

Comportamento Geotécnico de Misturas de Rejeito de Minério de Ferro

Alexia Cindy Wagner

Doutoranda, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, alexia-wagner@hotmail.com

João Vítor de Azambuja Carvalho

Doutorando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, Brasil, carvalho.jv@ufrgs.br

Hugo Carlos Scheuermann Filho

Pós-doutorando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, hugocsf@ufrgs.br

João Paulo de Sousa Silva

Engenheiro Sênior, VALE S.A., Belo Horizonte-MG, joao.paulo.silva@vale.com

Nilo Cesar Consoli

Professor titular, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, consoli@ufrgs.br

RESUMO: A ocorrência de acidentes associados à disposição de rejeitos saturados em barragens de rejeito alteadas a montante geraram restrições legais em relação a esse tipo de estrutura. Nesse cenário, os avanços nas tecnologias de filtragem possibilitam a obtenção de rejeitos com teor de umidade reduzido, os quais podem ser armazenados em uma condição mais segura na forma de pilhas de rejeito. A eficiência da recuperação do ferro e da filtragem dos rejeitos é maior ao separar as partículas mais finas dos rejeitos mais arenosos. No entanto, a disposição final precisa ser feita através da mistura entre os rejeitos gerados. Assim, o presente trabalho busca analisar o comportamento geotécnico de misturas obtidas a partir da combinação de dois rejeitos com diferentes granulometrias oriundos de diferentes estágios do processo de beneficiamento de minério de ferro. O comportamento foi avaliado através da execução de ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados em amostras moldadas em condição fofa ($e = 0,80$) e cisalhadas em tensões de 50, 250 e 500 kPa. Os resultados indicam que a inclusão de finos não teve grande influência na mobilização da resistência dos materiais, possivelmente devido a mesma origem das partículas. Assim, foi possível ajustar um mesmo parâmetro $M = 1.32$ para todas as misturas, o que corresponde a um ângulo de atrito no estado crítico (ϕ'_c) de 33° . Além disso, a adição de finos afetou propriedades como compactação, rigidez e deformabilidade devido aos diferentes arranjos e interações que ocorrem entre partículas de tamanhos distintos.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de Minério de Ferro, Pilhas de Rejeito Filtrado, Variação Granulométrica, Teor de Finos.

ABSTRACT: The occurrence of accidents associated with the disposal of saturated tailings in upstream tailings dams have led to regulatory restrictions on this type of structure. In this scenario, advances in filtering technologies enable the obtaining of tailings with reduced moisture content, which can be stored in a safer condition in dry stacks. Separating the finer particles from the sandy ones increases the efficiency of iron recovery and tailings filtration. However, the final disposal must be done by mixing the generated tailings. Therefore, this study aims to analyze the geotechnical behavior of mixtures obtained by combining two tailings with different gradings from different stages of an iron ore beneficiation plant. The behavior was assessed by performing drained isotropically consolidated triaxial tests on samples molded in a loose condition ($e = 0.80$) and sheared at 50, 250, and 500 kPa stresses. The results indicate that the inclusion of fines did not significantly influence the strength mobilization, probably due to the same origin of the particles. It was possible to fit the same parameter $M = 1.32$ for all the mixtures, corresponding to a friction angle in the critical state of 33° . Moreover, the fine addition affected properties such as compaction, stiffness, and deformability due to the different arrangements and interactions between particles of different sizes.

KEYWORDS: Iron Ore Tailings, Dry Stacks, Grading Variation, Fines Content.

