

AVALIAÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE GEOPOLÍMEROS PRODUZIDOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

E. L. P. MELO¹, R. A. M. FIGUEIREDO², D. B. MAZZINGHY³

Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN), Universidade Federal de Minas Gerais¹
Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)²

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0666-0865>
edu.lpmelo@gmail.com

Submetido 13/05/2021 - Aceito 28/09/2021

DOI: 10.15628/holos.2022.12483

RESUMO

O crescimento da construção civil e da indústria cimenteira no mundo tem estimulado o desenvolvimento de cimentos sustentáveis objetivando diminuir a emissão de CO₂ gerado durante a produção do Cimento Portland. Outro desafio atual é o uso sustentável de resíduos de mineração, que poderiam ter destinos melhores que as pilhas e barragens. Nesse contexto, uma alternativa para amenizar esses problemas é a produção de geopolímeros utilizando resíduos de mineração como agregados. O

objetivo desse trabalho foi comparar o efeito da adição de resíduos de mineração como agregados em geopolímeros e avaliar a resistência à compressão dos mesmos. Os resultados indicaram que tanto o estéril como o rejeito são alternativas satisfatórias na produção de cimentos sustentáveis, atingindo resistências de 46 MPa e 53 MPa, respectivamente, 28 dias após moldagem e curados em temperatura ambiente.

Palavras chave: Rejeito; Estéril; Coprodutos; Economia Circular, Sustentabilidade.

EVALUATION OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF GEOPOLYMERS PRODUCED USING MINING WASTES

ABSTRACT

The growth of civil construction and cement industry in the world has promoted sustainable cements development with the aim of decrease CO₂ emission, generated during Portland Cement's production. Another current challenge is the sustainable use of iron mining wastes, which are usually stored on piles and dams but should have a better destiny. Therefore, an alternative to alleviate these problems is to produce geopolymer using

mining wastes as aggregates. The purpose of the study was comparing the effect of adding mining wastes as aggregates in geopolymers and evaluate their compressive strength. The results indicated that both waste and tailings were satisfactory alternatives in sustainable cement's production, reaching strengths of 46 MPa and 53 MPa, respectively, 28 days after molding and cured at room temperature.

KEYWORDS: Tailings, Waste, Co-products, Circular Economy, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A emissão excessiva de CO₂ na atmosfera é um dos males que vem sendo amplamente debatidos na esfera global, devido ao seu grande impacto na vida do ser humano. A construção civil e, por consequência, a indústria cimenteira estão diretamente ligadas a esse problema, já que cerca de 6% do CO₂ emitido na atmosfera por ações antrópicas são provenientes da produção de cimento [1], em especial o cimento Portland. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, o Brasil produziu no ano de 2019 cerca de 56 milhões de toneladas de cimento, sendo 26% desse valor produzido somente em Minas Gerais [2].

A grande quantidade de resíduos gerados pode ser um empecilho ao crescimento sustentável do setor mineral, que tem como principais resíduos: o estéril e o rejeito. O estéril é um resíduo sólido de extração mineral proveniente do decapeamento superficial da jazida [3]. O rejeito é um produto gerado a partir da atividade de beneficiamento do minério [4]. De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012), não existe no Brasil um controle sistemático, e em escala nacional, sobre a quantidade de estéril gerado pela mineração, porém sabe-se que em Minas Gerais essa quantidade é de cerca de 70% a 80% do total da massa de resíduos sólidos minerários [5]. Em relação ao rejeito, há uma estimativa de que entre 2010 e 2030 a produção brasileira total seja de 11,4 milhões de toneladas, sendo 41,4% desse total proveniente da mineração de ferro [5]. O estéril e o rejeito podem gerar coprodutos para outras indústrias e dessa forma promover o uso sustentável desses resíduos.

