-se da granulometria do material precursor (DEFÁVERI.*et.al.*, 2019; LOUATI, BAKLOUTI; SAMET, 2016; GUALTIERI; ROMANGNOLI; GUALTIERI, 2015). Em sua pesquisa, Defáveri *et al.* (2019) utilizaram RBMF e resíduos de lã de vidro como precursores em geopolímeros alcalinos. A mistura desses precursores apresentava granulometria inferior a 76,6 µm e resultou na formação de um geopolímero com resistência à compressão de 112,8 MPa em apenas 7 dias. Similarmente, Louati, Baklouti e Samet (2016) evidenciaram a influência do tamanho das partículas dos precursores na velocidade da geopolimerização. Os autores constataram que geopolímeros obtidos a partir de precursores com grãos menores apresentam um aumento de resistência mais rápido, em função do aumento da área superficial de contato dos grãos. Entretanto, essa característica não é crucial para a produção de ligantes alternativos, pois, ao utilizarem argila nos tamanhos de 125 µm e 63 µm, os autores observaram que a amostra mais fina atingiu uma resistência à compressão de 54 MPa em 28 dias, enquanto a amostra de 125 µm alcançou 39 MPa. Ao comparar com as diretrizes da NBR 6118 da ABNT (2014), nota-se que o produto geopolimérico de Louati, Baklouti e Samet (2016) atende aos requisitos de resistência à compressão das classes de concreto C20 (20 MPa), C25 (25 MPa), C30 (30 MPa) e C35 (35 MPa). Assim, mesmo apresentando uma resistência inferior ao geopolímero produzido com granulometria de 63 µm, a granulometria de 125 µm possui um desempenho competitivo.

A composição química do precursor exerce influência nas propriedades geopoliméricas, pois é necessário que este contenha, pelo menos, alumínio (Al) e silício (Si) para formar estruturas tetraédricas que conferem resistência ao material (TCHAKOUTÉ; RÜSCHER, 2017; MATHIVET.*et.al*., 2019; KAZE.*et.al*., 2021). Para os geopolímeros sintetizados em meio ácido, foi observado que o ferro (Fe) desempenha um papel importante, permitindo a formação de uma estrutura de fosfato férrico ($FePO_4$), ou fosfato de ferro anidro, semelhante à berlinita ($AlPO_4$), e proporcionando maior resistência ao geopolímero (KAZE.*et.al*., 2021; CARVALHO *et al*., 2023a).

Nesse aspecto, o Quadro 1 apresenta os principais componentes dos materiais analisados neste estudo, de acordo com a literatura. Nota-se que todos possuem óxidos de silício, alumínio e ferro, o que os torna potenciais precursores geopoliméricos.

Quadro 1: Caracterização química dos resíduos estudados por Fluorescência de Raios X (FRX)

RESÍDUO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	REFERÊNCIA
RC	CaO, SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3	(PASTRANA-AYALA.*et.al*., 2019)
RM	$CaCO_3$, MgO, SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3	(MARQUES; SANTOS; CRUZ, 2021)
RBMF	SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3	(DEFÁVERI.*et.al*., 2019)
RCV	SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3	(NASCIMENTO.*et.al*., 2020)

Fonte: Autores (2023)

Salienta-se que a existência de fases cristalinas no material precursor também é capaz de afetar o processo de geopolimerização, especialmente se houver baixo teor de material amorfo em sua composição. Assim, processos como a queima do material precursor em temperaturas elevadas, em alguns casos, promove a amorfização das fases cristalinas, o que torna sua estrutura mais propensa a rearranjos cristalinos quando submetida a ativação ácida ou alcalina (YE.*et.al*., 2016; MATHIVET.*et.al*., 2019; KAZE.*et.al*., 2021; CARVALHO *et al*., 2023a). Esse fenômeno otimiza o processo de geopolimerização e leva a um aumento na resistência do material. Ao adotar a cura térmica, efeito semelhante acontece devido a desaluminação do material precursor e o rearranjo de sua estrutura molecular (ZRIBI.*et.al*., 2019).

3.2 RESULTADO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

O Quadro 2 informa as características físicas dos resíduos estudados. Até este momento, os geopolímeros são aglomerantes que não possuem normatização nacional ou internacional. Desta forma, fazendo-se uma analogia com o cimento Portland, a NBR 7215 (ABNT, 2019) determina que a massa unitária de cimentos deve ser igual ou superior a 1,10 g/cm³. Assim, nota-se que todos os materiais estudados atendem a norma.