1 INTRODUÇÃO

A mineração consiste na exploração e extração de minérios disponíveis no subsolo. Essa atividade é fundamental ao desenvolvimento da sociedade, visto que grande parte dos produtos utilizados pela humanidade atualmente é proveniente de metais (Jones and Boger, 2012). No Brasil, o faturamento do setor mineral depende principalmente da exploração do minério de ferro, o que resulta em maiores investimentos nessa área de forma a impulsionar seu desenvolvimento (IBRAM, 2023). A crescente demanda por metais exige a exploração de depósitos cada vez mais pobres, ou seja, com teores de minério menores. Por isso, torna-se necessário explorar uma maior quantidade de rochas para se extrair uma mesma quantidade de produto, o que tende a aumentar os volumes de rejeitos produzidos (Hu *et al.*, 2017).

Os rejeitos de mineração são inerentes ao beneficiamento de minério. O beneficiamento envolve desde atividades mais simples como britagem e peneiramento até processos mais complexos para concentração do minério. Todas essas atividades utilizam uma grande quantidade de água, o que faz com o que os rejeitos produzidos se encontrem inicialmente na forma de polpa (Spitz and Trudinger, 2019). Por isso, tais rejeitos eram bombeados e dispostos diretamente em barragens durante muitos anos. Entretanto, o material disposto dessa forma encontra-se saturado e com alto índice de vazios, o que resultou em trágicos acidentes no Brasil (Mariana e Brumadinho) e em todo o mundo (WISE, 2023).

A insegurança associada as barragens de rejeito resultou em restrições ao uso desse tipo de estrutura, tornando necessário estudar novos métodos para disposição do grande volume de rejeitos produzido. Nesse contexto, surge a opção de filtragem dos rejeitos para redução do teor de umidade seguida de sua compactação em pilhas (Davies, 2011). Muitos estudos têm sido realizados para avaliar o comportamento geotécnico de rejeitos de mineração ao serem compactados em diferentes condições (Consoli *et al.*, 2023; Wagner *et al.*, 2023).

Os métodos de filtragem exigem grandes investimentos e a eficiência do filtro depende das características dos rejeitos (McLeod and Bjelkevik, 2017). Por isso, uma solução usual é separar os fluxos de rejeitos e filtrar separadamente aqueles com granulometria mais fina (mais difíceis de reduzir a umidade devido a menor permeabilidade). A filtragem em diferentes fluxos resulta em rejeitos distintos no final da planta de beneficiamento, os quais normalmente são misturados antes de serem compactados nas pilhas.

Dessa forma, o presente trabalho busca avaliar o comportamento geotécnico de misturas produzidas a partir de dois rejeitos de minério de ferro (um com partículas mais grossas e outro com maior teor de finos). A resistência e a rigidez foram avaliadas a partir de ensaios triaxiais realizados em diferentes condições. O objetivo da pesquisa é avaliar como a adição de finos nas misturas influencia propriedades importantes no dimensionamento de pilhas de armazenamento de rejeitos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Rejeitos e misturas

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados dois rejeitos de minério de ferro oriundos de uma mina do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. O beneficiamento de minério de ferro envolve processos que variam desde britagem e peneiramento até processos mais sofisticados para melhorar a qualidade do minério. Ao longo do beneficiamento são obtidos diferentes produtos e rejeitos. Após etapas iniciais de moagem, peneiramento e concentração, o material é submetido a uma etapa de deslamagem através de uma sequência de hidrociclones. Nessa etapa, são removidos os rejeitos denominados ultrafinos, pois o excesso de finos reduz a eficiência do processo de flotação (última etapa de recuperação de ferro). Assim, material sem finos segue para o processo de flotação, o qual isola o minério de granulação mais fina e resulta em rejeitos mais grossos denominados de rejeitos de flotação. Dessa forma, o rejeito de flotação é obtido ao final do processo de beneficiamento, apresentando partículas mais grossas e mais semelhantes a areia, enquanto que o rejeito ultrafino apresenta partículas mais finas e com maior teor de ferro pois é removido antes da etapa de flotação.

