



## USO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO COMO AGREGADO NO DESENVOLVIMENTO DE UM CIMENTO SUSTENTÁVEL

PINTO, T.C.<sup>1</sup>, SILVA, L.F.<sup>1</sup>, MORALES, C.R.<sup>2</sup>, FRANCISCO, F.G.O.<sup>1</sup>, GONÇALVES, J.L.N.<sup>1</sup>, GALÉRY, R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Minas  
tiagopinto103@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade de Santiago do Chile (USACH), Departamento de Engenharia de Minas

### RESUMO

Na busca de soluções alternativas às barragens de rejeito, estudos têm sido desenvolvidos para o aproveitamento desses resíduos substituindo os agregados utilizados na construção civil. Nessa linha de pesquisa, o presente trabalho envolveu um estudo da aplicação dos rejeitos de minério de ferro na produção de geopolímeros, um tipo de cimento sustentável. Testes em laboratório foram realizados utilizando rejeito de minério de ferro, soluções de hidróxido de sódio e silicato de sódio (na proporção 1:4) e metacaulim. Foram realizados testes de resistência à compressão uniaxial com os corpos de prova produzidos após tempo de cura de 7, 14 e 28 dias. As mesmas condições foram testadas utilizando-se comparativamente a areia em substituição ao rejeito. Os resultados obtidos mostraram que as resistências dos corpos de prova de areia e rejeito após 28 dias de cura foram, respectivamente, 37,3 e 36,0 MPa, o que demonstra a possibilidade de aplicação do rejeito de minério de ferro como agregado na produção de cimentos sustentáveis que podem ser utilizados em algumas aplicações pela construção civil.

**PALAVRAS-CHAVES:** Minério de ferro, Rejeitos, Cimento sustentável, Geopolímeros

### ABSTRACT

Searching for alternative solutions for tailings dams, studies have been developed replacing construction aggregates by iron ore tailings. The present work involved a study of the application of iron ore tailings for producing geopolymers, a type of sustainable cement. Laboratory tests were carried out using iron ore tailings, sodium hydroxide and sodium silicate solutions (ratio 1:4) and metakaolin. Uniaxial compression tests were performed with the test specimens produced after curing time of 7, 14 and 28 days. For comparison, the same conditions were tested out using silica sand replacing iron ore tailings. The results showed that the resistance of silica sand and iron ore tailings samples after 28 days of curing time were, respectively, 37.3 and 36.0 MPa, which demonstrates the possibility of application of the iron ore tailings as aggregate in the production of sustainable cements that can be used in some specific applications by civil construction.

**KEYWORDS:** Iron ore, Tailings, Sustainable cement, Geopolymers.

---

## 1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro é hoje uma das principais commodities do Brasil e principalmente de Minas Gerais; o processamento sustentável visando retorno econômico e ambiental para municípios circunvizinhos afetados por esta prática. No final da vida útil da mina existe a necessidade de um retorno da área em condições adequadas para diversos fins e dentre as estruturas que necessitam de recuperação observa-se que a barragem de rejeito é, geralmente, uma estrutura com uma enorme quantidade de material. A barragem de rejeito é a forma comum de escoar os minerais não úteis, parte do produto final do beneficiamento, e são grandes estruturas que retêm 45 % lama e 5% de água. Grandes toneladas de rejeitos de minério de ferro são geradas consideravelmente gerando uma problemática ao meio ambiente.

Uma solução sustentável para essa problemática é o aproveitamento dos rejeitos para assim diminuir o impacto ambiental que estes grandes volumes de rejeitos causam. O termo “Geopolímero” designa materiais de origem geológica ou matérias-primas sintetizadas por hidróxidos alcalinos ou pela ativação alcalina de silicato (Davidovits, 1979).

