



Caracterização Geotécnica de Rejeito de Cobre Desaguado a Partir de Ensaios Laboratoriais

Thales Basílio da Circuncisão

Engenheiro Geotécnico, STATUM Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, thalesbc98@gmail.com

Igor Andrade Costa

Engenheiro Geotécnico, STATUM Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, costa.igorandrade@gmail.com

Renato Soares Lamin Righi

Engenheiro Geotécnico, STATUM Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, renato.righi@statum.eng.br

Mario Rui Castro

Engenheiro Geotécnico, STATUM Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, mario.castro@statum.eng.br

Lucas Augusto de Castro Bastos

Gerente de Projetos, STATUM Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, luca.bastos@statum.eng.br

RESUMO: O elemento Cobre faz parte do grupo de metais básicos, possuindo propriedades atrativas quanto à resistência mecânica, durabilidade e condutividade elétrica, sendo empregado em diversas ligas metálicas. diante desse cenário, a demanda pela extração e beneficiamento do minério de cobre tem a tendência de aumentar nos próximos tempos, o que traz a necessidade da existência de estruturas de disposição do rejeito gerado durante tais processos. Este artigo tem por objetivo apresentar e avaliar resultados de ensaios de caracterização geral e resistência ao cisalhamento em rejeito de cobre filtrado, tencionando-se elucidar a visão sobre o comportamento do material frente às solicitações impostas em empilhamentos de rejeito desse material, com vistas às diretrizes de disposição segura e sustentável. Os ensaios aqui apresentados fazem parte do acervo dos autores, sendo apreciados sob a ótica da mecânica dos solos visando a caracterização e potenciais oportunidades para a otimização de estruturas de disposição de rejeito, com base no perfil das envoltórias tensão x deformação e trajetórias de tensões efetivas, que trazem informações relevantes acerca do comportamento dos materiais quando sujeitos a carregamentos típicos para pilhas. Conclui-se que, sob as condições impostas para empilhamentos de rejeito filtrado, o material estudado apresenta comportamento satisfatório quando compactado com controle e sob tensões de confinamento compatíveis com o experimentado nesse tipo de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Empilhamento de Rejeito, Rejeito de Cobre, Resistência Mecânica

ABSTRACT: Copper (Cu) is a fundamental metal with appealing properties in terms of mechanical strength, durability and electrical conductivity. It is utilized in a variety of metal alloys. In view of this scenario, demand for the extraction and processing copper ore is likely to increase soon, which means that there is a need for structures to dispose of the tailings generated during these processes. The objective of this article is to present and evaluate the results of general characterization and shear strength tests on filtered copper tailings, with the intention of elucidating the material's behavior in the face of the stresses imposed on tailings piles, with a view to safe and sustainable disposal guidelines. The tests presented here are part of the authors' collection and are assessed from the perspective of soil mechanics with a view to characterization and potential opportunities for the optimization of tailings disposal structures. This is based on the profile of stress x strain envelopes and effective stress paths, which provide relevant information about the behavior of materials when subjected to typical pile loads. It is concluded that, under the conditions imposed for filtered tailings piles, the material studied shows satisfactory behavior when compacted with control and under confinement stresses compatible with those experienced in this type of project.

KEYWORDS: Dry Stacking, Copper Tailings, Soil Strength



1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista uma importante corrida por metais básicos, que está impulsionada pelas mudanças ocorridas na sociedade no início do presente século, existe maior demanda pela mineração desses materiais, de modo a atender à crescente demanda. Nesse contexto, o Cobre (Cu) se destaca por diversas vantagens e peculiaridades, tal como a condutividade elétrica, resistência mecânica e durabilidade, o que traz aplicabilidade em diversas ligas metálicas.

Diretamente associada à crescente demanda, e importância desse material para a sociedade pelos motivos supramencionados, a atividade de mineração desse material está cada vez mais intensa, trazendo à tona alguns pilares importantes para o desenvolvimento saudável: sustentabilidade, segurança e tecnologia. Frente um cenário de mineração mais ativa, de fato é esperada uma maior geração de rejeitos de mineração de Cobre, que deve ser disposto em estruturas seguras, economicamente viáveis e sustentáveis, cada vez de maior magnitude, sendo um importante ator na garantia de desenvolvimento tecnológico.