O elevado teor de material pulverulento (teor de passantes na peneira de 75 µm) do RBMF e do RCV, que atinge 53% e 100%, respectivamente, é indicativo de que ambos são materiais extremamente finos. Essa característica resulta em uma área superficial específica elevada, o que acelera a velocidade de geopolimerização, conforme comprovado em estudos anteriores. Essa análise é confirmada ao examinar a

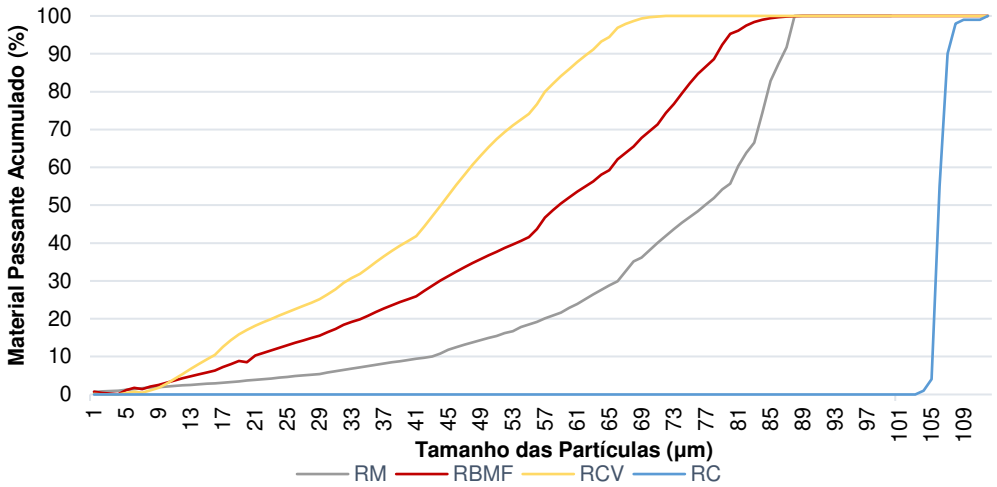
Figura 2, que apresenta as curvas granulométricas dos resíduos. É perceptível que o RC possui granulometria mais elevada, indicando para a possibilidade de ser necessário moê-lo durante um período mais longo e com maior consumo de energia, o que pode comprometer sua viabilidade. Por outro lado, todas as partículas de RCV e RBMF têm tamanho inferior a 69 µm e a 81 µm, respectivamente; e todos os grãos de RM têm tamanho inferior a 85 µm. Esses valores são favoráveis para o processo de geopolimerização, conforme constatado por Louati, Baklouti e Samet (2016).

Quadro 2: Caracterização física dos resíduos estudados

RESÍDUO	MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm³)	MASSA UNITÁRIA REAL (g/cm³)	TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO (%)
RC	2,76	1,25	0,43
RM	2,85	1,68	14,46
RBMF	2,96	1,46	53
RCV	2,66	1,11	100

Fonte: Autores (2023)