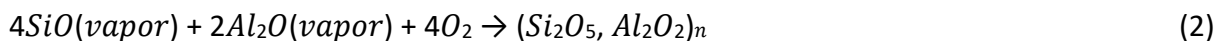
Quanto à química, os geopolímeros são baseados em sílico-aluminatos, onde o termo sialato é baseado em sílico-aluminato. Sialato é uma abreviação para sílico-óxidoaluminato. A estrutura de sialato possui tetraedros SiO<sub>4</sub> e AlO<sub>4</sub> ligados alternadamente partilhando todos os oxigênios. Os íons positivos (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Ba<sup>++</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) estão presentes na estrutura para contrabalancear a carga negativa do Al<sup>3+</sup> em número de coordenação IV. Os polissialatos apresentam a seguinte fórmula empírica: Mn {-(SiO<sub>2</sub>)<sub>z</sub> -AlO<sub>2</sub>}<sub>n</sub>, wH<sub>2</sub>O.

“M” é um cátion como potássio, sódio ou cálcio, e “n” é o grau de policondensação; “z” é 1, 2, 3. Os polissialatos são polímeros em cadeias ou anéis com Si<sup>4+</sup> e Al<sup>3+</sup> em número de coordenação IV com oxigênio e com microestrutura amorfa a semicristalina.

Os compostos geopoliméricos envolvidos em materiais desenvolvidos para aplicações industriais são cristalinos ou não-cristalinos (estrutura amorfa ou vítrea). Polissialato cristalino Mn-(Si-O-Al-O)<sub>n</sub> e polissiloxossilato Mn-(Si-O-Al-O-Si-O)<sub>n</sub> resultam das condições de cura hidrotérmicas, uma vez que o endurecimento em temperatura ambiente induz a estruturas amorfas/vítreas.

O índice de dispersão em um geopolímero pode ser observada de forma que os raios X difratam para assim formar um padrão de difração. No estado não-cristalino, a difração de raios X tem como resultado, um halo difuso amplo em vez de picos acentuados de difração. Para um melhor panorama da estrutura molecular faz-se uma espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN-RAM).

A fabricação do (Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)<sub>n</sub> é realizada (Eq. 1) calcinando os hidróxidos de aluminossilicatos (Varela, 2013) (Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Al<sub>2</sub>(OH)<sub>4</sub>), ou (Eq. 2) pela condensação de vapores de SiO e de Al<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:



Como produto também de  $2SiO + O_2 \rightarrow 2SiO$  (Sílica ativa condensada) e  $Al_2O + O_2 \rightarrow Al_2O_3$  (Coríndon).

Os chamados geopolímeros ou polissialatos, um termo adotado para abreviar o termo polisílico-aluminatos, descritos pela primeira vez em patentes 1981, onde são apresentados vários exemplos de mistura de reagentes e processos de obtenção. Os polissialatos apresentam características particulares que revelam o seu grande potencial de aplicação como aglomerante, em substituição ao cimento Portland.

A fim de obter um cimento sustentável capaz de substituir o cimento Portland com as mesmas condições de resistência mecânica, foram realizados testes de comparação entre o cimento sustentável preenchido com rejeito de minério de ferro e areia comum de construção civil.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a produção do cimento geopolimérico foram utilizados diferentes reagentes em variadas proporções. Para tanto, foram realizados dois testes: um utilizando rejeito de flotação e lama de minério de ferro e outro utilizando areia. A Tabela 1 apresenta a proporção dos materiais utilizados em cada um dos testes.

Tabela 1. Composição do material de cada teste.

Reagentes	Teste A	Teste B
Rejeito Arenoso	✓	X
Lama	✓	X
Areia	X	✓
Metacaulim	✓	✓
Hidróxido de Sódio: Silicato de Sódio	✓	✓

Os reagentes sólidos foram misturados em recipiente plástico até apresentarem aspecto homogêneo. Em seguida foi adicionada a mistura solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio (na proporção 1:4) e a pasta resultante foi novamente homogeneizada em uma batedeira com adição controlada de água por máximo de 5 (cinco) minutos ou até apresentar consistência pastosa.

Ao longo do estudo, utilizando as referências na literatura de proporções entre os elementos e óxidos e buscando simular a proporção de rejeito e lama existente na barragem de rejeito, diversas proporções dos materiais foram testadas. Uma vez que a viabilidade técnica atingisse condições favoráveis foi repetido o procedimento utilizando a areia no lugar do rejeito e da lama.

