

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/485

Verificação do Processo de Governança e Critérios de Projeto (ET) Para Disposição Temporária de Rejeitos de Mineração em Pilhas

Maria Clara Anunciação

Estudante, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, maria.anunciacao@aluno.unb.br

Michéle Dal Toé Casagrande

Professora Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

Gustavo Marçal de Sousa

Gerente Técnico, Vale S.A., Nova Lima, Brasil, gustavo.marcal@vale.com

RESUMO: De acordo a Agência Nacional de Mineração – ANM, em maio de 2023, no estado de Minas Gerais, havia 41 barragens alteadas pelo método a montante. Após o rompimento de uma barragem de rejeitos ocorrido no ano de 2019, em Brumadinho, a eliminação de barramentos alteados a montante se tornou uma exigência legal. Dessa forma, destaca-se a necessidade de investigar um método de disposição sustentável e seguro para os rejeitos extraídos dessas obras. O reprocessamento desses rejeitos tem se mostrado como uma alternativa interessante ao reaproveitamento desse subproduto, sobretudo no que tange às esferas econômicas e ambientais do setor minerário. Logo, como alternativa ao desmonte desses barramentos, até que a etapa de beneficiamento de minérios se inicie na usina, este artigo tem como objetivo apresentar o empilhamento drenado para o manejo temporário dos rejeitos extraídos de uma barragem em descomissionamento. Por meio de campanhas de investigação, ensaios de laboratório triaxiais e de ensaios CPTu foram obtidos parâmetros geotécnicos e razões de resistência não drenada de pico desses materiais. As análises de estabilidade foram realizadas em condições de operação normal e sob influência pseudo-estática. Verifica-se que os fatores de segurança requeridos pela NBR 13.028/2017 são atingidos, uma vez que atenderam de forma satisfatória aos valores mínimos preconizados por norma.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos, Pilha temporária de Disposição de Rejeitos, Ensaios CPTu, Análises de estabilidade.

ABSTRACT: According to the National Mining Agency (ANM), in May 2023, the state of Minas Gerais had 41 dams raised by the upstream method. After the collapse of a tailings dam in Brumadinho in 2019, the elimination of upstream dams became a legal requirement. This highlights the need to investigate a sustainable and safe disposal method for the tailings extracted from these works. The reprocessing of these tailings has proved to be an interesting alternative to the reuse of this by-product, especially in terms of the economic and environmental spheres of the mining sector. Therefore, as an alternative to dismantling these dams, until the ore processing stage begins at the plant, this article aims to present the dry stacking for the temporary management of tailings extracted from a dam undergoing decommissioning. Geotechnical parameters and peak undrained strength ratios of these materials were obtained through investigation campaigns and CPTu tests. Stability analyses were carried out under normal operating conditions and under pseudo-static influence. It was found that the safety factors required by NBR 13.028/2017 were met, as they satisfactorily met the minimum values recommended by the standard.

KEYWORDS: Tailings, Temporary tailings disposal pile, CPTu tests, Stability analysis.

1 INTRODUÇÃO

O início da construção de barragens de mineração na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, data dos anos 1970. Sousa (2020) explica que a predominância da lavra de minérios hematíticos, caracterizados por elevados teores de ferro, associada à baixa eficiência dos processos de beneficiamento utilizados até o final da década de 1990, resultou em rejeitos depositados em algumas barragens do estado que apresentam um alto teor de ferro, que varia entre 35% e 55%.

Os rejeitos de minério de ferro constituem o maior passivo ambiental das atividades desse setor, uma vez que a disposição desse material demanda depósitos que minimizem os riscos estruturais e ambientais do descarte desse subproduto. A escolha do tipo e do porte desses depósitos está diretamente associada, principalmente, às propriedades mecânicas do rejeito e ao dano potencial ambiental correlacionado à estas estruturas.

A Lei 14.066/2020 foi sancionada no Brasil após os acidentes envolvendo duas barragens de rejeitos no estado de Minas Gerais, alterando a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). O seu Artigo 2º define como barragem descaracterizada “aquela que não opera como estrutura de contenção de sedimentos ou rejeitos, não possuindo características de barragem, e que se destina a outra finalidade”.

Em tempo, a Lei veda a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método a montante, que ocorre quando os diques de contenção se apoiam sobre o próprio rejeito depositado no reservatório. Além disso, a Lei determina que as estruturas construídas por esse método devem ser descaracterizadas, ou seja, a área de ocorrência da barragem deve passar pelo processo de perda das suas características de contenção.

