

Ensaio de resistência à compressão simples aplicados a diferentes rejeitos de mineração de cobre estabilizados com Cimento Portland

Helena Portela Farenzena

Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, helenapfarenzena@gmail.com

Maria Mariana de Sousa Rocha

Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, mariamarianasousa1@gmail.com

Camila da Silva Martinatto

Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, camilamartinatto@hotmail.com

Guilherme Schmitt Medina

Doutorando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, guilhermemedina.sm@gmail.com

Nilo Cesar Consoli

Professor titular, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

RESUMO: A indústria brasileira de extração mineral desempenha um papel vital no crescimento econômico, fornecendo produtos essenciais para o dia a dia. No entanto, suas atividades geram grandes volumes de rejeitos de mineração, causando significativo impacto ambiental. Explorar o potencial desses rejeitos na construção civil é uma alternativa importante, visto que podem ser utilizados como materiais de construção. Nesse contexto, os ensaios de laboratório desempenham um papel crucial na compreensão do comportamento desses materiais. Os Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS), são utilizados para avaliar as propriedades mecânicas dos solos e materiais. O presente estudo visa avaliar e comparar o comportamento mecânico de dois rejeitos de mineração de cobre diferentes, estabilizados com diferentes teores de Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V- ARI). Os rejeitos, denominados RMC A e RMC B, provenientes de formações geológicas distintas, serão submetidos a ensaios de RCS com diferentes teores de CP V. Os resultados indicam que o aumento do teor de cimento e a redução da porosidade conduzem a uma maior resistência à compressão simples (RCS), devido ao fortalecimento do intertravamento das partículas e das reações cimentícias. Ademais, a análise das curvas η/C_{iv} ressalta a importância da granulometria na eficácia da estabilização com cimento, destacando a necessidade de estudos para otimizar a resistência e estabilidade do material tratado.

PALAVRAS-CHAVE: rejeito de mineração de cobre, estabilização com cimento, resistência à compressão simples.

ABSTRACT: The mineral extraction industry in Brazil holds significant sway in fostering economic growth through the provision of indispensable commodities for daily consumption. However, its activities produce large amounts of mining tailings, which have a significant environmental impact. Exploring the potential of these tailings materials in the construction sector is an important alternative, as they can be utilized as construction materials. In this context, laboratory tests play a crucial role in understanding the behaviour of these materials. Unconfined Compressive Strength (UCS) tests are employed to assess the mechanical properties of soils and materials. This study aims to evaluate and compare the mechanical behaviour of two

different copper ore tailings, stabilized with varying proportions of high initial strength Portland cement (CP V - ARI). The wastes, labelled as RMC A and RMC B, originating from distinct geological formations, will undergo SCS tests with different cement contents. The results indicate that increasing cement content and reducing porosity led to higher UCS, attributed to the reinforcement of particle interlocking and cementitious reactions. Furthermore, the analysis of η/C_{iv} curves underscore the significance of particle size distribution in the effectiveness of cement stabilization, emphasizing the necessity for studies to optimize the strength and stability of the treated material.

KEYWORDS: copper ore tailings, cement stabilization, unconfined compressive strength.

1 INTRODUÇÃO

A indústria de mineração desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico de muitos países e é fundamental para o avanço da sociedade, fornecendo produtos essenciais para uso diário. Um dos minerais mais produzidos globalmente é o cobre, devido à sua relevância na indústria elétrica. Devido a vasta produção desse material, as atividades da mineração exercem um impacto significativo no meio ambiente, esgotando recursos não renováveis e gerando grandes volumes de resíduos a cada ano (Mehrabani *et al.*, 2010; Bridge, 2010). Diante desse cenário, é crucial buscar novas soluções para aproveitar os resíduos da mineração. Uma abordagem viável é melhorar esses materiais para sua utilização em setores como construção civil e pavimentação (Prahallada and Shanthappa, 2014; Swetha *et al.*, 2015).

