

Considerações para o Desenvolvimento de Projetos de Pilha de Rejeito Desaguado

Gil Paiva França

Engenheiro Geotécnico, Geoestável, Belo Horizonte, Brasil, gil.franca@geoestavel.com.br

Vitor Lara Silva

Engenheiro Geotécnico, Geoestável, Belo Horizonte, Brasil, vitor.lara@geoestavel.com.br

Evandro Jardim

Engenheiro Geotécnico, Geoestável, Belo Horizonte, Brasil, evandro.jardim@geoestavel.com.br

RESUMO: Após recentes casos de rompimento de barragens, o setor minerário tem discutido alternativas para a disposição dos rejeitos de mineração. O empilhamento de rejeito desaguado tem sido apontado como uma alternativa em substituição das barragens convencionais. No entanto, para o desenvolvimento de projetos de pilhas de rejeitos, independente da tecnologia de desaguamento, diversos fatores precisam ser considerados para garantia da segurança da estrutura. Muitos destes fatores são de difícil compreensão e exigem um elevado grau de conhecimento do material de construção (rejeitos) que, muitas das vezes, ainda não está disponível para realização de ensaios de campo e laboratório. Neste trabalho serão apresentadas as principais tecnologias para desaguamento de rejeitos, limitações e dificuldades encontradas para a caracterização dos rejeitos e obtenção de parâmetros de resistência e pontos de atenção relacionados ao desenvolvimento de um projeto de Pilha de Rejeito Desaguado.

PALAVRAS-CHAVE: Projetos, Pilha de Rejeito “Seco”, filtrado, espessado, desaguado, DSTF, empilhamento, liquefação.

ABSTRACT: After recent cases of dam failure, the mining sector had been discussing alternatives for the disposal of mining waste. The stacking of dewatered tailings has been identified as an alternative to replace conventional dams. However, for the development of tailings stack projects, regardless of the dewatering technology, several factors need to be considered to guarantee the safety of the structure. Many of these factors are difficult to understand and require a high degree of knowledge of the construction material (tailings) that, many times, is not yet available for field and laboratory tests. In this work, the main technologies for dewatering tailings will be presented, limitations and difficulties encountered for the characterization of tailings and obtaining resistance parameters and points of attention related to the development of a dewatered tailings project.

KEYWORDS: Design, Dry Stack Tailing Facilities, filtered, thickened, dewatered, stacking, DSTF, liquefaction.

1 Introdução

Diante da necessidade de estudar métodos alternativos às barragens convencionais, muito tem se discutido sobre critérios para desenvolvimento de projetos de empilhamento de rejeito, estas estruturas são frequentemente chamadas de Pilhas de Rejeitos “Secos”. No entanto, este termo não é o mais correto, uma vez que não é possível garantir que o rejeito desaguado, seja qual for a tecnologia adotada, esteja totalmente seco. Neste artigo o autor considera que a forma mais correta para se referir a este tipo de estrutura é Pilha de Rejeito Desaguado. Contudo, o importante é a compreensão de que estas estruturas nunca estarão totalmente secas e que, na maioria dos casos, os rejeitos são dispostos com grau de saturação variando entre 50 e 85%.

Atualmente existem Pilhas de Rejeito Desaguado em minas com taxas de produção de até 30.000 tpd e muitos projetos propostos considerando taxas de produção de até 100.000 tpd. No entanto, existem ainda

muitas incertezas relacionadas à viabilidade técnica e econômica desta solução para elevadas taxas de produção, principalmente em regiões de clima úmido.

2 Tecnologias de Desaguamento

A demanda por desenvolvimento de projetos de Pilha de Rejeito Desaguado tem desafiado a indústria mineral a desenvolver tecnologias mais eficientes para o desaguamento dos rejeitos. Atualmente algumas tecnologias tem se destacado neste sentido. As principais tecnologias adotadas hoje são: Espessadores e os Filtros Prensa e à Vácuo. Além disso, algumas técnicas de separação da lama do rejeito grosso podem ser adotadas com a adoção de ciclones e hidrociclones para melhorar a eficiência destas tecnologias.