No projeto e acompanhamento técnico de execução e vida útil de empilhamentos de rejeito, um dos requisitos inegociáveis é o conhecimento do material a ser disposto na estrutura, uma vez que essa clarividência em relação ao comportamento geotécnico do rejeito mune, de maneira assertiva e sob um menor nível de incertezas, as diretrizes de operação do empilhamento, além de auxiliar na definição de diretrizes do projeto, como geometria e volume a ser disponibilizado para disposição do material.

Deformabilidade, resistência ao cisalhamento e comportamento geotécnico são fatores chave a serem elucidados e bem delimitados, sob um nível de incerteza adequado, para que o projeto reflita condições sustentáveis e seguras de operação no que tange à disposição de rejeitos. Assim, existe importância pulsante em se elaborar uma campanha consistente de investigações de laboratório para atingir o objetivo delineado.

Rocha *et al.* (2024) apresentaram um estudo de caracterização de rejeitos de mineração de cobre, de minas no estado do Pará no Brasil, evidenciando que o material apresenta uma variação entre material silto-arenoso a areno-siltoso com menos de 10% de argila, sendo um importante intervalo de variabilidade, com comportamento não plástico. Sousa (2019) estudou a possibilidade de utilização do rejeito de mineração de cobre como agregado miúdo na produção de concreto, evidenciando comportamento arenoso do material, com predominância de areia fina.

Nesse contexto, o presente artigo tem por objetivo apresentar a caracterização geotécnica de um rejeito oriundo do beneficiamento do minério de Cobre, obtida a partir de dados de ensaios geotécnicos de laboratório, com a finalidade de trazer contribuições para a elaboração de projetos e verificação de estruturas de disposição desse material. Foram contemplados ensaios de caracterização geral, compactação Proctor normal e resistência triaxial, de modo a trazer uma avaliação sobre a aplicabilidade e do comportamento do material sob os níveis de tensão impostos por empilhamentos de média a grande magnitude.



2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Base de Dados

A base de dados para a elaboração do presente trabalho consiste em ensaios geotécnicos laboratoriais realizados em amostras de rejeito oriundas do beneficiamento do Cobre. Ao todo, foram coletadas 05 (cinco) amostras deformadas, denominadas AM-01, AM-02, AM-03, AM-04 e AM-05. O intuito da campanha foi de tomar conhecimento do comportamento e características geotécnicas do rejeito de cobre visando elucidação acerca da possibilidade de disposição do material em empilhamento com controle de compactação. Ao todo, foram realizados os ensaios listados na Tabela 1.

Tabela 1. Base de dados empregados.

Tipo de Ensaio	Quantidade
Granulometria	05
Massa Específica Real dos Grãos	05
Limites de Atterberg	05
Compactação Proctor Normal	05
Permeabilidade a Carga Variável	05
Compressão Triaxial Consolidado não Drenado (Saturado) ¹	05 x 4 CP's

(1) Os ensaios triaxiais foram realizados em corpos de prova reconstituídos com grau de compactação entre 90 e 95%, rompidos sob tensões totais confinantes de 100, 200, 400 e 600 kPa.

Os ensaios foram realizados segundo as normativas aplicáveis à época, sendo consideradas as normas ABNT:NBR 7181, 6459, 7180 e 6508 para os ensaios de granulometria (peneiramento e sedimentação), limites de Atterberg e massa específica dos grãos, respectivamente. Para o ensaio de permeabilidade a carga variável, empregou-se a ABNT:NBR 14.545, enquanto que utilizou-se a ABNT:NBR 7182 para os ensaios de compactação Proctor normal. Os ensaios triaxiais, por sua vez, foram procedidos a partir da norma ASTM D4767.