A descaracterização de barragens, por sua vez, revela-se como uma prática necessária para mitigar os riscos associados às estruturas antigas ou consideradas menos seguras. Esse processo envolve o descomissionamento controlado do empreendimento. Dessa forma, o empilhamento drenado destaca-se como um método sustentável e seguro de disposição temporária para os rejeitos extraídos dessas obras.

A governança de projetos geotécnicos de ferrosos prevê o gerenciamento dos riscos associados a essas pilhas, em caráter permanente ou temporário, existentes nas áreas operacionais e industriais das empresas mineradoras, sobretudo no que tange às esferas econômicas e ambientais do setor mineral. Em associação às políticas e normas de gestão para essas estruturas, objetiva-se minimizar a probabilidade de ocorrências e de impactos pessoais, ambientais e materiais.

Dentro desse panorama, o projeto de disposição temporária de rejeitos em pilhas emerge como uma abordagem que busca conciliar eficiência operacional, segurança geotécnica e ganhos econômicos, oferecendo flexibilidade e adaptabilidade às demandas dinâmicas do setor mineral.

Portanto, o principal objetivo deste trabalho é validar como alternativa ao desmonte desses barramentos, até que a etapa de beneficiamento de minérios se inicie com na usina, o empilhamento drenado para o manejo temporário desses rejeitos.

2 PILHA PILOTO HIPOTÉTICA

O estudo de caso abordado desse estudo trata-se de um projeto piloto hipotético para a disposição temporária de rejeitos de mineração em pilhas, a fim de replicá-lo em escala industrial. A geometria proposta foi definida especificamente para o desenvolvimento desta pesquisa.

É previsto um empilhamento de 10 metros de altura (para a seção mais crítica), inclinação longitudinal e transversal de 1,5% e inclinação das rampas de acesso/ângulo de face de 10° (talude 1:6). Esse cenário leva em consideração a existência de uma pilha de estéril na área de ocupação do empilhamento temporário, de modo que o arranjo avaliado aproveitaria a porção sudoeste dessa estrutura como fundação.

A área de ocupação da disposição temporária para esses rejeitos é de aproximadamente 19.800 m². Para a geometria proposta, a capacidade volumétrica desse arranjo é de 80.000 m³ de material. A figura 1 destaca, em vermelho, a localização da área de estudo para a disposição temporária da pilha piloto hipotética.



Figura 1. Localização da área avaliada para a implantação temporária da pilha piloto.

3 REJEITO GRANULAR DE MINÉRIO DE FERRO (FE)

Os rejeitos granulares (silte arenoso e areia siltosa) de minério de ferro são provenientes das obras de descaracterização de uma barragem de contenção de rejeitos localizada no estado de Minas Gerais. Esses materiais serão utilizados para a construção hipotética de um empilhamento temporário, visando o manejo intermediário desses resíduos.

Os ensaios de caracterização foram realizados para definir as curvas de distribuição granulométrica provenientes da coleta de amostras de dois furos de diferentes profundidades, realizados na região de montante do reservatório da barragem. Para a realização de Ensaios Triaxiais CIUsat nos rejeitos foram coletadas três amostras: duas obtidas do furo 1 e uma do furo 2, que foi reconstituída em laboratório com uma densidade aparente de 2,3 g/cm³. A consolidação dos resultados desses ensaios é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados dos Ensaios Triaxiais CIUsat nas amostras dos rejeitos.

Amostra	Classificação Granulométrica	Peso Específico γ (kN/m ³)	Parâmetros de Resistência	
			c' (kPa)	ϕ' (°)
Furo 1 (reconstituída)	Silte arenoso	22,0	0,0	29,6
Furo 2 (18,0 a 19,0m)	Areia siltosa	22,0	0,0	40,6
Furo 2 (26,0 a 27,0m)	Areia siltosa	22,0	0,0	40,6

4 ANÁLISES DE ESTABILIDADE



As análises de estabilidade desse projeto piloto hipotético para a disposição temporária de rejeitos foram realizadas em condições de operação normal e sob influência pseudo-estática. Foi utilizado o *software* Slide2®, da Rocscience.

O Slide® é um programa de análise bidimensional de estabilidade de taludes, utilizado para calcular o Fator de Segurança (FS) de superfícies circulares e não circulares em taludes de solos e rochas. Foram avaliadas as superfícies potenciais de ruptura do empilhamento temporário, bem como foram definidos os FSs para cada seção de análise e condição avaliada.