A Tabela 1 apresenta as misturas estudadas no trabalho e a Figura 1 apresenta as curvas granulométricas obtidas. A escolha das porcentagens de misturas (80-20, 70-30 e 60-40) foi realizada considerando a viabilidade de execução em campo. O aumento no teor de rejeito ultrafino dificulta a compactação, por isso

limitou-se a 40%. A Figura 1 apresenta a faixa de misturas que já está sendo realizada em pilhas experimentais, demonstrando que as misturas escolhidas abrangem essa variação. Na Tabela 1 também é possível verificar o aumento no valor da densidade específica (G_s) com o teor de rejeito ultrafino, confirmando um maior teor de ferro nas partículas menores. Ou seja, além de granulometrias distintas as misturas também apresentam diferenças na mineralogia.

Tabela 1. Características das misturas.

Mistura	Rejeito Flotação (%)	Rejeito Ultrafino (%)	G_s
Mistura A	80	20	2.86
Mistura B	70	30	2.91
Mistura C	60	40	2.96

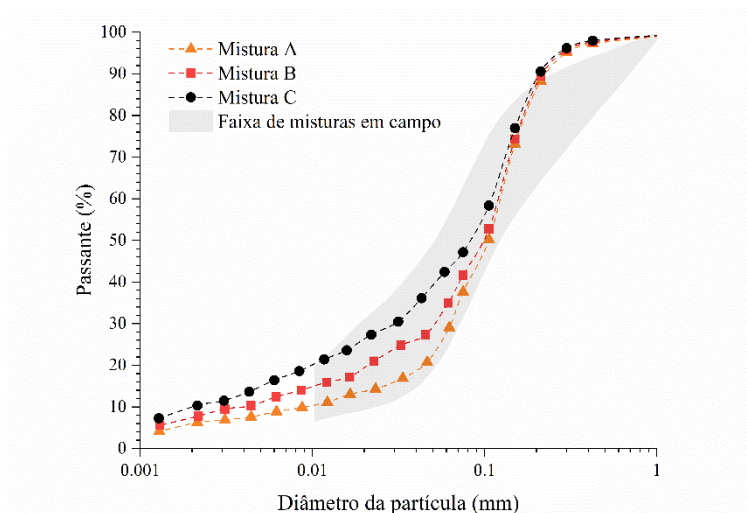


Figura 1. Curva granulométrica das misturas de rejeitos.

As características de compactação das misturas foram avaliadas através de ensaios de compactação Proctor com energia normal. As curvas de compactação obtidas para os materiais estão expostas na Figura 2.