2.2 Avaliação dos Ensaios

Os ensaios foram avaliados pelos autores a partir da manipulação dos dados brutos encaminhados pelo laboratório, sendo empregadas rotinas de cálculo e *softwares* específicos para uma melhor apreciação dos ensaios. Primeiramente, constata-se que trata-se do mesmo material (solo de coloração cinza esverdeada), além de se verificar a consistência dos ensaios, sobretudo os ensaios especiais (triaxial CIU). Nesses, o parâmetro B de Skempton foi superior a 0,95 em todos os corpos de prova, sendo a saturação realizada por contrapressão. O adensamento foi realizado isotropicamente. A etapa de cisalhamento foi realizada com velocidade de 0,20 mm/min, até atingir uma deformação axial de cerca de 25%.

Para a avaliação dos resultados dos ensaios em questão, foram traçadas as trajetórias de tensões efetivas no plano s' x t e a envoltória de tensão desviadora por deformação axial dos corpos de prova, avaliando-se o comportamento geotécnico das amostras quando submetidas a carregamentos não drenados. Os demais ensaios foram avaliados sob a ótica de uma homogeneidade das amostras no ponto de vista de caracterização geotécnica e níveis de incerteza associados a isso.

Adicionalmente, é proposta uma abordagem comparativa entre os resultados aqui adquiridos e aqueles adquiridos por outros autores, de modo a contribuir com a comunidade geotécnica para que aumentar o conhecimento acerca desse material, o que é de extrema relevância para a mineração de metais básicos no Brasil e exterior.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são evidenciadas as curvas granulométricas associadas ao rejeito de cobre em questão. Percebe-se que as amostras apresentam similaridade entre si, sendo o material predominantemente arenoso-siltoso, com maior parcela de areia fina (~60%), cerca de 30% de silte e menos de 10% de argila nas amostras. Vislumbrando-se as curvas granulométricas apresentadas por Tsuchida (1970) apud. Terzaghi *et al.* (1996), percebe-se que o material apresenta potencial de liquefação, embora não esteja na região de maior perigo para esse fenômeno, sendo isso reforçado pelos ensaios de limites de consistência (Atterberg), que evidenciam que o material é Não Plástico (NP), como registra a Tabela 2.

