

Análise de Estabilidade de Pilha de Rejeito de Minério de Ferro

Fernanda Ferrante

NAMISA, Ouro Preto - MG, Brasil, fernanda.ferrante@csn.com.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar

IFCE / UNIFOR, Fortaleza - CE, Brasil, marcosfpa@hotmail.com

Eduardo Pena Carvalho

NAMISA, Ouro Preto - MG, Brasil, eduardocarvalho@csn.com.br

Fernando Luiz Drumond Goncalves Cota

NAMISA, Ouro Preto - MG, Brasil, fernando.drumond@csn.com.br

RESUMO: O presente trabalho trata de análise de estabilidade de uma pilha de rejeito de minério de ferro formada através do material descartado da planta de beneficiamento e inicialmente disposto em barragem. Devido a capacidade limitada de disposição de rejeito em barragens de contenção, há a necessidade de dispor o resíduo de uma forma alternativa, desta maneira este material é removido da barragem, a medida que são gerados os rejeitos, e por sua vez o material é empilhado. Neste estudo foi analisado um empreendimento cuja capacidade de estocagem de rejeito de mineração, pelo método de barragem de contenção, encontrava-se limitada, havendo a necessidade de buscar um novo método, mais operacional, seguro e sustentável. Para a geração de dados para as análises de estabilidade da pilha, formada por rejeito de mineração, analisou-se uma campanha de investigação geotécnica e, também, resultados de ensaios de laboratório para caracterização geomecânica do material. Então, identificou-se o método construtivo da pilha, a metodologia de manuseio do rejeito e foram realizadas as análises de estabilidade utilizando o método de Bishop simplificado (BISHOP, 1955). Com os resultados, observou-se que a estrutura comprovou condições estáveis para operação, apresentando fator de segurança superior ao mínimo de referência conforme ABNT (2006). Considerando os métodos de construção das pilhas de rejeito, os métodos de monitoramento utilizados nas estruturas analisadas neste artigo, as características geomecânicas do rejeito de mineração e as condições de estabilidade da pilha encontradas, este estudo pode servir de base para alternativas no sistema de gerenciamento de rejeito em empreendimentos cuja capacidade de estocagem de rejeito encontra-se limitada.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de Mineração, Pilha de Rejeito, Estabilidade de taludes.

1 INTRODUÇÃO

Rejeito de mineração é todo o material resultante de processos químicos e físicos envolvidos na extração dos metais (ARAÚJO, 2006).

A definição de rejeito está estritamente relacionada com a situação do mercado de mineração e também com as tecnologias de processamento mineral. Os materiais que antes eram descartados como rejeito, por não possuir teor do mineral minério compatível com o

mercado ou mesmo pelo fato de não possuir a tecnologia para beneficiamento em épocas passadas, hoje, devido a tecnologia e abertura do mercado de mineração, o mesmo material descartado pode ser visto como um minério de aproveitamento econômico.

Os minerais que são descartados do processo de beneficiamento, por não possuírem teor ou granulometria adequados, são caracterizados como rejeitos. São materiais fabricados cujas propriedades dependem, num primeiro

momento, das características de beneficiamento e do tipo de mineral lavrado. Posteriormente estas propriedades passam a ser afetadas também pelo modo da sua disposição final (LIMA, 2006). Inerente à atividade de mineração, está a geração de enorme quantidade de rejeitos. Desta forma, as mineradoras necessitam, em seu planejamento a longo prazo, incorporar ao seu plano diretor alternativas de disposição de rejeitos de forma mais segura e econômica. Além disso, barragens de rejeito são estruturas geotécnicas que devem permanecer estáveis por períodos de tempo muito longos, normalmente maiores que a própria vida útil da mina (ARAUJO, 2006). O redimensionamento das operações vai desde a etapa inicial de lavra do minério, seu processamento mineral nas usinas de tratamento de minério, a logística para o escoamento da produção bem como o processo de descarte do material que não possui valor agregado (rejeito).

Quanto aos métodos construtivos de barragens de rejeitos, construídas por alteamentos sucessivos, três tipos clássicos podem ser citados: Método de Montante, Método de Jusante e Método de Linha de Centro. O Método de Montante é considerado o mais econômico e de maior facilidade executiva. Entretanto, neste caso, apesar das vantagens apresentadas e da necessidade de menores áreas para disposição, estas estruturas, principalmente quando alteadas com o próprio rejeito do processo, merecem maior controle no acompanhamento durante a etapa construtiva, uma vez que apresentam algumas desvantagens relacionadas à dificuldade de controle da superfície freática, susceptibilidade ao piping, maior propensão a processos erosivos nas superfícies e probabilidade de liquefação (ESPÓSITO, 2000).

O objetivo deste estudo é analisar a estabilidade de pilha formada através de rejeito de minério de ferro.

Os objetivos da análise da estabilidade de taludes são:

- definir a segurança à ruptura de taludes existentes;
- definir geometrias que garantam condições de segurança satisfatórias em aterros e escavações;
- avaliar, diagnosticar e recuperar taludes.

Em geral, os estudos de estabilidade de

taludes seguem a seguinte metodologia (GERSCOVICH, 2012):

- definição da topografia do talude;
- definição das sobrecargas a serem aplicadas sobre o talude, caso existam;
- execução das investigações de campo para definir a estratigrafia e identificar os elementos estruturais eventualmente enterrados na massa e os níveis freáticos;
- definição das condições críticas do talude, considerando diversos momentos da vida útil da obra;
- definição dos locais de extração de amostra indeformada; realização de ensaios de caracterização, resistência ao cisalhamento e deformabilidade (para estudos de análise de tensões);
- análise dos resultados dos ensaios para definir os parâmetros de projeto;
- adoção de métodos de dimensionamento para a obtenção do fator de segurança ou das tensões e deformações.