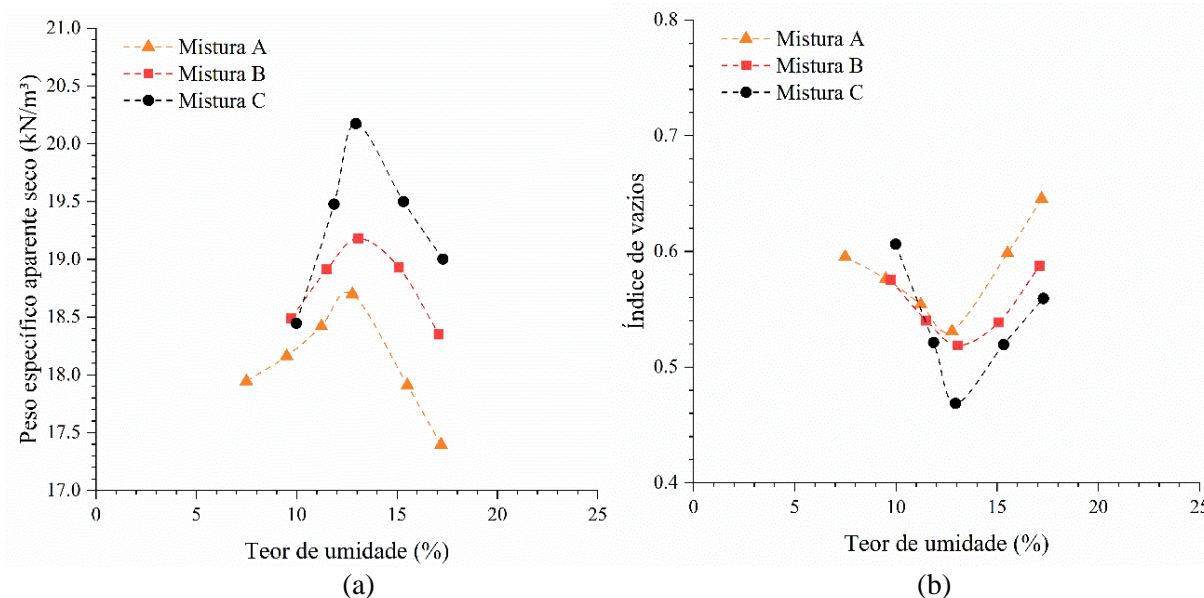


Figura 2. Curvas de compactação - umidade versus (a) peso específico (b) índice de vazios.

Primeiramente, observa-se que a umidade ótima para as diferentes misturas foi muito semelhante (cerca de 13%). Entretanto, o aumento progressivo no teor de finos (aumento na quantidade de rejeito ultrafino) possibilitou atingir pesos específicos maiores na compactação (Figura 2a). Esse aumento poderia estar relacionado ao maior valor de G_s , porém, as misturas com mais finos também apresentaram menores índices de vazios (Figura 2b). Os valores de índices de vazios foram calculados para cada ponto da respectiva curva de compactação a partir dos valores de peso específico aparente seco e do G_s de cada material. Dessa forma, constata-se que ao adicionar até 40% de rejeito ultrafino nas misturas, as partículas menores conseguem preencher os espaços vazios entre as partículas maiores durante a compactação, contribuindo para a formação de arranjos mais estáveis.

2.2 Ensaios triaxiais

Para cada mistura, foram realizados três ensaios triaxiais consolidados isotropicamente e cisalhados na condição drenada (CID). As amostras foram preparadas através do método *moist tamping* (Ladd, 1978). As amostras foram moldadas numa condição fofa e para comparação direta entre as misturas, optou-se por utilizar um mesmo índice de vazios inicial (aproximadamente $e = 0,80$). O valor de $e = 0,80$ foi escolhido com base nos resultados de compactação das misturas (Figura 2b), sendo um valor consideravelmente mais alto que os pontos de compactação máxima (índice de vazios no ponto ótimo de cada curva), o que indica um estado mais fofo. A densidade relativa não foi calculada devido a dificuldade na determinação/padronização do índice de vazios mínimo (e_{min}) e máximo (e_{max}) para materiais com altos teores de finos. Além disso, a condição inicial fofa pode ser confirmada a partir dos resultados dos ensaios triaxiais, os quais apresentaram comportamento totalmente compressivo.

Os ensaios triaxiais foram realizados em três etapas: saturação, consolidação e cisalhamento. Primeiramente, as amostras foram submetidas a um processo de saturação que consiste na percolação de CO_2 , seguida da percolação com água destilada e saturação por incremento de contrapressão (mantendo uma tensão efetiva constante de 20 kPa) até que fosse atingido um parâmetro B de Skempton superior a 0.95. Em seguida, os ensaios foram consolidados isotropicamente até a tensão de confinamento desejada. As tensões escolhidas para avaliação do comportamento foram 50, 250 e 500 kPa, buscando simular o nível de tensões existente em pilhas de alturas intermediárias. Finalmente, as amostras foram cisalhadas sob uma taxa constante de 2mm/h.

3 RESULTADOS

3.1 Resistência ao cisalhamento e rigidez

A Figura 3 apresenta o comportamento tensão-deformação obtido para os diferentes materiais através dos ensaios triaxiais. As diferentes misturas moldadas com um mesmo índice de vazios alcançaram resistências parecidas para os três níveis de tensão investigados. Esse resultado indica que a granulometria não teve muita influência na mobilização de resistência entre as partículas durante o cisalhamento.