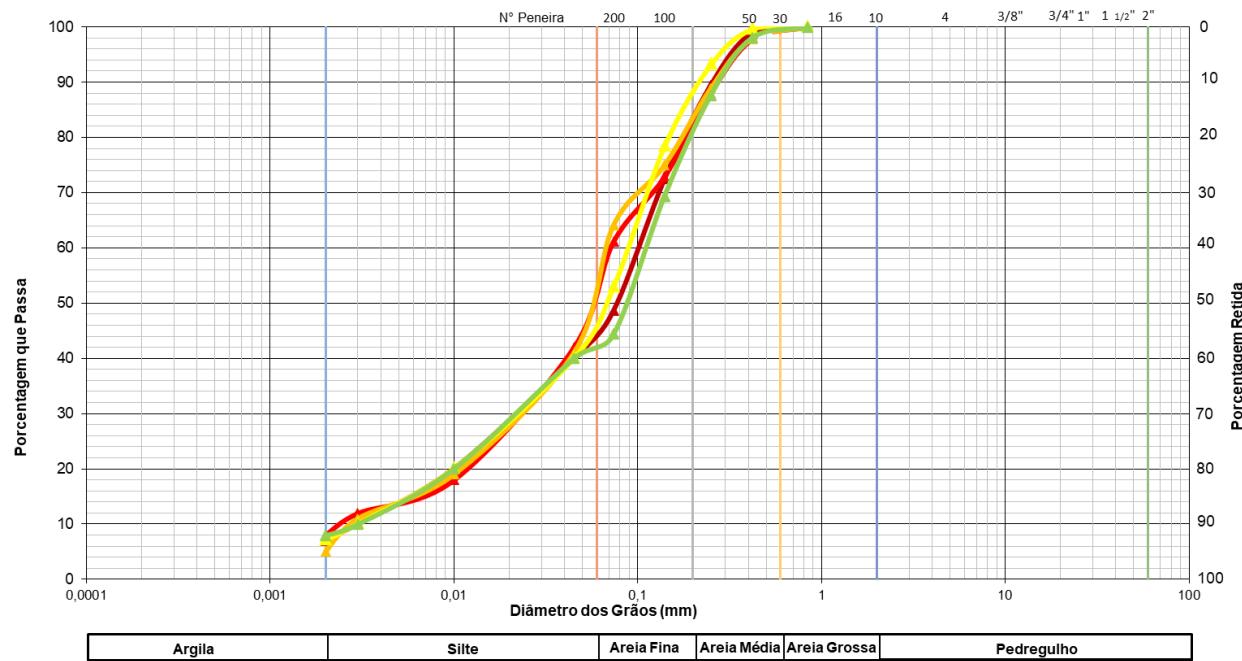


Figura 1. Curvas de distribuição granulométrica do rejeito de Cobre avaliado.

Tabela 2. Resultado dos ensaios de caracterização.

Amostra	Granulometria			Limites de Atterberg			Massa Específica dos Grãos (g/cm³)	Compactação Proctor Normal			k (cm/s) (G.C. = 100%)
	Argila	Silte	Areia	LL	LP	IP		Massa Específica Seca Máxima (g/cm³)	Umidade Ótima (%)		
AM-01	7%	29%	64%	NL	NP	NP	3,01	1,89	12,10	4,5E-05	
AM-02	8%	36%	56%	NL	NP	NP	3,07	1,93	12,04	2,1E-05	
AM-03	5%	30%	65%	NL	NP	NP	2,95	1,95	11,92	5,2E-05	
AM-04	7%	31%	62%	NL	NP	NP	3,01	1,91	11,87	1,3E-06	
AM-05	8%	29%	63%	NL	NP	NP	2,95	1,92	12,00	1,7E-05	

Do ponto de vista de compactação, percebe-se uniformidade entre os valores das amostras, com baixo coeficiente de variação (1,00%), o mesmo ocorrendo com teor de umidade ótima e massa específica dos grãos, evidenciando que, para o caso em questão, não há variações importantes em relação ao comportamento do material. Existe, contudo, certa variabilidade nos resultados dos ensaios de permeabilidade a carga variável em CP's remoldados com 100% do grau de compactação. Os resultados são consistentes com o já apresentado na literatura técnica e científica para o rejeito de Cobre, estando dentro do esperado para o material: matriz areno-siltosa e não plástico.



Com relação ao comportamento geotécnico das amostras submetidas a carregamentos não drenados durante os ensaios de compressão triaxial, percebe-se que, para as amostras moldadas com grau de compactação de 90% existe contratilidade associada ao amolecimento do material inclusive para tensões mais baixas (100 kPa), enquanto para 95%, as amostras rompidas até 400 kPa apresentem comportamento dilatante sem *softening* severo, enquanto que para uma tensão confinante de 600 kPa, existe comportamento contrátil associado ao amolecimento do material. A Figuras 2 representa as trajetórias de tensões efetivas do rejeito de cobre nas condições de moldagem aplicáveis.