Neste contexto, após a adoção destas tecnologias os rejeitos podem se apresentar nos seguintes tipos principais (Gomes, 2006):

- Rejeitos espessados (“thickened tailings”) - rejeitos desaguados parcialmente, mas que apresentam ainda a consistência de uma polpa, com alto teor de sólidos e ainda passível de bombeamento;
- Rejeitos em pasta (“paste tailings”) - rejeitos espessados mediante a incorporação de algum tipo de aditivo químico (tipicamente um agente hidratante);
- Rejeitos filtrados a úmido (“wet cake tailings”) - rejeitos na forma de uma massa saturada ou quase saturada, não mais passível de bombeamento;
- Rejeitos filtrados a seco (“dry cake tailings”) - rejeitos na forma de uma massa não saturada (grau de saturação tipicamente entre 70% e 85%), não passível de bombeamento.

Um dos métodos mais comuns adotado para o desaguamento do rejeito tem sido o desaguamento por filtro prensa. No entanto, rejeitos filtrados, geralmente, apresentam grau de saturação variando entre 50% e 85% na saída do filtro. Esta variação de eficiência dos filtros pode ser explicada devido a alterações na mineralogia do minério, granulometria e obstrução dos elementos filtrantes, e acabam por exigir a adoção de medidas complementares para garantir o grau de saturação que permita o transporte e o empilhamento dos rejeitos.

Para proposição da tecnologia mais adequada para o desaguamento dos rejeitos é necessária a realização de testes de campo a fim de especificar o teor de umidade alvo e as variações aceitáveis.

2.1 Teores de umidade alvo e possível

A literatura técnica e fornecedores de filtros frequentemente apontam como possível um teor de umidade dos Rejeitos filtrados em torno de 15%. Na prática, estes teores de umidade variam entre 17 e 18% e eventualmente apresentam teores de umidade variando entre 20 e 23% devido à variações da eficiência do filtro. (Crystal, C., & Ezama, I).

A depender da eficiência dos filtros, estes podem gerar rejeitos com baixa densidade e alto teor umidade. No intervalo entre os teores de umidade alvos e possíveis, é mais provável que os rejeitos se comportem como um material em condição saturada (Crystal, C., & Ezama, I).

2.2 Influência do Clima Regional

Como qualquer outro tipo de projeto de estruturas para disposição de rejeitos, condições climáticas, características do relevo e escala de produção terão um grande impacto no desenvolvimento do projeto e nas operações de uma Pilha de Rejeito Desaguado. O clima árido foi o primeiro a adotar projetos de

empilhamento de rejeito com maior taxa de produção, impulsionado pela necessidade de economizar água para processamento. O empilhamento de rejeito em climas áridos se beneficia da elevada taxa de evaporação para aprimorar ainda mais o processo de desaguamento e garantir que a pilha permaneça não saturada (Crystal, C., & Ezama, I., 2018).

No Brasil, os principais complexos minerários estão localizados em regiões de clima tropical e equatorial, com pluviosidade média anual variando entre 800 e 2500 mm e balanço precipitação/evaporação positivo. Assim, são necessários estudos específicos para viabilizar este método construtivo como o gerenciamento de águas superficiais e com objetivo de reduzir a contribuições para o interior do maciço.

3 Características dos Rejeitos

3.1 Parâmetros de Resistência drenada e não drenada

A resistência ao cisalhamento dos rejeitos varia dependendo do teor de umidade, densidade e condições de saturação no interior da estrutura. É importante conhecer estas propriedades ao longo do crescimento da estrutura, uma vez que estas propriedades variam com o aumento das tensões (J. Lupo & J. Hall, 2010).