A estabilização química com cimento é uma das metodologias mais aplicadas globalmente devido à sua versatilidade e eficácia. O cimento, sendo um aglutinante hidráulico, é reconhecido por ser um agente estabilizador primário de solos, pois não depende dos minerais presentes no solo a ser tratado, mas apenas da presença de água, que é geralmente abundante na maioria dos solos (Makusa, 2012). Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar e comparar a resposta mecânica de diferentes rejeitos de mineração de cobre estabilizados com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V - ARI), por meio de ensaios de resistência à compressão simples.

Para solos estabilizados com cimento, existe uma correlação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}), descrita por Consoli *et al.* (2007). Esta relação permite a elaboração de uma curva que relaciona a resistência à compressão simples com esses parâmetros, bem como a formulação de uma equação que descreve o comportamento do material. Essa abordagem envolve a obtenção da curva porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) em relação à resistência à compressão simples, conhecida como curva de dosagem. A partir dessa curva, é possível determinar a resistência desejada para atender às exigências do projeto, e então calcular o teor volumétrico de cimento e a porosidade necessária para alcançar a resistência alvo.

Será possível analisar as diferentes curvas para os materiais estudados, de forma a observar as semelhanças e diferenças inerentes ao seu comportamento. Além de que essa metodologia oferece ao projetista a flexibilidade de optar entre uma alta energia de compactação ou um aumento no teor de cimento para atingir a mesma resistência desejada (Corte *et al.*, 2019; Marques; Consoli; Festugato, 2019). Adicionalmente, esse parâmetro pode ser empregado no controle da compactação em campo, permitindo a correção de deficiências na compactação através da incorporação de cimento (Leon, 2018).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Essa pesquisa tem como intuito avaliar o comportamento de rejeitos de mineração de cobre quando estabilizados com o processo de cimentação. Sendo assim, os materiais utilizados foram dois rejeitos produzidos a partir do processo de beneficiamento realizado em duas minas localizadas no estado do Pará, Brasil.

2.1.1 Rejeitos de mineração de cobre

Os rejeitos de mineração de cobre utilizados neste estudo foram designados como RMC A e RMC B. A caracterização do RMC A revelou uma composição granulométrica de natureza areno-siltosa (SM), conforme a classificação estabelecida pelo Sistema Unificado de Classificação – SUCS (ASTM, 2017). Além

disso, devido à ausência de valores significativos para seus limites de consistência, o rejeito em estudo foi identificado como possuindo um comportamento não-plástico. Por sua vez, o RMC B exibiu uma granulometria mais fina em comparação com o primeiro, sendo categorizado como um silte de baixa compressibilidade (ML). Contudo, no que condiz a plasticidade, também foi classificado como não-plástico. A análise da massa específica real dos grãos indicou valores semelhantes, com o RMC A registrando uma densidade de 2,91 g/cm³ e o RMC B, 2,81 g/cm³. As curvas granulométricas e os parâmetros obtidos na caracterização física são ilustrados na Figura 1 e sumarizados na Tabela 1, respectivamente.