Figura 2: Granulometria dos resíduos estudados

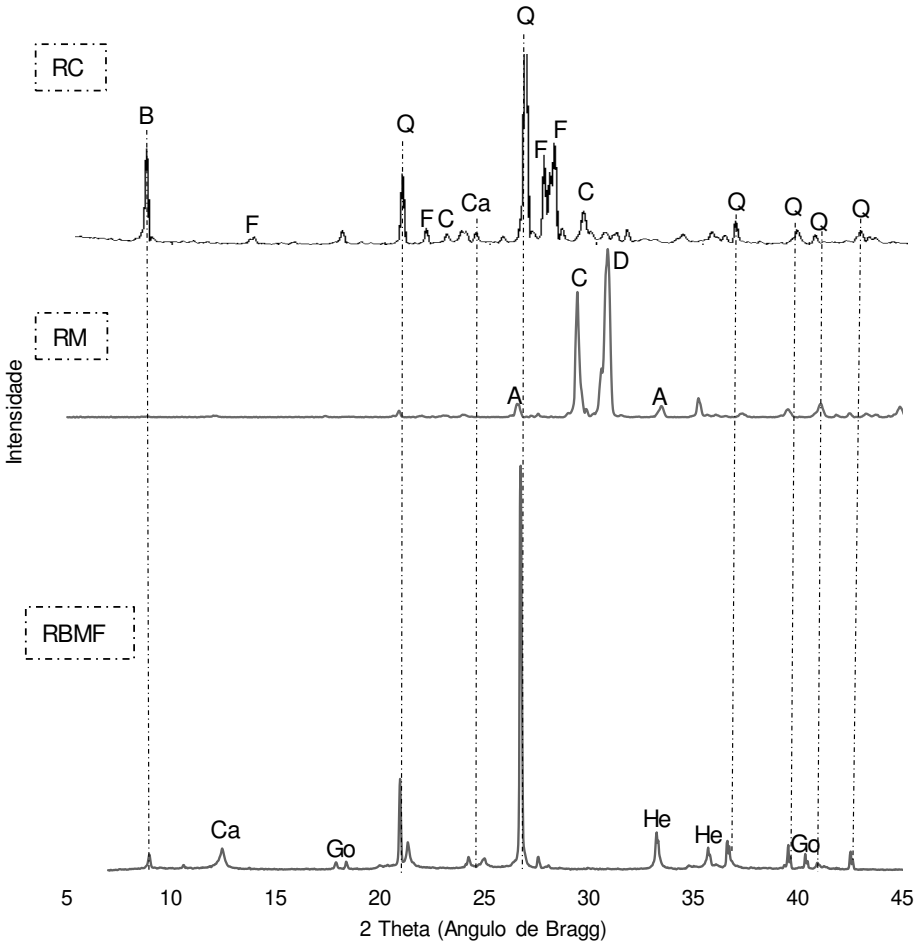


Fonte: Autores (2023)

4.5 COMPOSIÇÃO CRISTALOGRÁFICA

As fases cristalinas identificadas no DRX (Figura 3) para o RC são: biotita ($K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$), feldspato ($(K,Na,Ca).(Si,Al)_4O_8$), quatzo ($SiO_2$), calcita ($CaCO_3$), caulinita ($Al_2O_3.mSiO_2$). Para o RM, nota-se a presença da Aragonita ($CaCO_3$), calcita, dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), por fim, para o RBMF tem-se: biotita, caulinita, goethita ($FeO(OH)$), quartzo e hematita (Fe_2O_3). As fases cristalinas detectadas compactuam com a composição química evidenciada na literatura e reforça que estes resíduos podem ser empregados como precursores geopoliméricos. A presença de ferro e alumínio nesses materiais possibilitam, em meio ácido, a reorganização da estrutura amorfa em estrutura cristalina de berlinita e fosfato de ferro III em estado cristalino, conhecido como fosfato férrico, que irá conferir ao geopolímero uma matriz mais densa, uniforme, e com maior resistência a compressão, conforme identificado por Kaze.*et.al.* (2021) e Carvalho *et al.* (2023 a). Neste trabalho não foi possível realizar o DRX do RCV, mas observa-se na literatura a predominância das fases anortita ($Ca(Al_2Si_2O_8)_8$), hematita, flogopita ($KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH_2)$ e quartzo (Figura 4). Salienta-se que a queima do precursor pode resultar no aumento de sua natureza amorfa, o que facilitará a reorganização das moléculas em estruturas cristalinas ou geís durante a geopolimerização (MATHIVET.*et.al.*, 2019).

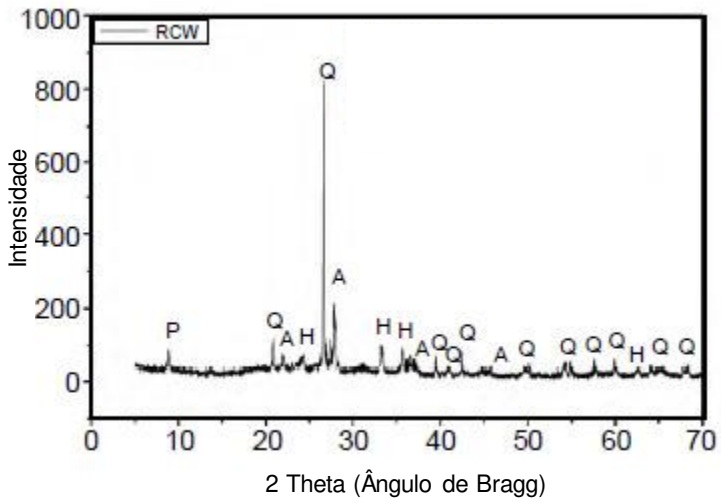
Figura 3: Identificação das fases cristalinas dos resíduos