O pesquisador francês Joseph Davidovits é o pioneiro na pesquisa de geopolímeros. Segundo ele, a pesquisa teve início após um grande incêndio que ocorreu na França na década de 1970, cerca de 150 pessoas morreram devido às chamas de material plástico dentro de um estabelecimento. Davidovits trabalhava com polímeros orgânicos na época e afirma que o acontecimento foi um choque para a indústria, o que o levou a organizar um estudo profundo sobre a criação de polímeros minerais com resistência ao calor [6]. Em 1979 foi criado o *Institut Géopolymère* com o objetivo de estudar o material e suas aplicações em diversas áreas da ciência. Desde então o estudo tem conquistado extrema relevância no âmbito científico.

Geopolímeros são definidos como polímeros inorgânicos produzidos por uma reação de ativação alcalina de aluminossilicatos previamente tratados termicamente [7]. Nessa reação o aluminossilicato, que se torna altamente reativo após tratamento, reage com substâncias alcalinas ou alcalinas-terrosas em uma reação de hidratação, formando uma cadeia polimérica capaz de fornecer resistências mecânicas significativas comparadas aos cimentos tradicionais. A polimerização pode ser influenciada por parâmetros tais como a temperatura de cura, a quantidade de água, a relação sílica/alumina e o tipo de ativador utilizado [8].

A metodologia “one part” para obtenção do geopolímero é feita com uma mistura uniforme do aluminossilicato junto aos ativadores alcalinos, ambos na fase sólida, e a água adicionada posteriormente em um processo semelhante ao normalmente realizado usando o Cimento Portland [9]. A reação ocorre por meio da dissolução de Al e Si no meio alcalino seguida de uma reorganização das espécies dissolvidas, resultando na formação de um gel que, à medida que se reorganiza, cria uma rede tridimensional de estrutura sílico-aluminosa [10]. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra de forma simplificada o processo.



Figura 1: Esquema simplificado do processo de geopolimerização, adaptado de [11].

A utilização de resíduos da mineração como agregados em geopolímeros tem sido considerada uma opção bastante atrativa para mitigar os problemas advindos da estocagem de rejeitos em barragens e, o uso desses resíduos na obtenção de coprodutos para construção civil tem se mostrado satisfatório [12-13]. Figueiredo *et al.* [12] utilizou uma proporção 1:1 entre reagentes e rejeito, obtendo resistências à compressão equiparáveis as argamassas de cimento Portland. Duarte *et al.* [14] também alcançou boas resistências mecânicas utilizando a metodologia “two parts”, com solução alcalina de NaOH e Na₂SiO₃, incorporando 40% e 60% de rejeito na composição da argamassa. Guimarães *et al.* [15] obteve adequada resistência à compressão na mistura com 50% de rejeito incorporado em relação à massa total do corpo de prova.

O objetivo desse trabalho é verificar a funcionalidade tanto do rejeito como do estéril, bem como, fazer um comparativo entre estes na síntese de cimentos sustentáveis.

2 METODOLOGIA

Inicialmente, foi feita apenas a mistura geopolimérica, sem a utilização de resíduos de mineração. O material precursor utilizado foi o metacaulim (MK) e os ativadores em estado sólido foram o hidróxido de sódio (HS) e o silicato de sódio (SS), com a proporção água/sólido de 0,35. A razão silicato/hidróxido utilizada foi de 5:1, com 70% de metacaulim em peso, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Proporções (em massa) da mistura inicial.

MK (%)	HS (%)	SS (%)	Água/sólido
70	5	25	0,35

Os testes foram executados adicionando todos os materiais na forma sólida junto à água no momento que se inicia a mistura em uma argamassadeira. O tempo de mistura foi de 10 minutos e foram moldados corpos de prova em formas cúbicas com dimensões de 40 mm. Estes foram armazenados à temperatura ambiente e desmoldados após 24 horas. Os testes de resistência à compressão foram realizados com 1, 3, 7, 14 e 28 dias após a síntese dos corpos de prova e, para cada dia foram rompidos 3 corpos de prova.