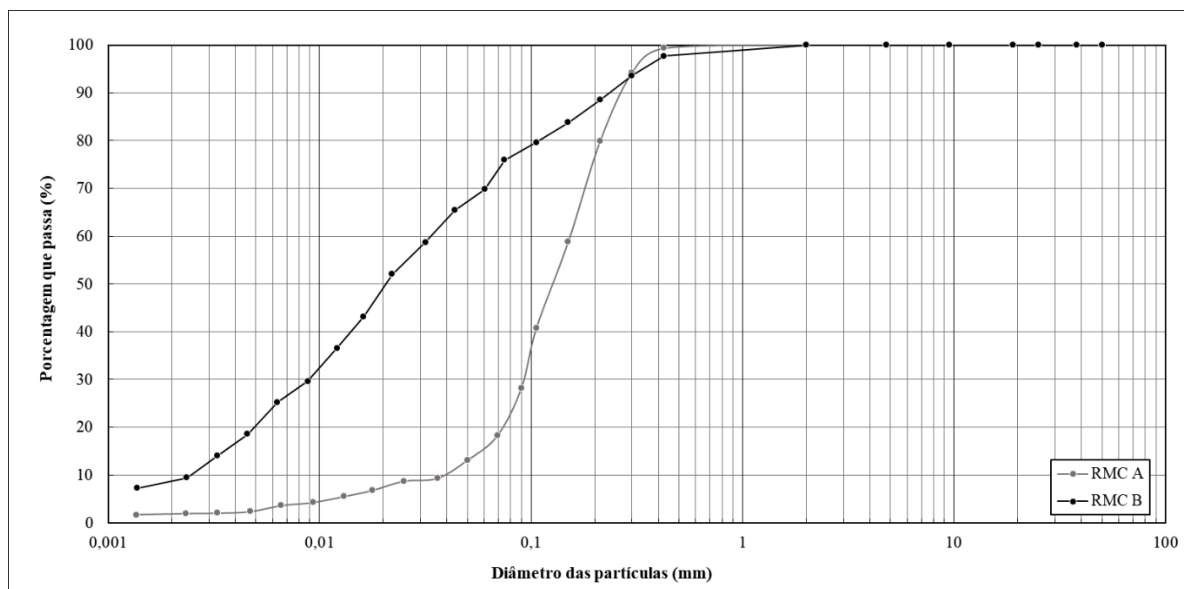


Figura 1. Curvas granulométricas dos rejeitos de mineração de cobre.

Tabela 1. Propriedades físicas dos rejeitos de mineração de cobre.

Propriedades	Norma	RMC A	RMC B
Limite de liquidez (%)	NBR 6459 (2017)	-	-
Limite de plasticidade (%)	NBR 7180 (2016)	-	-
Índice de plasticidade (%)	-	NP	NP
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	NBR 6458 (2016)	2,91	2,81
Areia (0,06mm < diâmetro < 2 mm) (%)		81,8	30,2
Silte (0,002mm < diâmetro < 0,06 mm) (%)	NBR 7181 (2018)	16,3	60,4
Argila (diâmetro < 0,002 mm) (%)		1,9	9,4
Classificação SUCS (ASTM, 2017)		SM	ML

2.1.2 Agente estabilizante

O cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), especificado na norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018b), foi empregado como material cimentício nesta pesquisa. Este tipo de cimento é conhecido por sua capacidade de desenvolver altos valores de resistência em períodos de cura reduzidos, alcançando mais de 80% da resistência nos primeiros sete dias. Tal característica é relevante do ponto de vista prático, especialmente em contextos de engenharia onde soluções rápidas são frequentemente necessárias. O peso específico real dos grãos deste tipo de cimento varia tipicamente entre 3,10 e 3,15 g/cm³, sendo adotado o valor de 3,15 g/cm³ para os propósitos do estudo em questão.

2.2 Processos

2.2.1 Ensaios de Resistência à compressão simples

Para a confecção dos corpos de prova utilizados nos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS), foram produzidos cilindros com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, compactados em três camadas, empregando um molde cilíndrico tripartido de metal. As amostras foram consideradas adequadas para os

ensaios, caso cumprissem os seguintes critérios: grau de compactação dentro de $\pm 1\%$; teor de umidade dentro de $\pm 0,5\%$; diâmetro dentro de $\pm 0,5$ mm; e altura dentro de ± 1 mm. Antes do tempo de cura estabelecido, no dia anterior ao ensaio, os corpos de prova foram submersos em água por um período de 24 horas, visando minimizar os efeitos da sucção. A ruptura dos corpos de prova foi induzida pela aplicação de tensão axial durante o ensaio, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 12025 (ABNT, 2012). Os ensaios foram conduzidos utilizando uma prensa automática, com velocidade de deslocamento de 1,14 mm/min, e uma célula de carga de 5 kN, devidamente calibrada.