Os ensaios de geopolimerização foram realizados adicionando-se os componentes sólidos da mistura (areia e metacaulim) a um recipiente e misturando-os até se tornarem um pó homogêneo. Em seguida, adicionou-se os reagentes alcalinos (hidróxido de sódio e silicato de sódio na proporção 1:4) e manteve-se o sistema sob agitação por 10 minutos, adicionando-se água em pequenas quantidades controladas de acordo com a necessidade, até obter uma pasta homogênea que apresenta uma boa consistência.

A massa foi vertida em moldes de PVC cilíndricos de 70mm de altura e 35mm de diâmetro (Figura 1), previamente lubrificadas com óleo mineral e com sua base revestida de filme plástico. Os tubos são colocados em mesa vibratória até obter um melhor acondicionamento da massa e remoção de gases presos na mesma (1 minuto aproximadamente). Após 24h os corpos solidificados são retirados dos moldes e deixados em cura até realização dos ensaios de resistência à compressão. Todos testes foram realizados em triplicata de modo a diminuir os erros associados.



**Figura 1. Os moldes utilizados na preparação dos corpos de prova à esquerda e a direita os corpos de prova antes de serem desenhados.**

A resistência dos corpos de prova foi medida através de ensaios de resistência à compressão uniaxial após os intervalos de 7, 14 e 28 dias. Para estes ensaios, adotaram-se as recomendações da norma brasileira NBR 5738 de 30 de maio de 2018, em relação à razão altura (H) e diâmetro (D) de  $H/D = 2$  para os corpos de prova.

Os produtos obtidos foram caracterizados utilizando análises de difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX). Além disso, também foram realizados ensaios de granulometria a laser para o rejeito e lama e análise granulométrica por peneiramento para a areia.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentadas, na Tabela 2, as análises granulométricas dos três materiais sólidos, o rejeito + lama, o metacaulim e a areia.

**Tabela 2. D50 e D90 de cada reagente sólido.**

Metacaulim ( $\mu\text{m}$ )		Rejeito+Lama ( $\mu\text{m}$ )		Areia ( $\mu\text{m}$ )	
D50	D90	D50	D90	D50	D90
22	38	56	125	414	850

Importante destacar que a análise granulométrica da areia foi feita em estado natural e no caso dos corpos de prova foi feito um corte em 1200 micrômetros de forma a fazer uma aproximação da granulometria dos testes com o rejeito + lama, e analisar a influência granulométrica na resistência dos corpos.

Foram realizados testes de caracterização química do metacaulim e do rejeito + lama. Esses resultados são apresentados na Figura 2. Observa-se no metacaulim uma elevada concentração de óxido de alumínio e óxido de silício, 44,29% e 47,51%, respectivamente e uma pequena concentração de óxido de ferro de 5,48%. No rejeito + lama observa-se uma elevada concentração de óxido de silício e de óxido de ferro, 76,28% e 22,55%, respectivamente e, apenas, 0,23% de óxido de alumínio.