A - Aragonita | B - Biotita | C - Calcita | Ca - Caulinita | D - Dolomita | F- Feldspato | G - Goethita | He - Hematita | Q - Quartzo

Fonte: Autores (2023)

Figura 4: Fases cristalinas identificadas para o RCV na literatura



A - Anortita | H - Hematita | P - Flogopita | Q - Quartzo

Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2019)

4 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi examinar as propriedades dos materiais precursores que influenciam as propriedades do geopolímero resultante e avaliar o potencial de utilizar resíduos originários do estado de Minas Gerais como precursores geopoliméricos. Foi conduzida uma revisão bibliográfica preliminar de natureza exploratória, seguida pela realização da caracterização física e identificação das fases cristalinas dos resíduos de concreto, de mármore, de barragem de minério de ferro e de cerâmica vermelha.

Entre as características dos materiais precursores que influenciam nas propriedades dos geopolímeros tem-se: granulometria, temperatura e tempo de queima, fases cristalinas e amorfas dos compostos e composição química. Após revisar a literatura e analisar os resultados dos ensaios físicos dos resíduos, verificou-se que todos os materiais investigados têm potencial para serem utilizados como precursores geopoliméricos. No entanto, eles seriam precursores mais promissores se apresentassem teores elevados de Si, Al e Fe amorfos. Por fim, espera-se com este estudo incentivar a reinserção de subprodutos industriais no ciclo produtivo através do desenvolvimento de novos produtos, favorecendo uma indústria da construção civil mais sustentável.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto (PROPEC), à Pró-reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPPI-UFOP) e à Universidade Federal de Juiz de Fora. Agradecemos também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento de bolsa de doutorado de Aldo Ribeiro de Carvalho, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AKHATAR, Ali; SARMAH, Ajit K. Construction and demolition waste Generation na Properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p.262-281, 2018. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085

ARAÚJO, R. A.; MENEZES, A. L. R.; CABRAL, K. C.; NÓBREGA, A. K. C.; MARTINELLI, A. E.; DANTAS, K. G. M. Evaluation of the pozzolanic activity of red ceramic waste using mechanical and physicochemical methods. **Cerâmica**, v.65, n. 375, 2019. doi: https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752649

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916:** Agregado miúdo – Determinação de densidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2021

_____. **NBR 16917:** Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16972:** Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16973:** Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio.Rio de Janeiro, 2022.

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

_____. **NBR 7215:** Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

CARVALHO, A. R.; CALDERÓN-MORALES, B. R. S.; BORBA JÚNIOR, J. C.; OLIVEIRA, T. M.; SILVA, G. J. B. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. **Construction and Building Materials**, v. 403, nov. 2023a. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133078

CARVALHO, A. R.; SILVA JÚNIOR, G.; FONTES, W. C.; SILVA, G. J. B.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, T. M. Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 4, p. 217-239, out./dez. 2023b. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000400700

CONCEIÇÃO, Mário Marcos Moreira da; BARROSO, Larissa Lopes; FONSECA, Danilo Puget da; JUNIOR, Walmeci Ferreira de Freitas; ABDULMASSIH, Michel Ferreira; BARRETO, Octávio Ferreira; BORGES, Higor Ribeiro; AIRES, Isabella Muraro; CARNEIRO, Caio César Abreu; NAZARÉ, Gustavo Antônio de Sousa; JACQUES, Jorge Mateus Menezes de Lima; MATHEWS, Josiane Coutinho; MENEZES, Arinos Benedito Fernandes; JÚNIOR, José Alvino

Pereira de Lima; SOUZA, Annanda Gabriely Moura de. Diagnóstico dos resíduos de demolição e construção no Brasil/ Diagnosis of demolition and construction waste in Brazil. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.9, p.87466–87481, 2021. doi: https://doi.org/10.34117/bjdv7n9-080.