2.2.2 Variáveis fixas e controláveis- ensaios de Resistência a Compressão Simples

Para essa pesquisa foi definida a avaliação da resposta mecânica dos rejeitos de mineração de cobre através da aplicação da cimentação, nas condições ótimas de cada material. Desse modo, inicialmente estabeleceu-se a curva de compactação em energia normal para os dois materiais, onde se definiu o ponto de umidade ótima que corresponde ao peso específico aparente máximo. Com isso, para a execução do ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS), foram consideradas 2 variáveis controláveis: tipo de rejeito de mineração de cobre e o teor do cimento. Foram selecionados os dois rejeitos RMC A e RMC B, estes apresentam uma variabilidade significativa na sua granulometria. Já no que se refere ao teor de cimento, foram selecionadas 3 dosagens de cimento: 1%, 3% e 5%. Essas foram selecionadas visando a aplicabilidade dessa técnica. As variáveis controláveis supracitadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis controláveis para os ensaios de resistência à compressão simples

Rejeito de mineração	Teor de cimento (%)
RMC A	1, 3 e 5
RMC B	

Para os ensaios de resistência à compressão simples, as variáveis fixas foram: condição de moldagem, energia de compactação normal, tipo de cimento, tempo de cura e temperatura de cura. A condição de moldagem como supracitado foi determinada com base na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo de cada rejeito, conforme apresentado na Figura 2, que exibe a curva de compactação com a indicação dos pontos de moldagem. O cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI) foi escolhido como agente estabilizador. O período de 7 dias foi escolhido como o tempo de cura da pesquisa, considerando que o cimento Portland CP V - ARI foi utilizado para o programa experimental, assim, este período de cura pode ser considerado como a escolha mais vantajosa. Por fim, optou-se por definir a temperatura de cura desta pesquisa em 23°C, representando uma temperatura ambiente média. A Tabela 3 apresenta um resumo das variáveis controláveis para este ensaio.

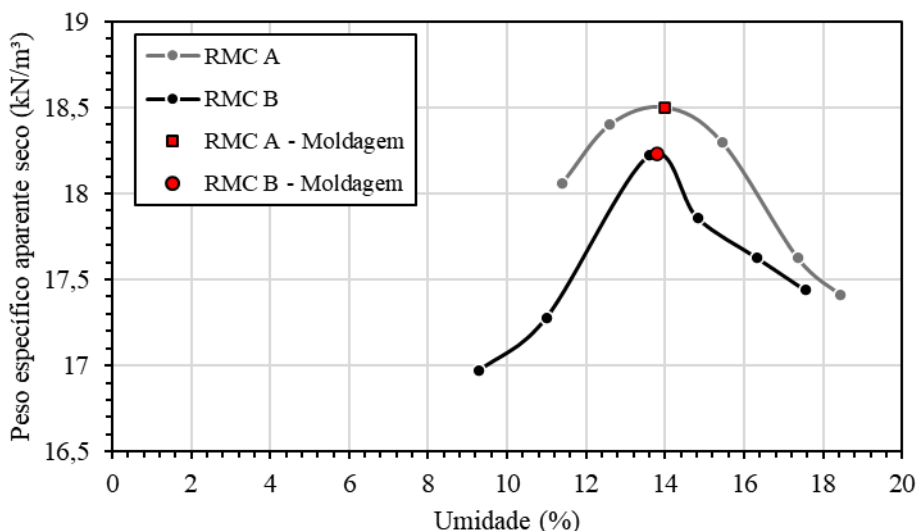


Figura 2 - Curva de compactação e definição dos pontos analisados

Tabela 3 - Variáveis controláveis para os ensaios de resistência à compressão simples

Rejeito de mineração	γ_d (kN/m ³)	Teor de umidade (%)	Tipo de cimento	Tempo de cura	Temperatura de cura
RMC A	18,5	14,0	CP V	7 dias	27°C
RMC B	18,2	13,8			

3 RESULTADOS

Com base nas variáveis delineadas na Tabela 3, foi conduzido o teste de resistência à compressão simples nas amostras estabilizadas utilizando cimento Portland. Os dados resultantes são visualizados na Figura 3 e sintetizados na Tabela 4.