4.1 Parâmetros

Os parâmetros finais de resistência ao cisalhamento utilizados estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de resistência finais adotados.

Material	Cor	Peso Específico γ (kN/m ³)	<i>Vertical Strenght Ratio</i>	Parâmetros de Resistência	
				c' (kPa)	ϕ' (°)
Estéril semi-compactado (fundação)		22,0	-	10,0	29,50
Rejeito compactado ¹ não drenado ²		22,0	0,24	-	-

4.2 Resultados

A seguir, tem-se os critérios e as premissas adotadas nesse estudo.

- i) Quanto às configurações do *software* e premissas da modelagem
- Análises realizadas no *software* Slide2®, desenvolvido pela Rocscience;
 - Fator de Segurança calculado pelos métodos de análise de estabilidade propostos por Morgenstern-Price, Bishop e Spencer;
 - Materiais considerados homogêneos e isotrópicos;
 - Teoria do equilíbrio limite;
 - Método de ruptura não-circular, adotando otimização da superfície de ruptura se aplicável;
 - Os parâmetros de resistência dos materiais de fundação e maciço seguem o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb e o critério de ruptura *Vertical Strenght Ratio*;
 - O estudo visa avaliar que os fatores de segurança atendam aos valores mínimos preconizados pela NBR 13.029 (ABNT, 2017), que estabelece valores de 1,50 tanto para a ruptura geral do talude quanto para a ruptura do talude entre bermas em condições drenadas. Para a condição não-drenada, o fator de segurança mínimo exigido é de 1,30, adaptado da NBR 13.028 (ABNT, 2017), para o caso de barragens de mineração. Para as análises pseudo-estáticas, os fatores de segurança estão acima de 1,10.
- ii) Quanto aos cenários de carregamento e geometria
- Análises realizadas considerando condição drenada somente para o estéril semi-compactado da fundação;
 - Análises de estabilidade realizadas para a condição da geometria desenvolvida para o desenvolvimento desta pesquisa.

As três seções transversais de análise de estabilidade avaliadas foram denominadas como A-A', B-B' e C-C' e estão apresentadas na Figura 2, Figura 3 e Figura 4, respectivamente, incluindo o contato geológico-geotécnico que se aplica à este estudo.

¹ Considerou-se que o rejeito será depositado de forma mecânica no empilhamento temporário. Entretanto, para fins de desenvolvimento desse artigo, não houve a consideração da influência de um rígido controle técnico de compactação;

² Em virtude do descompasso entre o tempo de dissipação do excesso de poropressão gerado pela construção da estrutura e a velocidade da sua implantação, o rejeito foi analisado em condição não drenada.

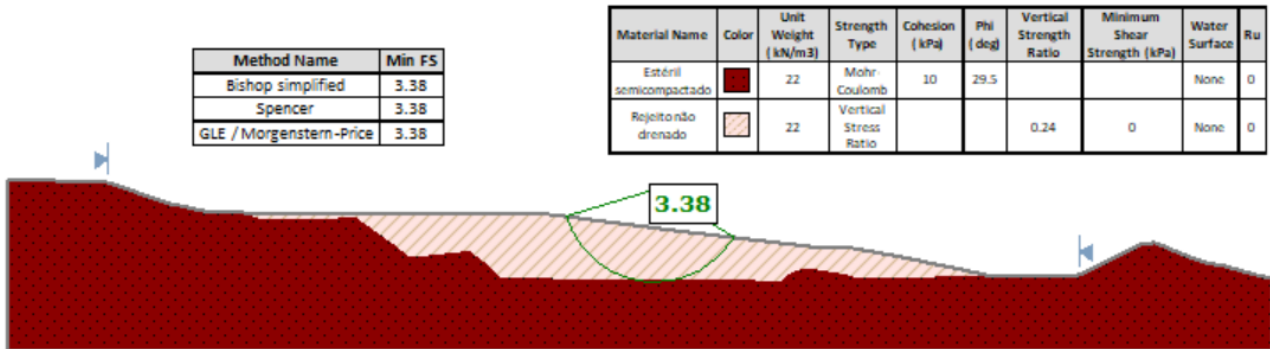


Figura 2. Seção de análise de estabilidade A-A'.