Em relação ao comportamento volumétrico, é possível observar na Figura 3 uma leve tendência de aumento nas deformações com o aumento no teor de finos. Esse comportamento ocorre porque apesar das amostras serem moldadas em um mesmo índice de vazios, a densidade relativa das misturas tende a ser diferente. A densidade relativa depende da determinação do índice de vazios mínimo (e_{min}) e máximo (e_{max}), entretanto, esses índices foram desenvolvidos para areias convencionais. No caso de misturas com finos (tamanho silte e argila), a determinação desses índices é dificultada, especialmente para o e_{max} . Dessa forma, torna-se difícil utilizar a densidade relativa como parâmetro referência de comportamento no caso de misturas de rejeitos. Através dos resultados de compactação, verifica-se que a Mistura C atinge índices de vazios menores para um mesmo esforço aplicado, indicando que seu e_{min} é o menor dentre as misturas. Portanto, ao comparar o mesmo índice de vazios inicial de moldagem com o e_{min} de cada material, verifica-se que a capacidade de redução de volume é maior para a mistura com o maior teor de finos, o que ocorre devido ao melhor arranjo entre as partículas durante as sollicitações.

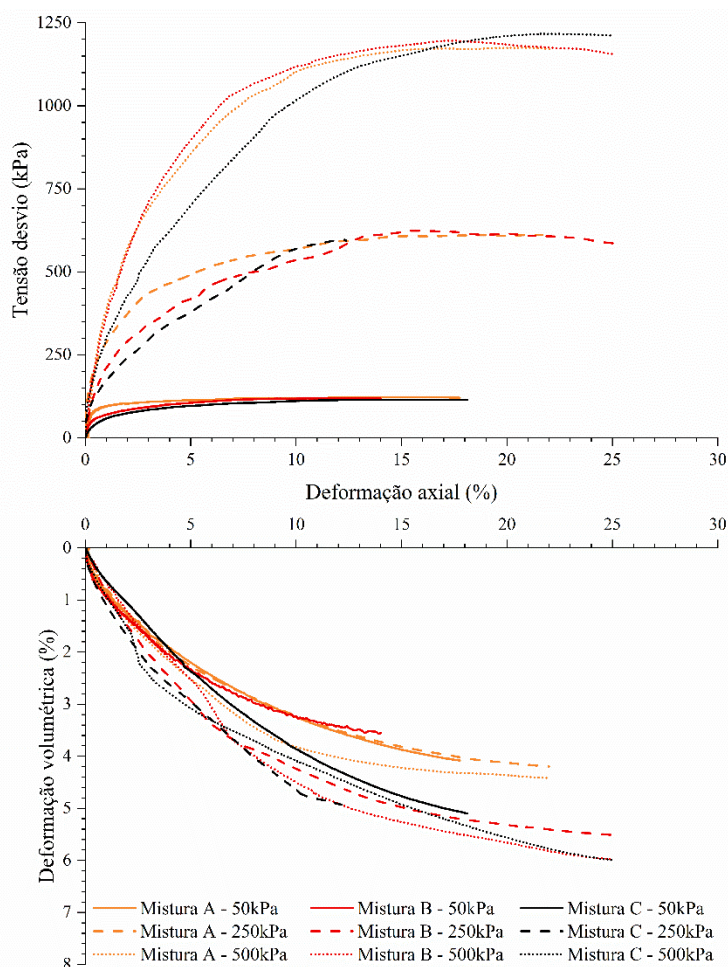


Figura 3. Comportamento tensão - deformação axial - deformação volumétrica.