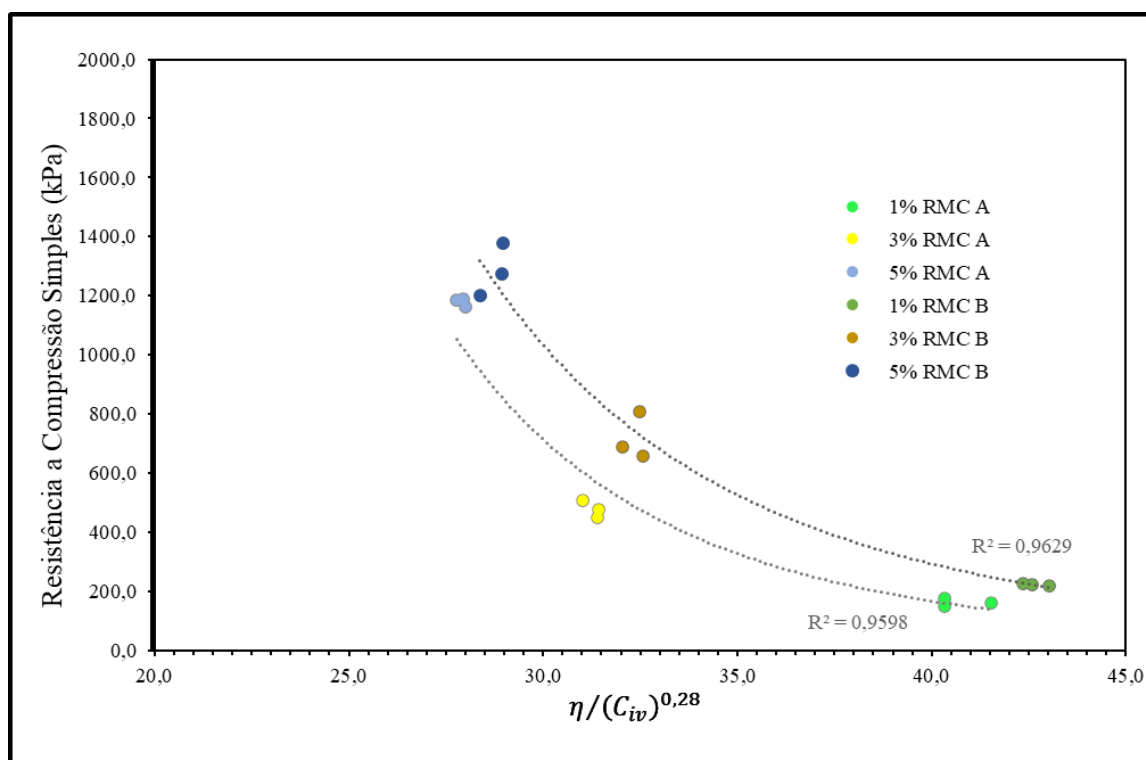


Figura 3 - Resistência à compressão simples em função da quantidade de cimento e material utilizado.

Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos para o ensaio de RCS.

Material	Teor de cimento (%)	$\eta / (C_{iv})^{0,28}$	RCS (kPa)
RMC A	1	40,33	147,97
		40,34	174,71
	3	41,54	159,86
		31,41	476,58
	5	31,41	448,68
		31,01	507,71
		27,95	1189,45
		27,78	1184,49
		28,00	1161,79

		42,34	227,61
	1	42,58	222,17
		43,04	218,09
		32,56	656,72
RMC B	3	32,48	808,50
		32,05	686,77
		28,37	1201,13
	5	28,96	1376,33
		28,93	1273,22

De forma geral, observa-se que o aumento do teor de cimento e a diminuição da porosidade resultam em valores mais elevados de resistência à compressão simples (RCS). A redução da porosidade implica em uma maior área de contato entre as partículas, intensificando o intertravamento e o atrito entre elas, o que aumenta a resistência do material. Por outro lado, o aumento do teor de cimento está associado ao aumento das reações cimentícias, o que também contribui para o desenvolvimento da resistência. Esse fenômeno físico-químico tem sido observado em diversos materiais geotécnicos tratados com cimento, incluindo solos estabilizados com cimento Portland (Consoli et al., 2007; Consoli et al., 2020; Veloso Marques; Consoli; Almeida e Sousa, 2014), solos estabilizados com outros agentes cimentantes (Consoli *et al.*, 2018a, 2019;), rejeitos de mineração tratados com cimento Portland (Bruschi, 2023; Consoli *et al.*, 2018b; Servi, 2022) e rejeitos de mineração tratados com outros agentes cimentantes (Bruschi *et al.*, 2021; Pereira dos Santos *et al.*, 2022; Farenzena *et al.*, 2023).