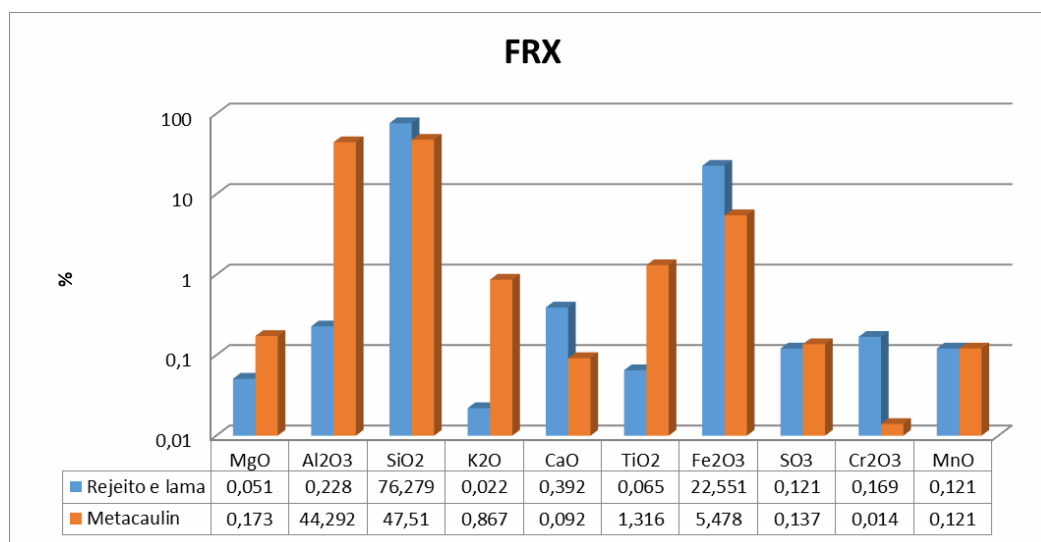


Figura 2. Composição química do metacaulim e do rejeito e lama.

A caracterização mineralógica através da difração de raios X do rejeito + lama mostraram a presença de quartzo, hematita, goethita, magnetita e caulinita.

Já no caso do metacaulim, a difração de raios X mostrou a presença da mica, muscovita, da caulinita, do quartzo, da hematita e, também, de fases amorfas.

Não foi realizada a caracterização mineralógica da areia uma vez que se trata da areia usada em construção civil e assumiu-se que a areia era constituída principalmente de quartzo.

A Tabela 3 apresenta a constituição das pastas geopoliméricas geradas:

Tabela 3. Proporções finais dos reagentes utilizados em cada experimento.

Teste	Fórmula
A	50%Barragem(40%Rejeito de flotação+10%Lama)+25%MK*+25%HS:SS**(1:4)+61mlÁgua
B	50% Areia + 25% MK + 25% HS:SS (1:4) + 31ml Água

MK\*: Metacaulin, HS:SS\*: Hidróxido de Sódio:Silicato de Sódio

Observa-se na tabela 4 que nos primeiros 7 e 14 dias de cura, a resistência para do corpo preenchido com areia apresentou o melhor desempenho a resistência, isso indica que a granulometria tem influência sobre a resistência do corpo de prova, o que dificulta o seu rompimento. Importante destacar que os corpos preenchidos com rejeito e lama não apresentaram simetria nas suas faces de contato com a prensa e isto resultou em um rompimento mais próximo das laterais no cilindro, o que poderia resultar na baixa resistência observada pelo corpo rompido aos 14 dias. Mas ao se analisar o teste com 28 dias de cura é possível observar que os dois materiais apresentam resistências próximas, em torno de 36,0 e 37,3 MPa, para o rejeito + lama e a areia, respectivamente, o que obedece a norma da NBR 16697 para cimentos Portland - requisitos para construções civis.

Tabela 4. Resultados dos testes de compressão uniaxial realizados.

Amostra	Teste	Resistência à Compressão (MPa)		
		7 dias	14 dias	28 dias
5	A	31,4	26	36
	B	40,5	56,8	37,3

Observa-se na Figura 3 que nos corpos rompidos de rejeito e lama existe um maior número de espaços vazios quando comparado com os corpos com areia, isto ocorre devido a elevada viscosidade da pasta geopolimérica o que impossibilitou a saída de gases dos corpos, diminuindo assim a resistência à compressão uniaxial (tabela 3).

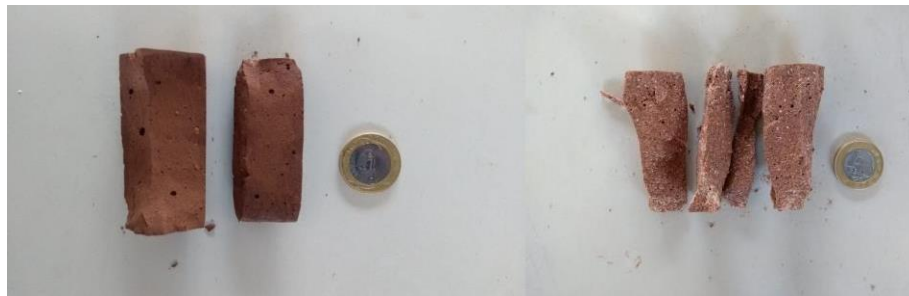


Figura 3. Corpos de prova de 7 dias de cura rompidos após testes de compressão uniaxial, a esquerda o teste A e a direita o teste B.