CUI, Xue-min; LIU, Le-ping; HE, Yan; CHEN, Jin-Yu; ZHOU, Ji. A novel aluminosilicate geopolymer material with low dieletric loss. **Materials Chemistry and Physics**, v. 130, p. 1-4, 2011. doi: https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.06.039

DAVIDOVITS, Joseph. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 5ed. França: Institut Géopolymère, 2020.

DEFÁVERI, Keoma do Carmo e Silva; SANTOS, Letícia Figueiredo; CARVALHO, José Maria Franco; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti; BRIGOLINI, Guilherme Jorge. Iron Ore Tailing-Based Geopolymer Containing Glass Wool Residue: A Study of Mechanical and Microstructural Properties. **Construction and Building Materials**. v. 220, p. 375-385, 2019. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181

DUXSON, Peter; PROVIS, John L.; LUKEY, Grant C.; DEVENTER, Jannie S. J. Van. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. **Cement and Concrete Research**, v.37, n.12, p.1590-1597, 2007.

FARIA, Juliana Soares de; MANHÃES, Rosane da Silva Toledo; LUZ, Fernanda Santos da Luz; MONTEIRO, Sergio Neves; Vieira, Carlos Maurício Fontes. Incorporation of unserviceable tire waste in red ceramic. **Journal of Materials Research and Tecnology**, v.8, n.6, p.6041-6050, 2019. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.078

FLANSBJER, Mathias; PORTAL, Natalie Williams; VENNETTI, Daniel; MUELLER, Urs. Composite Behaviour of Textile Reinforced Reactive Powder Concrete Sandwich Façade Elements. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, 2018. doi: https://doi.org/10.1186/s40069-018-0301-4

G1. **Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho completa mil dias**. 2021. Disponível em: < https://g1.globo.com/jornal-103nacional/noticia/2021/10/21/rompimento-da-barragem-da-vale-em-brumadinhocompleta-mil-dias.ghtml> Acesso em: 15/04/2022.

GUALTIERI, Magdalena Lassinantti; ROMANGNOLI, Marcello; GUALTIERI, Alessandro F. Preparation of phosphoric acid-based geopolymer foams using limestone as pore forming agente – Thermal properties by in situ XRPD and Rietveld refinements. **Jornal of the European Ceramic Society**, v. 35, b. 11, p. 3167-3178, 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.04.030

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. 2020. **Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG.** Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/cites-e-comercio-exterior/cites?id=117> Acesso em: 03 de junho de 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. 2021. **Rejeitos de mineração**. Disponível em: <http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043>. Acesso em: 06 dezembro 2021.

ISMAEEL, W. S. E.; KASSIM, N. Na environmental management plan for construction waste management. **Ain Shams Engineering Journal**, 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102244

KAZE, Cyriaque Rodrigue; LECOMTE-NANA, Gisèle Laure; KAMSEU, Elie; CAMACHO, Paula Sanz; YORKSHIRE, Antonia S.; PROVIS, John L.; DUTTINE, Mathieu; WATTIAUX, Alain; MELO, Uphie Chinje Melo. Mechanical and physical Properties of inorganic Polymer cement made of iron-rich laterite and lateritic clay: A comparative study. **Cement and Concrete Research**, v.140, 2021. doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106320

LOPES, Carolina de Melo Nunes; MENDES, Vítor Freitas; GARCIA, Danielle Rios; Mendes, Júlia Castro. Residues in cement-based composites: Occurrence mapping in Brazil. **Case Studies in Construction Materials**, v.18, 2023.doi: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01763

LOUATI, S.; BAKLOUTI, S.; SAMET, B. Acid based geopolymerization kinetics: effect of clay particle size. **Applied Clay Science**, p.571-578, 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.007

MARIAN, Narcisa Mihaela; PEROTTI, Matteo; INDELICATO, Carlo; MAGRINI, Claudia; Giorgetti, Giovanna; CAPITANI, Giancarlo; Viti, Cecília. From high-volume industrial waste to new ceramic material: The case of red gypsum muds in the TiO_2 industry. **Ceramics International**, v. 49, n. 10, p.15034-15043, 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.086

MARQUES, Marcos Vinícius Dias; SANTOS, Rodrigo Rodrigues dos; CRUZ, Cláudia Patrícia Torres. O Panorama dos Resíduos de Corte de Mármore e Granito no Cenário Atual da Construção Civil. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.3, p.26800-26811, 2021. doi: 10.34117/bjdv7n3-401