Além disso, nota-se que a curva η/C_{iv} para o RMC B está situada à direita daquela correspondente ao material RMC A, sendo este fenômeno associado aos maiores valores de resistência alcançados pelo RMC B. A granulometria do material exerce uma influência substancial no processo de estabilização com cimento, uma vez que o RMC B exibe uma distribuição granulométrica que possivelmente otimizou a eficácia da estabilização, promovendo um intertravamento mais eficiente entre as partículas e facilitando a reação química entre o cimento e o material (Jiangyu *et al.*, 2018). Em contraste, sugere-se que o material RMC A possa ter apresentado uma composição com espaços vazios mais proeminentes, ou seja, uma área superficial reduzida para reação, o que explicaria a menor resistência alcançada (Ai-Bing *et al.*, 2023).

Em síntese, os resultados destacam a importância do teor de cimento e da porosidade na resistência à compressão simples (RCS), evidenciando a relevância do intertravamento e das reações cimentícias para o desenvolvimento da resistência em materiais geotécnicos tratados com cimento. Além disso, a análise das curvas η/C_{iv} para os materiais RMC A e RMC B revela a influência significativa da granulometria na eficácia da estabilização com cimento, ressaltando a necessidade de uma distribuição granulométrica adequada para otimizar a resistência do material estabilizado.

4 CONCLUSÕES

Diante do programa experimental proposto e executado nas amostras estabilizadas com cimento Portland, os resultados demonstram uma interdependência entre a porosidade (η), o teor volumétrico de cimento (C_{iv}) e a resistência à compressão simples (RCS), conforme descrito por Consoli *et al.* (2007). Essa correlação possibilita a elaboração de uma curva de dosagem que relaciona a porosidade/teor volumétrico de cimento com a resistência, facilitando a determinação da resistência desejada para atender aos requisitos do projeto.

De modo geral, é evidente que o aumento do teor de cimento e a redução da porosidade resultam em valores mais elevados de RCS. A redução da porosidade implica em uma ampliação da área de contato entre as partículas, intensificando o intertravamento e a mobilização do atrito, fatores que contribuem para o incremento da resistência. Por outro lado, o aumento do teor de cimento está diretamente relacionado ao incremento das reações cimentícias, o que também contribui para o aumento da resistência. Esse fenômeno reforça a consistência dos resultados obtidos neste estudo.

Além disso, a observação das curvas η/C_{iv} para diferentes materiais evidenciou a influência crucial da granulometria na eficácia da estabilização com cimento, enfatizando a necessidade de estudo dessas

características para otimizar a resistência e estabilidade do material tratado. É notável a consistência dos resultados ao correlacionar RCS e o índice (η/C_{iv}) com um coeficiente de determinação (R^2) aproximadamente de 0,96 para ambas as curvas. Essa alta correlação valida a aplicabilidade do índice na previsão do comportamento da resistência à compressão simples em rejeitos de mineração tratados com cimento.

Por fim, ressalta-se a importância do estudo da estabilização de rejeitos de mineração de cobre com cimento Portland de alta resistência inicial, que permite ampliar a gama de aplicações deste material, incluindo preenchimento, materiais de construção e infraestrutura. Esses resultados fornecem *insights* valiosos para o desenvolvimento e implementação de técnicas de estabilização de solos e rejeitos de mineração com cimento, contribuindo para aprimorar a compreensão e a eficácia desses processos na engenharia geotécnica.

A estabilização de rejeitos de mineração de cobre com cimento não só oferece uma solução eficiente para a gestão de resíduos de mineração, mas também cria materiais de construção de alta qualidade e durabilidade. Através da otimização da granulometria e do teor de cimento, é possível maximizar a resistência à compressão simples, tornando esses materiais adequados para uma ampla gama de aplicações, como construção civil, infraestrutura rodoviária, controle de erosão e reabilitação ambiental. Essa abordagem sustentável pode contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais da mineração e para o desenvolvimento de tecnologias de construção mais ecológicas.