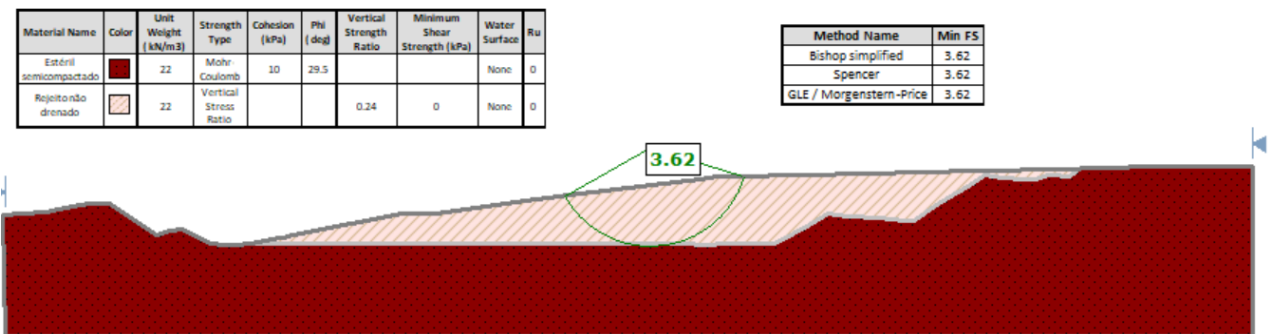


Figura 3. Seção de análise de estabilidade B-B'.

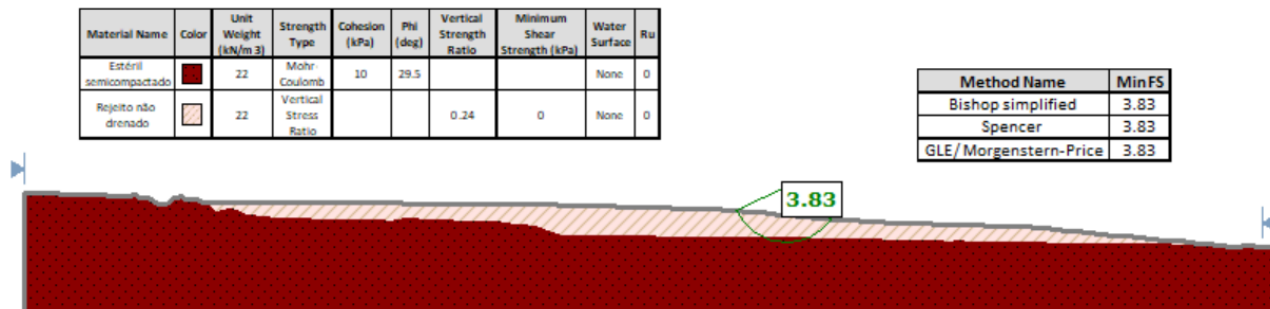


Figura 4. Seção de análise de estabilidade C-C'.

Os resultados estão exibidos e consolidados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados das análises de estabilidade avaliadas.

Seção	Cenário de Solicitação	Fator de Segurança (FS)
Seção AA'	Condição normal	3,38
Seção AA'	Pseudo-estática	2,79
Seção BB'	Condição normal	3,62
Seção BB'	Pseudo-estática	2,04
Seção CC'	Condição normal	3,83
Seção CC'	Pseudo-estática	2,51

Para realizar as análises de estabilidade pseudo-estáticas foi considerado o PGA como 0,092 g, ao passo em que os coeficientes de aceleração sísmica foram 0,046 g Kh/0,031 g Kv, sendo a componente Kv equivalente à 2/3 da aceleração obtida no vetor horizontal.

Por meio dos resultados obtidos, observa-se que as seções A-A', B-B' e C-C' atingiram os fatores de segurança mínimos para as rupturas locais. As análises obtiveram valores satisfatórios para ambas as condições analisadas.

É válido ressaltar que o estéril considerado como fundação da pilha piloto hipotética é composto por filitos e itabiritos depositados de maneira difusa e sem critérios claros que permitam a sua compartimentação. Isto posto, não é possível adotar parâmetros distintos nas análises de estabilidade. Apesar de os bancos dos taludes apresentarem inclinações menores do que as que são normalmente praticadas, as rupturas avaliadas nesse estudo estão associadas à um único parâmetro adotado para esse material.

Ao observar esses resultados, nota-se que o principal impacto nos fatores de segurança obtidos é reflexo da geometria proposta para a estrutura, ou seja, a sua altura e a inclinação dos seus espaldares. Esse fato indica que as dimensões e as características técnicas desse depósito podem ser majoradas a fim de reduzir o rebatimento do arranjo sem favorecer o aumento de riscos estruturais, permitindo conciliar segurança geotécnica com eficiência operacional.