Com base na Tabela 5, é possível observar as proporções dos reagentes propostas por Kamaloo et al. (2013), Davidovits (1979) e Duxson (2013). Esses autores utilizaram-nas para produção de geopolímeros feitos à base de cinzas volantes e escória, mas os testes realizados com areia e rejeito + lama apresentam pequenos desvios destas razões, o que é aceitável considerando a composição química e mineralógica mais complexa e que reagem no processo de geopolimerização atuante.

**Tabela 5. Proporções de óxidos utilizadas pelos autores tomados como referência.**

Razão	Referências	Mínimo	Máximo	Teste A	Teste B
SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Duxson (2007)	3,30	4,50	4,54	4,54
	Kamaloo et al.(2013)	3,60	3,80	4,54	4,54
	Davidovits (1979)	4,86	5,90	4,54	4,54
M <sub>2</sub> O / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Duxson (2007)	0,80	1,60	1,46	1,46
	Kamaloo et al.(2013)	1,00	1,20	1,46	1,46
	Davidovits (1979)	1,50	2,42	1,46	1,46
M <sub>2</sub> O / SiO <sub>2</sub>	Duxson (1979)	0,20	0,48	0,32	0,32
	Kamaloo et al. (2013)	0,31	0,41	0,32	0,32
	Davidovits (1979)	0,31	0,41	0,32	0,32
H <sub>2</sub> O / M <sub>2</sub> O	Duxson (2007)	10,00	25,00	10,16	8,81
	Kamaloo et al. (2013)	10,00	11,00	10,16	8,81
	Davidovits (1979)	10,00	25,00	10,16	8,81

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nas análises dos dados obtidos durante os testes realizados é possível afirmar que:

- A partir dos testes realizados não foi possível determinar a relação entre a granulometria e a resistência do material. Novos ensaios são necessários;
- A composição química dos enchimentos (rejeito + lama e areia) não é um fator que influencia na resistência à compressão uniaxial;
- A quantidade e diâmetro dos espaços vazios diminui a resistência à compressão uniaxial;
- A adição de água na produção da pasta geopolimérica diminui a resistência à compressão uniaxial;
- Os parâmetros usados como referência apresentaram pequenos desvios dos limites propostos;
- O uso do cimento sustentável à base de rejeitos e lamas de beneficiamento mineral apresentaram condições favoráveis para o seu uso em obras civis.

#### 5. REFERÊNCIAS

DAVIDOVITS, J., Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. PACTEC '79 Society of Plastics Engineers, At Costa Mesa, California, USA, Volume: Proceedings, pp. 151-154, 1979.

VARELA, B.V.; TAVARES, P.B.; PINTO, A.T.P., GOMES, J.P.C., Chemical composition correction of aluminosilicate materials to enhance their conditions as precursors for alkaline activation. Journal of Materials Science and

Engineering with Advanced Technology, 2013. <https://www.researchgate.net/publication/236007896>, Acesso: Maio de 2019.

DAVIDOVITS, J., Properties of Geopolymer Cements. Geopolimers Institute, France, 1994. pp. 131-149. [www.geopolymer.org](http://www.geopolymer.org), Acesso: Junho de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., NBR 5738: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2015. Acesso: Maio de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. Acesso: Junho de 2019.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo. A., van Deventer, J. S. J., Geopolymer technology: the Current State of Art., *Journal of Materials Science*, 42,9 , pp. 2917–2933, 2007.

Kamaloo, E., Deskins, N. A., Kazantzis, N., Thompson, R. W., Molecular modeling of adsorbed NDMA and water in MFI zeolites., *Microporous and Mesoporous Materials*, 182 (1), pp. 198-206, 2013. Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1982). *Introduction to Mineral Processing* . New York: John Wiley & Sons, Inc.