No entanto, é essencial a verificação de outros parâmetros para validar a aplicabilidade dos rejeitos de mineração de cobre estabilizados com cimento. Aspectos como durabilidade a longo prazo, comportamento sob diferentes condições ambientais e impacto potencial sobre o meio ambiente devem ser rigorosamente avaliados para garantir a viabilidade e segurança do uso desses materiais em diversas aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D 2487 -17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-12025: Solo-Cimento - Ensaio de Compressão Simples CP Cilindrico. Rio de Janeiro, 2012.
- BRIDGE, B. The social regulation of resource access and environmental impact: production, nature and contradiction in the US copper industry. *Geoforum* 2000; 31:237–56. 2000.
- BRUSCHI, G. J. et al. Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 11, nov. 2021.
- BRUSCHI, G. J. Molding conditions effect on the geomechanical behavior of uncemented and cemented iron ore tailings under low and high confining stresses. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.
- CONSOLI, N. C. et al. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 8, ago. 2020.
- CONSOLI, N. C. et al. Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 55, n. 4, p. 486–494, abr. 2018a.

- CONSOLI, N. C. et al. Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 144, n. 9, set. 2018b.
- CONSOLI, N. C. et al. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n. 2, p. 197–205, fev. 2007a.
- CONSOLI, N. C. et al. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n. 2, p. 197–205, fev. 2007b.
- CONSOLI, N. C. et al. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. *Soils and Foundations*, v. 59, n. 5, p. 1428–1439, out. 2019.
- CORTE, M. B. et al. Stiffness of lightly cemented sand under multiaxial loading. *E3S Web of Conferences*, v. 92, p. 11008, 25 jun. 2019.
- FARENZENA, H. P. et al. Iron ore tailings stabilization with alternative alkali-activated cement for dry stacking: mechanical and microstructural insights. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 61, n. 4, p. 649–667, 1 abr. 2024.
- JIN AI-BING et al. Strength and damage characteristics of tailings filling body with different particle size distributions. *Rock and Soil Mechanics*, v. 43, n. 11, 2022.
- LEON, H. B. O índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/Civ) como um parâmetro de estado para areias cimentadas. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/174407>. Acesso em: 12 jun. 2022.
- MAKUSA, G. P. (2012). Soil stabilization methods and materials: in engineering practice. Luleå, Sweden: Luleå University of Technology (Class Notes). 38 p.
- MARQUES, S. F.; CONSOLI, N. C.; ALMEIDA E SOUSA, J. Testing Cement Improved Residual Soil Layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 26, n. 3, p. 544–550, mar. 2014.
- MARQUES, S. F.; CESAR CONSOLI, N.; FESTUGATO, L. Effects of curing stress on the stiffness of a cement-mixed sand. *E3S Web of Conferences*, v. 92, p. 04006, 25 jun. 2019.
- MEHRABANI, J. v. et al. Process optimization and modelling of sphalerite flotation from a low-grade Zn-Pb ore using response surface methodology. *Separation and Purification Technology*, [s. l.], v. 72, n. 3, p. 242–249, 2010.
- PEREIRA DOS SANTOS, C. et al. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. *Transportation Geotechnics*, v. 32, p. 100704, jan. 2022.
- PRAHALLADA M.C.; SHANTHAPPA B.C. Use of copper ore tailings - As an excellent pozzolana in the preparation of concrete. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences*, v. 3, n. 3, p. 1–10, 2014.
- SERVI, S. P. Comportamento mecânico de resíduo de minério de ferro estabilizado com agentes aglomerantes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.
- SWETHA K. S. et al. Characterization of materials by partially replacing cement by copper ore tailing and sand by iron ore tailing. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, v. 4, n. 7, 2015.
- WU, J. et al. Particle Size Distribution Effects on the Strength Characteristic of Cemented Paste Backfill. *Minerals*, v. 8, n. 8, p. 322, 27 jul. 2018.