5 CONCLUSÃO

Verifica-se que com a geometria inicial proposta para o empilhamento temporário de rejeitos, os fatores de segurança requeridos pela NBR 13.028/2017 são atingidos, uma vez que atenderam de forma satisfatória aos valores mínimos preconizados por norma.

Devido à incongruência entre o tempo necessário para dissipar o excesso de poropressão dos rejeitos e a rapidez de construção da estrutura, de forma conservadora, as análises de estabilidade foram avaliadas por meio de parâmetros de resistência não drenada.

A geometria proposta foi definida especificamente para o desenvolvimento desta pesquisa, de maneira que os taludes das seções avaliadas apresentam espaldares de inclinação menos acentuada – vislumbrando, para este fim, a obtenção de fatores de segurança elevados.

Para o desenvolvimento de pesquisas futuras, sugere-se que seja realizado um estudo comparativo entre as análises de estabilidade que considerem arranjos geométricos mais robustos e arrojados, bem como a influência de um rígido controle técnico de compactação. Ainda que essas estruturas sejam depósitos de caráter provisório, essa abordagem permitirá uma avaliação criteriosa na escolha da estratégia mais adequada para a gestão segura e eficiente desses rejeitos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília e ao CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos: NBR 13028. Rio de Janeiro, 22p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). Solo – Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia: NBR 7185. Rio de Janeiro, 8p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2020). Solo – Ensaio de adensamento unidimensional: NBR 16853. Rio de Janeiro, 16p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2020). Solo – Ensaio de Compactação: NBR 7182. Rio de Janeiro, 9p.
- ANM. Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022, com alterações da Resolução ANM nº 130/2023, que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União: Edição 39, Seção 1, Página 69 e suas retificações de forma, Brasília, DF, 27 fev. 2023.

- ASSIS, A. P., HERNANDEZ, H. M. & COLMANETTI, J. P. (2014). Notas de aulas de barragens. Publicação G.AP-AA006/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 125p.
- BEDIN, J. (2006). Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 256p.
- BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial da União: Brasília, DF, 30 de setembro de 2020.
- CASAGRANDE, A. (1936). Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*: 257–275.
- ESPÓSITO, T. J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 394p.
- GERSCOVICH, D. M. S. (2016). Estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- JUNIOR, M. P. S. (2021). Avaliação da susceptibilidade à liquefação de um rejeito silto-arenoso com base em ensaio CPTu. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 109p.
- MORGENSTERN, N. R.; KUPPER, A. A. G. (1988). Hydraulic fill structures - A perspective. In: VAN ZYL, D. J. A.; MCK. S. G. (Org.), ASCE. Fort Collins. Colorado: Proceedings of a specialty conference on hydraulic fill structures. p. 1-31.
- OLSON, S.M. (2001). Liquefaction Analysis of Level and Sloping Ground Using Field Case Histories and Penetration Resistance.
- RIBEIRO, L.F.M. Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 268p.
- ROBERTSON, P.K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – An update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12): 1910–1927. doi:10.1139/cgj-2016-0044.
- ROBERTSON, P.K. FEAR, C. E. WOELLER, D. J. WEEMES, I. (1995). Estimation of sand compressibility from seismic CPT. Conference: 48. Canadian geotechnical conference, Vancouver (Canada), 25-27 Sep 1995; Other Information: PBD: 1995; Related Information: Is Part Of Trends in geotechnique; PB: 2 v. p.
- ROBERTSON, P.K. (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(6): 842–853. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000286.
- SLADEN, J.A., D’HOLLANDER, R.D., and KRANHN, J. (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(4): 564–578. doi: <https://doi.org/10.1139/t85-076>.
- SOUSA, G.M. (2020). Proposta de metodologia para lavra de barragens de rejeitos de ferro construídas pela técnica de aterro hidráulico. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 420 p.
- SOUZA, T. C. (2018). Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito: uma abordagem probabilística. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 293p.
- VALE S.A. (2021). Governança de Projetos Geotécnicos de Ferrosos – Processos, Papéis e Responsabilidades: PGS-004256. Diretoria de Geotecnia Corporativa.

VALE S.A. (2021). Vale +: Minas Gerais – Resultados em 2021 – Eliminação de barragens avança em Minas Gerais. Gerência de Comunicação Regional de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Portos do Sul.