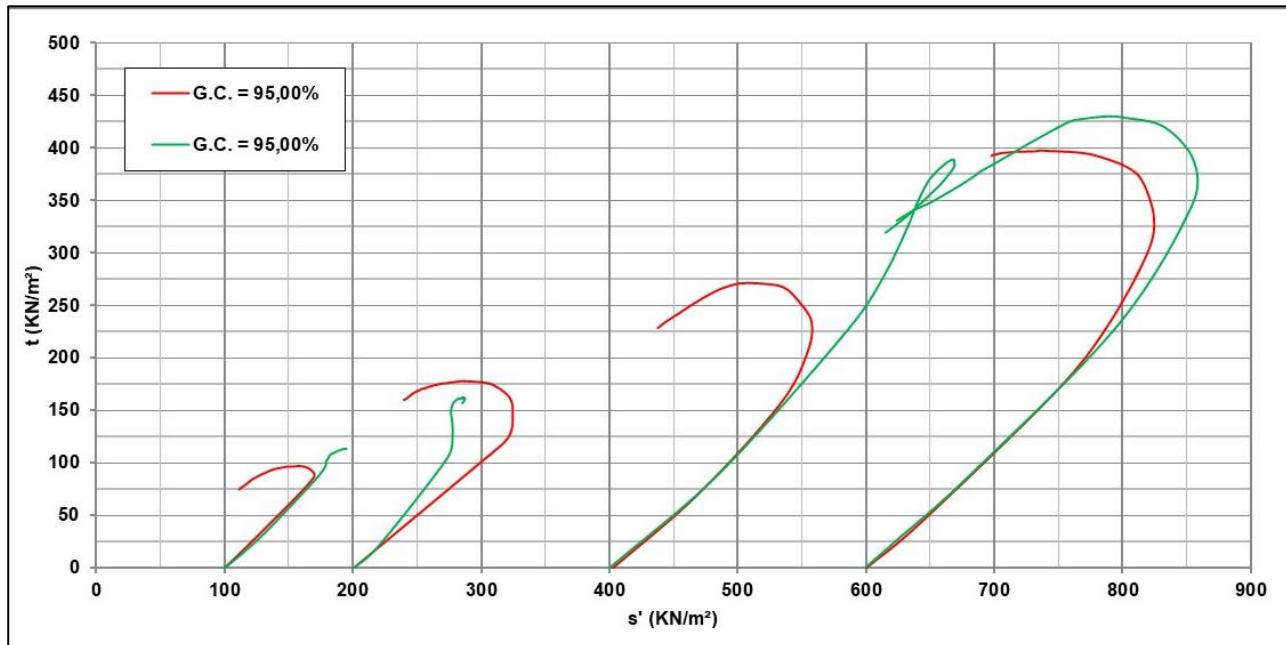


Figura 2. Trajetórias de tensões efetivas das amostras avaliadas.

4 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma avaliação do comportamento e caracterização geotécnica de um rejeito oriundo da mineração de Cobre de uma mina brasileira. Foram apreciados ensaios de caracterização geral e resistência triaxial, sendo estes desenvolvidos em amostras reconstituídas com graus de compactação de 90 e 95%.

Os resultados dos ensaios de caracterização demonstram que o material é compatível com aqueles já apresentados pela literatura geotécnica, com matriz silto-arenosa e não plástico, sendo pertinente se levantar a susceptibilidade à liquefação do material devido sua matriz e ausência de plasticidade. Tal fato traz à tona uma necessidade de densificação do material, quando do seu empilhamento, de modo que seja inibida da geração de poropressões positivas durante o empilhamento;

As constatações trazidas no parágrafo anteriores são complementadas por ensaios de compressão triaxial saturado não drenado, que evidenciam que, para um grau de compactação de 90%, existe a possibilidade de comportamento contrátil associado a perda de resistência inclusive para tensões mais baixas. Já para um grau de compactação de 95%, o comportamento contrátil se restringe à tensão mais elevada (600 kPa), sendo que para tensões mais baixas, existe comportamento dilatante. Esses resultados trazem à conclusão que, a depender da altura do empilhamento e da variabilidade do material, um grau de compactação de 95% pode não vir a ser suficiente para garantir um bom desempenho da pilha, além de se evidenciar uma necessidade de controle da altura das estruturas projetadas com o material, o que deve ser ainda melhor estudado.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à STATUM Geotecnia pelo apoio prestado para a elaboração do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Das, B. M. Fundamentos de engenharia geotécnica. [s.l.] São Paulo Thomson Learning, 2007.
- Duncan, J. M.; Wright, S. G., 2005, Soil Strength and Slope Stability. 1 ed. Hoboken: John Wiley & Sons;
- Global Industry Standard on Tailings Management – Global Tailings Review.* Disponível em: <<https://globaltailingsreview.org/global-industry-standard/>>.
- Rocha, M. M. DE S. et al. Caracterização Geotécnica de Rejeitos de Mineração de Cobre. ANAIS DO XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2024.
- Sousa, D. M., 2019. Utilização De Rejeito De Minério Do Cobre Como Agregado Miúdo Na Produção De Concreto. Universidade Federal do Pará. Tucuruí, PA. 98 p.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. (1987) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.
- VICK, S. G. Planning, design and analysis of tailings dams. Vancouver, B.C.: Bitech Publishers, 1990.