Estas variáveis tornam o conhecimento das propriedades dos rejeitos um desafio no desenvolvimento de projeto de Pilha de Rejeito Desaguado. Para o desenvolvimento de projetos de Pilha de Rejeito Desaguado, geralmente, são realizados testes piloto com a tecnologia de desaguamento de rejeito adotada, para verificar a eficiência do desaguamento e a caracterização completa do rejeito após filtragem. No entanto, além da baixa representatividade comum a este procedimento, variáveis como a mudança de comportamento do rejeito com o crescimento da pilha, principalmente com a redução dos índices de vazios e consequentes aumentos do grau de saturação, são ignoradas.

Uma dificuldade existente é a determinação do grau de saturação e estado do rejeito empilhado. Frequentemente são projetados testes-piloto com empilhamentos experimentais que podem chegar a até 20 metros de altura. J. Lupo e J. Hall (2010) apontam que condições saturadas podem se desenvolver em pilhas com alturas a partir de 25 metros da altura, a depender da compressibilidade dos rejeitos e das condições de compactação. Para C. Crystal et al (2018) rejeitos compactados com espessuras acima das espessuras adotadas em aterros convencionais (0,20 e 0,30 metros) resultará em empilhamentos com rejeitos contráteis e, portanto, com potencial de liquefação para o caso de desenvolvimento de excesso de poropressões neste material.

Ensaio de laboratório e de campo normalmente apresentam resultados distintos para amostras semelhantes. A adoção de resultados de ensaios de laboratório (Ensaio Triaxial) pode induzir o projetista a adotar parâmetros de resistência significativamente maiores que o real.

A determinação da resistência não drenada *in situ* a partir de resultados de laboratório é dificultada devido ao processo de coleta de amostras indeformadas representativas e de qualidade. O ensaio de penetração do cone (CPT) tem sido o principal meio para essa avaliação (ICOLD, 2019). Contudo, conforme citado anteriormente, os testes-piloto dos empilhamentos desaguados (“dry” stack) não alcançam alturas que possibilite uma campanha de investigação assertiva para obtenção de parâmetros de resistência, uma vez que estas estruturas não estão submetidas a altas tensões, empilhamentos com alturas superiores a 50 metros.

Devido à complexidade na obtenção dos parâmetros de resistências do rejeito, a Teoria dos Estados Críticos pode ser uma alternativa para a compreensão do comportamento de uma pilha de rejeito desaguado. O modelo NorSand, descrito por Jefferies e Been (2006) baseado no parâmetro de estado (ψ), tem origem na Teoria dos Estados Críticos, e é focado no comportamento do solo em vez de tenta encontrar um modelo ideal que se adeque aos dados experimentais. Neste tipo de modelo, ao simular-se o comportamento do material sob trajetórias de tensões arbitrárias, após a calibração das suas variáveis para o material em

questão, elas movem-se para a Linha de Estado Crítico quando houver um cisalhamento induzido por deformação.

Ainda de acordo com Viana da Fonseca (2013), os ensaios laboratoriais necessários para obter as propriedades dos materiais do modelo NorSand são ensaios bastante comuns, como os ensaios triaxiais drenados e, para os casos onde a condições de amostragem são limitadas, o ensaio de piezocone (CPTu).

O estado da prática para avaliação da liquefação estática está em constante evolução e ainda não é considerado bem compreendido. Quando há presença de materiais em estado contrátil, tem sido recomendado assumir que a liquefação estática poderá ocorrer, sendo necessário que as análises de projeto sejam realizadas considerando a resistência residual ou liquefeita para estes materiais, quando saturados (ICOLD, 2019).

3.2 Grau de Saturação x Porosidade

Em Pilhas de Rejeito Desaguado, mesmo para um grau de saturação menor que 100%, há possibilidade de ocorrer liquefação na estrutura. Alguns autores defendem que a estrutura pode estar susceptível ao fenômeno de liquefação se apresentar um grau de saturação acima de 85% nos rejeitos.

O grau de saturação dos rejeitos é uma função da porosidade, que muda conforme a profundidade da pilha aumenta (ou seja, menor porosidade na parte inferior da pilha e maior porosidade na parte superior da pilha) Um gráfico de porosidade versus profundidade de uma pilha de rejeito desaguado é apresentado na Figura X, mostrando a redução porosidade devido à compressão dos rejeitos.