Na segunda etapa, os resíduos de mineração foram incorporados como agregados na produção dos geopolímeros. Nesse caso, misturou-se somente o cimento geopolimérico na argamassadeira por 2,5 minutos e após a adição do estéril/rejeito misturou-se por mais 7,5 minutos. O objetivo foi realizar um comparativo entre rejeito e estéril atuando nessa função. Além disso, os dois foram submetidos a um peneiramento para que a granulometria estivesse abaixo de 150 micrômetros, para fins de comparação. Foi utilizada a mesma proporção entre precursor e reagentes, porém, substituiu-se 50% da massa total de sólidos por rejeito em um teste e 50% da massa de sólidos por estéril em um segundo teste. A proporção água/sólido foi de 0,37 e as demais variáveis foram mantidas constantes.

A composição química dos materiais foi verificada por fluorescência de raios-X em um espectrômetro Philips - Panalytical, modelo PW 2400, com tubo de anodo de ródio. Os testes de resistência à compressão foram realizados em uma prensa elétrica da Engetotus.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta a análise química dos materiais utilizados.

Tabela 2: Composição química dos materiais utilizados (%).

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	H ₂ O	LOI*
MK	56,25	36,87	0,58	0,05	0,21	3,21	0,32	-	2,19
SS	53,35	-	-	-	25,28	-	-	21,37	-
HS	-	-	-	-	77,48	-	-	22,52	-
Rejeito	82,97	0,30	15,88	0,01	-	<0,01	<0,1	-	-
Estéril	20,33	0,22	77,28	0,03	-	<0,1	<0,01	-	-

*Perda ao fogo

Davidovits e Sawyer determinaram faixas ideais de proporções entre os materiais utilizados na produção de geopolímeros [16]. Barbosa obteve maiores resistências utilizando as proporções: SiO₂/Al₂O₃=3,3; Na₂O/SiO₂=0,25 e H₂O/Na₂O=10 [17].

As relações molares dos óxidos na mistura, desconsiderando o rejeito e o estéril, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Relações molares do geopolímero.

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$
3,5	0,2	0,7	13,8

Os corpos de prova foram submetidos a testes de resistência à compressão uniaxial nos intervalos especificados anteriormente. A Figura 2 ilustra o aspecto geral dos corpos de prova.

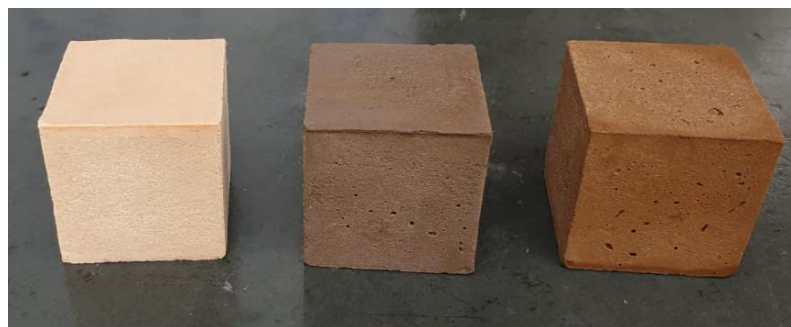


Figura 2: Aspecto geral dos corpos de prova, à esquerda o geopolímero sem agregado, ao centro a mistura com o rejeito e à direita a mistura com o estéril.

Os valores de resistência plotados nos respectivos dias são médias aritméticas das resistências apresentadas pelos três corpos de prova utilizados em cada ensaio. A Figura 3 representa o comportamento dos corpos de prova em função do tempo de cura.