A influência dos finos também pode ser observada através da análise de rigidez. Na Figura 3 é possível verificar que a Mistura C apresenta a menor rigidez dentre as misturas, independente do nível de tensão analisado. A Figura 4 apresenta os resultados de módulo cisalhante (G) em função da deformação distorcional para os ensaios realizados com a tensão confinante efetiva de 250 kPa (tensão intermediária entre as analisadas). A rigidez foi determinada em pequenas deformações através de medidas de deslocamentos registradas por sensores de efeito *Hall* posicionados diretamente nas amostras. Dessa forma, os resultados indicam que a Mistura C apresenta maiores deformações desde o início dos carregamentos, enquanto a Mistura A e Mistura B apresentam comportamentos mais próximos e mais rígido. A rigidez está diretamente relacionada ao arranjo formado pelas partículas durante a compactação. A maior presença de partículas finas entre os grãos maiores tende a formar ligações mais fracas, reduzindo a rigidez do material e favorecendo a ocorrência de deformações. Além disso, apesar de apresentarem um mesmo índice de vazios, o estado inicial da Mistura C é relativamente mais fofo que as demais, conforme detalhado anteriormente.

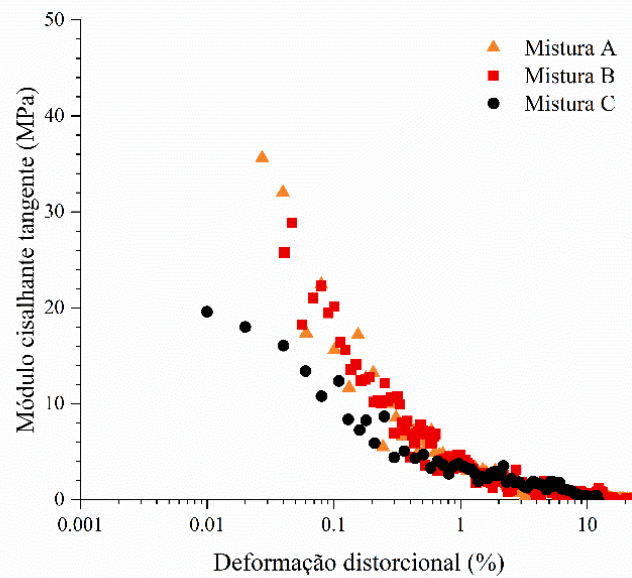


Figura 4. Rigidez em função da deformação distorcional para ensaios cisalhados em 250kPa.

3.2 Resistência no Estado Crítico

Assim como para solos convencionais, a Teoria do Estado Crítico tem sido amplamente utilizada para compreender as características relacionadas à resistência e variação volumétrica de rejeitos de mineração. O princípio fundamental da teoria consiste no alcance de uma linha de estado crítico (LEC) única quando os materiais são submetidos a grandes deformações cisalhantes. Considera-se que o material alcançou o estado crítico quando não há mais variação em termos de tensões e deformações. A condição de estado crítico é única para cada material, independente da moldagem inicial. Assim, a resistência ao cisalhamento depende apenas da composição das partículas e da tensão efetiva.

Nota-se pela Figura 3 que os ensaios estavam próximos a estabilidade na tensão desvio e na deformação cisalhante. Por isso, os pontos finais de cada ensaio foram plotados na Figura 5, sendo possível ajustar uma LEC única para todas as misturas. A inclinação da LEC no plano tensão efetiva média (p') – tensão desvio (q) é um parâmetro geotécnico fundamental, denominado razão de tensões no estado crítico ($M = q/p'$). Nesse caso, obteve-se um $M = 1.32$, o que corresponde a um ângulo de atrito no estado crítico (ϕ'_c) de 33° .