MATHIVET, V.; JOUIN, J. GHARZOUNI, A. SOBRADOS, I.; CELERIER, H.; ROSSIGNOL, S. PARLIER, M. Acid-based geopolymers: Understanding of the structural evolutions during consolidation and after termal treatments. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 512, p.90-97, 2019. doi: https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.02.025

NASCIMENTO, Júlia Moura; MARTINS, Juliana Patrocinio; LIMA, Ana Paula Castello de; BULHOSA, Sara de Jesus; Bellato, Vanessa Creto; ALLEDI, Carla Therezinha Dalvi Borjaille; ARAÚJO, Georgia Serafim; Galdino, André Gustavo de Souza. Caracterização microestrutural e propriedades físicas e mecânicas de argilas da região norte do espírito santo. **Revista Ifesciência**, v.6, n.2, p.17-27, 2020. doi: 10.36524/ric.v6i2.527.

NAWAZ, A.; CHEN, J.; SU, X. Exploring the trends in construction and demolition waste (C&DW) research: A scientometric analysis approach. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v.55, 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102953

OSBORNE, Dave (Ed.). **The Coal Handbook: Towards Cleaner Production**: Volume 2: Coal Utilisation. Elsevier, 2013.

PASTRANA-AYALA, Jhonny; SILVA-URREGO, Yimmy; ADRADA-MOLANO, Juan; DELVASTO-ARJONA, Silvio. Propiedades físico-mecánicas de concretos autocompactantes producidos con polvo de residuo de concreto. **Informador Técnico**, v. 83, n. 2, p.174-190, 2019. doi:https://doi.org/10.23850/22565035.2170.

PRIYADARSHINI, Saigeeta; SOREN, Shatrughan; DURGA, Geeta. Effect of waste marble dust powder as a filler material on mechanical properties and water uptake capacity of Epoxy/glass fiber composites. **Materials Today: Proceedings**, 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.096

POUHET, R.; CYR, M. Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes. **Construction and Building Materials,** v. 120, p.150-160, 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.061.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: método e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

SILVA, Guilherme Jorge Brigolini; SANTANA, Vanessa Pereira; WÓJCIK, Marta. Investigation on mechanical and microstructural Properties of álcali-activated materials made of wood biomass ash and glass powder. **Powder Technology**, v. 377, p. 900-912, 2021. doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.09.048

TCHAKOUTÉ, H. K; RUSCHER, C. H.; DJOBO, J. N. Y.; KENNE, B. B. D.; NJOPWOUO, D. Influence of gibbsite and quartz in kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymer cements. **Applied Clay Science**, v. 107, p. 188-194, 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.023

TCHAKOUTÉ, Hervé Kouamo; RÜSCHER, Claus Henning. Mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements from sodium waterglass and phosphoric acid solution as hardeners: a comparative study. **Applied Clay Science**, v. 140, p. 81-87, 2017. doi: https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.002

THEJAS, H. K.; HOSSINEY, Nabil. Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, 2022. doi: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00973

WANG, Kai-tuo; HE, Yan; SONG, Xiao-ling; CUI, Xue-min. Effects of the metakaolin-based geopolymer on high-temperature performances of geopolymer/PVC composite materials. **Applied Clay Science**, v.114, p.586-592, 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.008

XU, Meng-xue; HE, Yan; WANG, Chao-qun; HE, Xue-feng; He, Xu-qing; LIU, Jing; CUI, Xue-min. Preparation and characterization of a self-supporting inorganic membrane based on metakaolin-based geopolymers. Applied Clay Science, v. 115, p.254-259, 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.019

YE, Nan; YANG, Jiakuan; LIAN, Sha; HU, Yong; HU, Jingping; XIAO, Bo; HUANG, Qifei. Synthesis and strength optimization o fone-part geopolymer based on red mud. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 317-325, 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.099

ZENG, Shixin; WANG, Jialai. Characterization of mechanical and electric Properties of geopolymers synthesized using four locally available fly ashes. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 386-399, 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.011

ZRIBI, M. SAMET, B.; BAKLOUTI, S. Effect of curing temperature on the synthesis, structure and mechanical properties of phosphate-based geopolymers. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 511, p.62-67, 2019. doi: https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.01.032