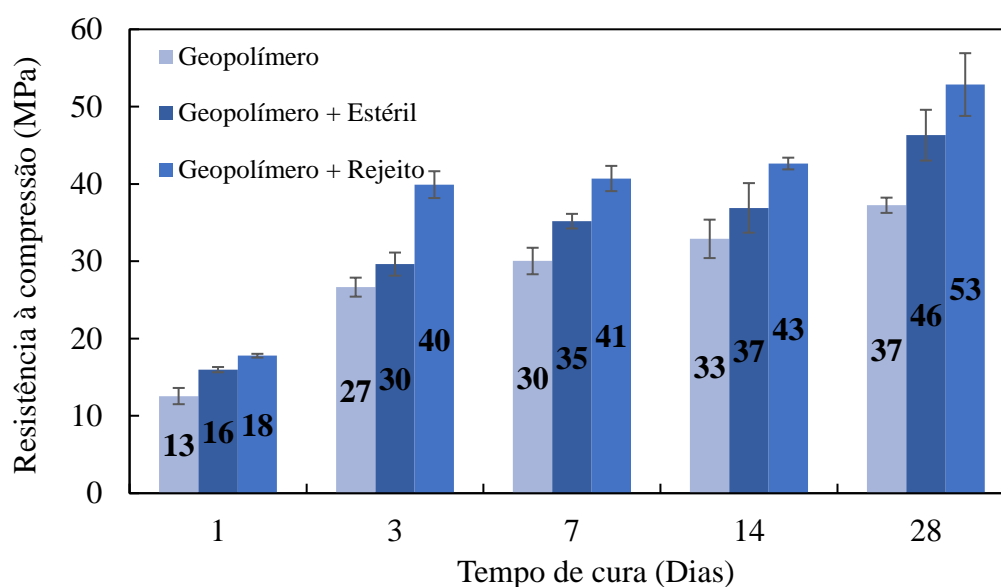


Figura 3: Ensaio de compressão uniaxial.

No período entre um e três dias houve um ganho significativo de resistência, a proporção de hidróxido no ativador reflete diretamente no tempo de endurecimento do material [18].

Observou-se também um aumento significativo na resistência do geopolímero quando se adicionou o agregado, especialmente o rejeito. Em 28 dias a resistência à compressão do material foi de 37 MPa (sem agregado), 46 MPa (com o estéril) e 53 MPa (com o rejeito).

4 CONCLUSÃO

Após a realização dos testes de resistência à compressão, conclui-se que o geopolímero é uma alternativa bastante atrativa em relação ao Cimento Portland devido ao fato de sua produção, em larga escala, poder reduzir significativamente a emissão de CO₂ na atmosfera. Além disso, a possibilidade de utilização de resíduos de mineração como agregados na massa geopolimérica se mostrou bem efetiva. Os testes utilizando rejeito e estéril de mineração atingiram valores de 46 MPa e 53 MPa, respectivamente, 28 dias após o desmolde. Esses valores são expressivos quando comparados aos valores de resistência do cimento tradicional.

É preciso avaliar melhor as questões econômicas acerca da produção desse material em substituição ao Cimento Portland. Entretanto, de forma introdutória, os testes mostram que o geopolímero é um material promissor na indústria de construção civil e pode também ser associado ao desenvolvimento de coprodutos na indústria mineral.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

L. W. De Matos, “Análise Dos Métodos De Redução De Emissão De CO₂ Em Uma Indústria De Cimento”, Congresso Nacional Excelência em Gestão, 2015.

S. N. da I. do Cimento, “Produção Nacional de Cimento por Regiões e Estados (t) 2019”, 2019.

I. de P. E. A. IPEA, “Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas - Relatório de Pesquisa”, IPEA (Instituto Pesquisa Econômica Aplicada, p. 1–46, 2012.

IBRAM, Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. 2016.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente, “Plano Nacional de Resíduos Sólidos”, MMA Publicações, p. 103, 2012, Disponível em: http://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf.

G. Institute, “State of the Geopolymer R&D 2019”, 11th annual Geopolymer Camp meeting, 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JzW6AIXSV0k>. Acessado em: 08 de dezembro de 2020.