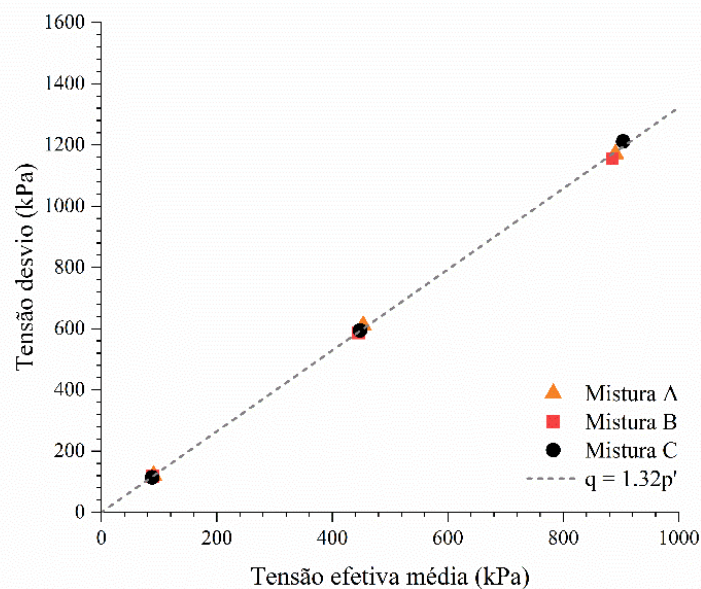


Figura 5. Linha de Estado Crítico no plano q - p' .

A Figura 6 apresenta a razão de tensões durante o cisalhamento em função da deformação axial para os ensaios realizados. Verifica-se que todos estão tendendo para o valor médio considerado ($M = 1.32$) com o desenvolvimento das deformações. Dessa forma, as misturas de rejeitos apresentaram resistência no estado crítico semelhante. Esse resultado indica que a granulometria e a variação na mineralogia não teve grande influência na resistência desses materiais. Ou seja, seria possível adotar um parâmetro M único de projeto que abrangesse as diferentes misturas produzidas. Esse resultado contribui para a resiliência de projetos de pilhas de rejeito filtrado em termos de resistência: pequenas oscilações no beneficiamento ou na produção das misturas não afetam a resistência no estado crítico.

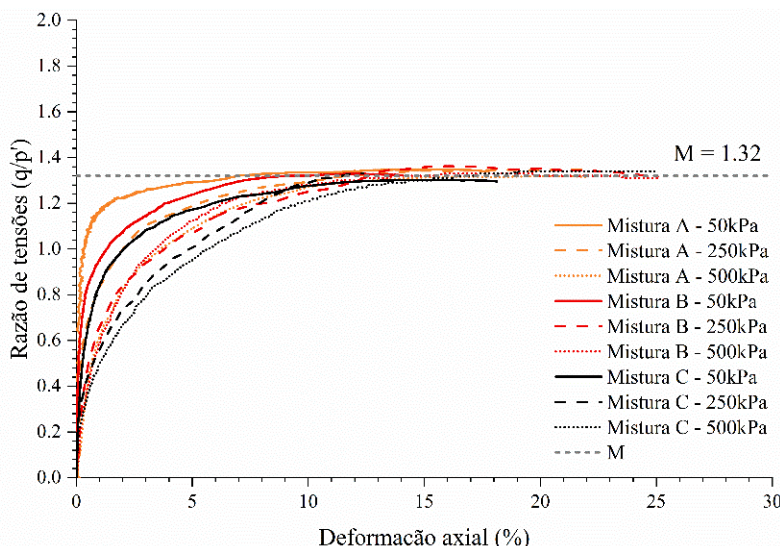


Figura 6. Razão de tensões durante o cisalhamento.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho consistiu na análise do comportamento geotécnico de diferentes misturas de rejeitos de minério de ferro. Nota-se que os finos apresentam maior influência na deformabilidade das misturas (devido aos diferentes arranjos formados), enquanto a resistência não é muito influenciada (mobilização entre partículas parecida). A partir dos resultados apresentados, e considerando as limitações do programa experimental, as seguintes conclusões podem ser feitas:

O aumento na quantidade de rejeito ultrafino (até 40%) possibilitou atingir pesos específicos maiores e índice de vazios menores para uma mesma energia de compactação, indicando que os finos adicionados tendem a preencher os espaços vazios entre as partículas maiores.