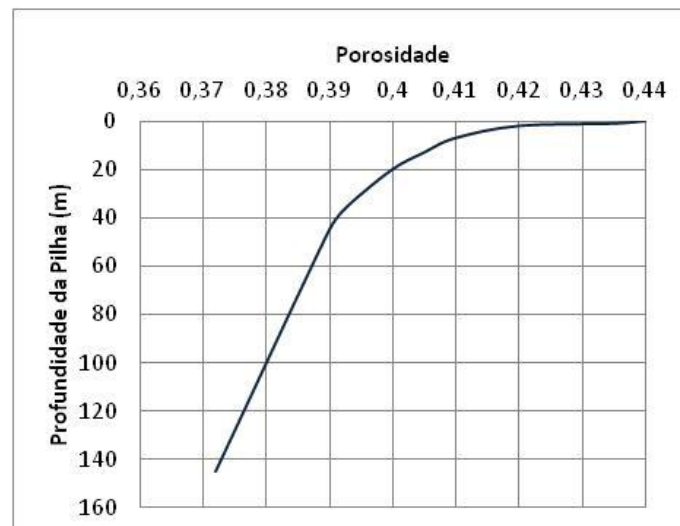


Figura 1 – Porosidade típica do rejeito com o aumento da profundidade da Pilha.
(Fonte: Adaptado de J. Lupo & J. Hall, 2010)

Se os rejeitos filtrados forem altamente compressíveis, existe o potencial de a porosidade diminuir de tal modo que os rejeitos da pilha ficam totalmente saturados. Quando uma parte da pilha ficar totalmente saturada, qualquer carga adicional (por exemplo, o crescimento da pilha) pode dar origem a excesso de poropressão. A presença de saturação associada ao excesso de poropressão pode dar origem a problemas de estabilidade incluindo um gatilho para liquefação. Portanto, é importante quantificar a compressibilidade dos rejeitos.

Os rejeitos filtrados podem variar de alta a baixa compressibilidade. A saturação dos rejeitos está condicionada pela porosidade, que diminui com o acréscimo de tensões. Condições saturadas podem se desenvolver em pilhas com alturas a partir de 25 m da altura (J. Lupo & J. Hall).

3.4 Potencial de liquefação

O rejeito de mineração é um material não coesivo e susceptível à liquefação caso esteja saturado, fofo o suficiente para apresentar comportamento contrátil e caso possua permeabilidade baixa para não permitir drenagem significativa durante o período do carregamento.

Todas as tecnologias de desaguamento de rejeitos, exceto alguns processos de filtração a seco, resultam em rejeitos saturados no momento da disposição. Os rejeitos filtrados, geralmente, apresentam saturação entre 50% e 75% e baixa condutividade hidráulica, na saída do filtro (J. Lupo & J. Hall, 2010). Neste caso, rejeitos filtrados com comportamento contrátil podem ser colocados dentro da pilha e poderiam apresentar resistência ao cisalhamento não drenada muito baixa.

O risco de liquefação pode ser reduzido se a pilha, incluindo as zonas estruturais, for implementada e permanecer não saturada e/ou as zonas estruturais forem compactadas para um estado adequadamente dilatante, normalmente exigindo compactação com teor de umidade ótimo ou no ramo seco. Entretanto, é difícil determinar se o material não irá saturar ou mudará para um comportamento contrátil durante a operação da estrutura, como por exemplo, com o aumento das tensões em decorrência dos carregamentos.

Para garantir que o rejeito alcance o estado adequadamente dilatante pelo processo de compactação, é necessário um estudo específico para verificar qual o melhor método de campo para determinação do grau de compactação. O método proposto por Proctor e a avaliação da Compacidade Relativa dos materiais não coesivos são algumas possibilidades que podem ser consideradas.