A. T. Pinto, “Introdução ao estudo dos geopolímeros”, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, p. 88, 2006. Disponível em: <http://www.geopolimero.com.br/PDF/introducao.pdf>.

J. P. Ferreira, F. Marciana, A. Santos, S. G. Tavares, e M. T. Paulino, “Obtenção de geopolímero a partir do metacaulim com adição de rejeito de mineração depositado na barragem de córrego do



feijão (Brumadinho - MG, Brasil)", nº 2015, p. 1–10.

C. Ma, B. Zhao, S. Guo, G. Long, e Y. Xie, "Properties and characterization of green one-part geopolymer activated by composite activators", *J. Clean. Prod.*, vol. 220, p. 188–199, 2019.

A. M. Azevedo, "Síntese e caracterização química, física e mecânica de geopolímero utilizando caulim da amazônia desidroxilizado", vol. 4, p. 9–15, 2017.

X. Yao, Z. Zhang, H. Zhu, e Y. Chen, "Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry", *Thermochimica Acta*, vol. 493, nº 1–2, p. 49–54, 2009.

R. A. M. FIGUEIREDO, E. C. COURA, e D. B. MAZZINGHY, "Obtenção de argamassa geopolimérica a partir de rejeitos de flotação de minério de ferro", *Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 2019, Disponível em: <http://www.entmme2019.entmme.org/trabalhos/181.pdf>.

R. A. M. FIGUEIREDO, A. B. M. SILVEIRA, E. L. P. MELO, G. Q. G. COSTA, P. R. G. BRANDÃO, M. T. P. AGUILAR, A. B. HENRIQUES, D. B. MAZZINGHY, "Mechanical and chemical analysis of one-part geopolymers synthesised with iron ore tailings from Brazil", *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.153>.

G. M. C. DUARTE, F. G. P. A. SILVA, Y. S. PEREIRA, e F. S. LAMEIRAS, "Desenvolvimento De Argamassa Geopolimérica Incorporando O Sedimento De Candonga", *Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 2019. Disponível em: <http://www.entmme2019.entmme.org/trabalhos/097.pdf>.

A. C. P. D. Guimarães, M. F. M. Oliveira, J. P. C. Da SILVA, e F. S. Lameiras, "Obtenção de geopolímero com adição de rejeito de mineração", 3º Congresso Luso - Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis, Coimbra, 2018.

J. Davidovits, "Early high-strength mineral polymer, United States Patent", 1985.

V. F. F. Barbosa, K. J. D. MacKenzie, e C. Thaumaturgo, "Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers", *International Journal of Inorganic Materials*, volume 2, nº 4, p. 309–317, 2000.

H. S. Maccarini, "Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim", *Repositório Institucional da UFSC*, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/157147>.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Melo, E. L. P., Figueiredo, R. A. M., & Mazzinghy, D. B. (2022). AVALIAÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE GEOPOLÍMEROS PRODUZIDOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE MINERAÇÃO. *HOLOS*, 8. Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/12483>

SOBRE OS AUTORES:

E. L. P. MELO

Graduando em Engenharia de Minas na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

E-mail: edu.lpmelo@gmail.com



ORCID-ID: <https://orcid.org/0000-0002-0666-0865>

R. A. M. FIGUEIREDO

Doutorando em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Bacharel em Engenharia de Minas pela Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG).

E-mail: rickfigo86@gmail.com

ORCID-ID: <https://orcid.org/0000-0003-0429-6497>

D. B. MAZZINGHY

Doutor em Tecnologia Mineral pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Mestre em Tecnologia Mineral pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Bacharel em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais.

E-mail: dmazzinghy@demin.ufmg.br

ORCID-ID: <https://orcid.org/0000-0003-2569-6932>

Editora responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento



Recebido: 13 de maio de 2021

Aceito: 28 de setembro de 2021

Publicado: 28 de dezembro de 2022