As três misturas analisadas apresentaram umidade ótima semelhante, indicando que a capacidade de compactação está mais relacionada a distribuição granulométrica do que ao teor de umidade.

Amostras das diferentes misturas moldadas com um mesmo índice de vazios alcançaram resistências (tensão desvio) parecidas para as tensões investigadas (50, 250 e 500kPa), indicando que a granulometria não teve muita influência na mobilização de resistência entre as partículas durante o cisalhamento.

Foi verificada uma leve tendência de aumento nas deformações volumétricas com o aumento no teor de finos. Apesar de apresentarem um mesmo índice de vazios, o estado inicial da mistura com mais finos é relativamente mais fofo que as demais considerando os resultados de compactação. Além disso, constata-se que a densidade relativa não é o parâmetro ideal para análise de comportamento de misturas de rejeitos.

A mistura com maior teor de finos apresentou menor rigidez, o que indica que a maior presença de partículas finas entre os grãos maiores tende a formar ligações mais fracas, favorecendo a ocorrência de deformações.

Foi possível ajustar um mesmo parâmetro $M = 1.32$ para todas as misturas, o que corresponde a um ângulo de atrito no estado crítico (ϕ'_c) de 33°. Esse resultado indica que a granulometria e a variação na mineralogia não tiveram grande influência na resistência desses materiais, o que contribui para a resiliência de projetos de pilhas de rejeito filtrado.

A influência dos finos no comportamento de materiais geotécnicos é complexa e deve ser avaliada de forma individual para cada parâmetro e cada condição (compactação, drenagem, teor de finos). Dessa forma, os resultados apresentados são válidos apenas para condições e parâmetros semelhantes aos avaliados aqui.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e à Vale S.A.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Consoli, N.C., Silva, J.P.S., Wagner, A.C., Carvalho, J.V.D.A., Baudet, B.A., Coop, M.R., Scheuermann Filho, H.C., *et al.* (2023). Critical state analysis of two compacted filtered iron ore tailings with different gradings and mineralogy at different stages of treatment, *Acta Geotechnica*, doi: 10.1007/s11440-023-01963-9.
- Davies, M. (2011). Filtered dry stacked tailings: the fundamentals, *Tailings and Mine Waste Conference*, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, doi: 10.14288/1.0107683.
- Hu, L., Wu, H., Zhang, L., Zhang, P. e Wen, Q. (2017). Geotechnical Properties of Mine Tailings, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29 No. 2, p. 04016220, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001736.
- IBRAM. (2023). Mineração em Números, *IBRAM*, available at: <https://ibram.org.br/mineracao-em-numeros/> (accessed 16 January 2023).
- Jones, H. and Boger, D.V. (2012). Sustainability and Waste Management in the Resource Industries, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 51 No. 30, pp. 10057–10065, doi: 10.1021/ie202963z.
- Ladd, R.S. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1 No. 1, pp. 16–23, doi: 10.1520/GTJ10364J.
- McLeod, H. and Bjelkevik, A. (2017). Tailings dam design - technology update (ICOLD bulletin), *Proceedings of the 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams*, presented at the Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Prague, Czech Republic.
- Spitz, K. and Trudinger, J. (2019). *Mining and the Environment: From Ore to Metal*, Second edition., CRC Press, Boca Raton.
- Wagner, A.C., de Sousa Silva, J.P., de Azambuja Carvalho, J.V., Cezar Rissoli, A.L., Cacciari, P.P., Chaves, H.M., Scheuermann Filho, H.C., *et al.* (2023). Mechanical behavior of iron ore tailings under standard compression and extension triaxial stress paths, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, p. S1674775522002396, doi: 10.1016/j.jrmge.2022.11.013.
- WISE. (2023). Chronology of major tailings dam failures, available at: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (accessed 16 January 2023).