3.4 Mudança de comportamento com carregamentos subsequentes

A medida que o empilhamento de rejeitos é construído, o material pode mudar de comportamento com o aumento da altura da estrutura. Os rejeitos, mesmo que compactados, passam a ter comportamento normalmente adensado, e podem se tornar contráteis, a medida que a carga de compactação é superada pelo peso próprio da estrutura, o que tende a ocorrer com algumas dezenas de metros (KCB, 2017).

Rejeitos contráteis, empilhados muito rapidamente, podem gerar excessos de poropressões e comprometer a estabilidade da estrutura. A determinação do comportamento contrátil do rejeito ao longo da operação é de difícil obtenção. Dessa maneira, é seguro assumir que o rejeito é contrátil abaixo de determinada profundidade, dependendo das propriedades de compressibilidade e estado de tensões após compactação do material.

4 Critérios Projeto

4.1 Geometria

Para definição da geometria de Pilha de Rejeito Desaguado as análises de estabilidade precisam considerar:

- Resistência ao cisalhamento de todos os materiais nas condições de carregamento (drenado/não drenado) previstos;
- Considerar as poropressões que podem se desenvolver no interior da Pilha;
- Considerar o carregamento sísmico dos taludes operacionais e pós-fechamento.

O projeto deve ser desenvolvido para fornecer uma geometria estável na eventual presença de uma linha freática.

4.2 Zona Estrutural

É uma boa prática compactar rejeitos não saturados ao menos ao longo do talude de jusante sendo, em alguns casos, necessária a compactação de todo o rejeito disposto. As dimensões da zona estrutural devem ser previstas com base em análises de estabilidade de forma a garantir a segurança da estrutura. A zona estrutural precisa considerar a resistência do material, a carga estática e sísmica e as possíveis preocupações com a presença de água.

4.3 Dispositivos de Drenagem

O desenvolvimento de Projetos de Pilhas de Rejeitos Desaguados em regiões de clima tropical exige atenção especial para o gerenciamento das águas superficial e de subsuperfície. Conforme apresentado anteriormente, os rejeitos desaguados apresentam teor de umidade muito próximo do limite máximo aceitável para este tipo de estrutura.

Garantir que não haja contribuição de água externa é fundamental para garantir a segurança da estrutura. A condutividade hidráulica dos rejeitos não saturados é relativamente baixa, o que impede a entrada de grandes volumes de água em estruturas com o correto gerenciamento de águas superficiais.

Para o gerenciamento das águas subsuperficiais faz-se necessário conhecer a hidrogeologia regional para avaliar a necessidade de implantação de dispositivos de drenagem interna que possam direcionar as águas de nascentes existentes ou que possam surgir após a implantação da estrutura devido ao acréscimo de carga.

Para garantir a drenagem da água do rejeito e de possíveis contribuições externas deve-se prever a implantação de drenos de fundo na base da pilha, estes devem ser transicionados e obedecer à critérios de filtro já consolidados. Estes drenos podem estar ou não associados aos dispositivos de drenagem das águas superficiais.

Dispositivos de drenagem como canais periféricos, canaletas de drenagem, descidas d'água e etc. devem se concebidos, sempre que possível, afastados da face da pilha, de modo a evitar que possíveis falhas de impermeabilização destas estruturas possam ocasionar a saturação do maciço.

É importante que o projetista entenda qual o limite de água aceitável e quais limites de poropressão aceitáveis no maciço, levando em consideração o aumento do grau de saturação devido ao adensamento dos rejeitos após sucessivos carregamentos.

4.4 Controles de Construção

A estrutura precisa ser projetada para possibilitar a operação da mina durante os períodos secos e chuvosos, bem como suportar o método de transporte e disposição dos rejeitos, seja por caminhões ou por outros equipamentos.

Durante a construção da pilha, camadas que excedem a espessura convencional de compactação em terraplanagem, da ordem de 0,2 a 0,3 m, poderão resultar em rejeitos empilhados com comportamento contrativo, independentemente das condições climáticas ou de outras condições de empilhamento (Crystal, C., & Ezama, I). Dessa maneira, é importante manter essas espessuras durante toda a operação da estrutura.

O transporte e o depósito por caminhões e a compactação limitará o impacto e a eficácia da secagem evaporativa. Instalações com empilhamento de transportadores que colocam material solto em faces finas obterão maior secagem por evaporação, mas isso ainda pode estar limitado aos poucos centímetros externos, dependendo do tempo do ciclo de empilhamento.



6 Considerações Finais

Neste trabalho foram apresentados os principais pontos identificados pelos autores como prioritários para o desenvolvimento de projetos de Pilha de Rejeito Desaguado. O empilhamento de rejeito pode ser considerado um método de disposição “novo” quando é considerada sua aplicação em climas úmidos, como no Brasil.

O entendimento do comportamento do rejeito empilhado é de difícil compreensão. Destaque para determinação do grau de saturação e estado, contrátil ou dilatante, durante a construção da pilha de rejeito. É seguro assumir que o gatilho de liquefação irá ocorrer, mesmo que desconhecido, sendo recomendada a utilização do parâmetro de resistência residual para análises de estabilidade.

Os critérios de projeto devem ser definidos de maneira que a concepção, construção, operação e fechamento da pilha sejam feitos de maneira segura. Devem ser observadas principalmente a geometria, setorização ou zona estrutural dos rejeitos, dispositivos de drenagem, controles construtivos, monitoramento e manutenção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Professor Roberto Azevedo e à Geoestável Consultoria e Projetos pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amoah, N., Dressel, W., & Fourie, A. (2018). Characterisation of unsaturated geotechnical properties of filtered magnetite tailings in a dry stack facility. *Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, 375–388. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1805_31_amoah
- Been, K. Characterizing mine tailings for geotechnical design. *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation* 5, v. 50, n. 4, p. 59–78, 2016;
- Crystal, C., & Ezama, I. (2018). Filter-Pressed Dry Stacking. *Tailings and Mine Waste 2018*. Retrieved from https://www.srk.com/sites/default/files/file/CCrystal-CHore-IEzama_FilterPressedDryStacking_2018.pdf
- Davies, M. (2011). Filtered dry *stacked tailings: the fundamentals*. *Proceedings Tailings and Mine Waste 2011*, Vancouver B.C., (June), 9 p;
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., & Moran, C. J. (2014). *Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>;
- Engineering, D. of C. and E. (2010). *Tailings and Mine Waste 2010*. In T. & F. Group (Ed.), *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*. <https://doi.org/10.1201/b10569>;
- Gomes, R.C. (2006). Notas de Aula. Disposição de Rejeitos de Mineração - Caracterização Tecnológica de Rejeitos.
- ICOLD (International Commission on Large Dams). *Bulletin 181 - Tailings Dam Design Technology Update*. 2019.
- Jefferies, M., & Been, K. (2015). *Soil Liquefaction: A Critical State Approach*, 2nd Edition. In *Applied Geotechnics*. Taylor & Francis;
- Klohn Crippen Berger (KCB). (2017). *Study of Tailings Management Technologies*. Retrieved from http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings_Management_TechnologiesL.pdf;
- Lupo, J., & Hall, J. (2011). *Dry stack tailings - Design considerations*. *Tailings and Mine Waste'10 - Proceedings of the 14th International Conference on Tailings and Mine Waste*, 327–334;

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



- Piésold, B. U. K., & Piésold, J. C. K. (2013). *Considerations for Tailings Facility Design and Operation Using Filtered Tailings Summary of Significant Operating Filtered Tailings Operations*. (2003), 201–210;
- Rosemont Copper Company (2008) *Filtered tailings dry stacks current state of practice final report*, prepared by AMEC Earth & Environmental, Inc., viewed 21 November 2012, http://rosemontcopper.com/assets/docs/reports_10-8-10/tailings_white_paper/tailings_dry_stacks-_white_paper-final.pdf;
- Ulrich, B. (2019). Practical thoughts regarding filtered tailings. *Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, 71–80.
- Viana da Fonseca, A. Liquefação de Solos à Luz da Mecânica Aplicada. *Geotecnia* n.º 128 – Julho 13 – pp. 3-35.