Dentre os diversos métodos de verificação de segurança de taludes por equilíbrio limite, o de Bishop simplificado (BISHOP, 1955) apresenta acurácia satisfatória, sendo adequado somente para superfícies de deslizamento circulares. Esse método satisfaz condições de equilíbrio de forças verticais e momentos globais, considera que as forças laterais nas fatias são horizontais e apresenta o número de incógnitas maior que o de equações ($n+1$).

2 ESTUDO DE CASO

Para o estudo, analisou-se uma empresa de mineração que tem suas operações de mineração alocadas no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, que explora minas, classifica, beneficia e exporta o minério de ferro. Entre suas operações, a empresa realiza recuperação de rejeito das barragens e beneficia através de concentração magnética gerando o produto concentrado, que também é exportado.

As operações de mineração são feitas no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, onde a Empresa explora diversas minas de minério e possui instalações de processamento de minério estrategicamente localizadas. A empresa também conta com uma rede de logística

estruturada, composta de ferrovia e porto para escoamento de sua produção para o mercado internacional de minério de ferro.

O empreendimento possui duas barragens que foram construídas para disposição de rejeitos originados do processo de beneficiamento do minério de ferro. Desta forma as estruturas desempenham função de retenção, clarificação dos efluentes e recirculação de água para as plantas de beneficiamento.

Devido a capacidade de estocagem de rejeito de mineração, pelo método de barragem de contenção, encontrar-se limitada, houve a necessidade de buscar um novo método mais operacional, seguro e sustentável.

Desta forma, a empresa optou por remover o rejeito da Barragem e dispor em pilhas, com o objetivo de desaguar esse rejeito e em um segundo momento retornar com o material para o processo de beneficiamento.

Além da recuperação deste rejeito antes descartado em Barragens, o empilhamento visa a maior segurança e sustentabilidade do empreendimento.

As operações de remoção do material da bacia são feitas através do uso de equipamentos de carga como retroescavadeiras. Com essa característica o material pode ser carregado, transportado e empilhado em uma área intermediária. O objetivo desse empilhamento é reduzir a umidade e controlar o processo de disposição de forma a possibilitar retomada futura.

Atualmente a Unidade possui duas pilhas de rejeito, denominadas Pilha 1 e Pilha 2A. Para este estudo foi analisado a estabilidade da Pilha 2A (Figura 1).



Figura 1. Foto da pilha de rejeito analisada.

2.1 Metodologia

Desta maneira, a metodologia desenvolvida consistiu basicamente de três etapas, citadas a seguir.

- Apresentação da campanha de investigação geotécnica dos materiais.
- Apresentação dos resultados de ensaios de laboratório.
- Análises de estabilidade da estrutura.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

São abordados, a seguir, as investigações e ensaios de laboratórios para identificação e obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento e permeabilidade do material da Pilha 2A, assim como sua análise de estabilidade.

3.1 Campanha de investigação geotécnica dos materiais

O programa de investigação compreendeu:

- Sondagens para definição do modelo geológico-geotécnico e hidro-geotécnico dos rejeitos depositados nos reservatórios das barragens e que são utilizados para formação das pilhas;
- Amostragens e ensaios especiais nos rejeitos das praias para definição dos parâmetros de resistência, permeabilidade e deformabilidade representativos;
- Comportamento geotécnico dos rejeitos.

Foram desenvolvidos estudos geotécnicos que tiveram como base sondagens do tipo mistas e a percussão e amostragem de matérias para ensaios “in situ” e de laboratório. O objetivo destes estudos foi o de obter a caracterização dos materiais utilizados para formação das pilhas de rejeito e os parâmetros geomecânicos de resistência dos mesmos e ainda.

3.2 Resultado de ensaios de laboratório

Nas Tabelas 1, 2 e 3, a seguir, são apresentados os resumos dos resultados dos ensaios de

laboratório.

Tabela 1. Limites de consistência e índices naturais.

Classificação	Tipo de amostra	Limites Atteberg		Condição natural/in situ	
		LL	IP	γ_{Nat}	wNat. (%)
				(kN/m ³)	
Silte Arenoso (Rejeito de minério)	Amostra deformada	-	NP	19,25	0,3
Silte Arenoso (Fundação)	Amostra indeformada	31	9,4	17,21	9,2

Tabela 2. Índices de compactação.

Classificação	Tipo de amostra	Compactação (GC = 98% PN)		Índice vazios/densidades δ				
		γ_s	w ótima	γ_s	γ_s			
		Máx. (kN/m ³)	(%)	Cmax	Cmín.	Máx.	g/cm ³	
Silte Arenoso (Rejeito de minério)	Amostra deformada	24,0	11	0,93	19,2	0,52	24,3	3,701
Silte Arenoso (Fundação)	Amostra indeformada							3,34

Tabela 3. Ensaio de granulometria.

Classificação	Tipo de amostra	Granulometria			
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho
Silte Arenoso (Rejeito de minério)	Amostra deformada	1,1	58,8	39,5	0,6
Silte Arenoso (Fundação)	Amostra indeformada	3,1	68,4	26,7	1,7

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de ensaio de compressão triaxial.

Tabela 4. Ensaio de compressão triaxial.

	Permeabilidade K ₂₀ (cm/s)	C (kPa)	ϕ (°)	C' (kPa)	ϕ' (°)	Condição de moldagem
Silte Arenoso (Rejeito de minério)	5,5x 10 ⁻⁴	44	25	14	32	
Silte Arenoso (Fundação)	1,2x 10 ⁻⁵	1	14	9	30	Indeformada (bloco)

Os parâmetros geomecânicos dos materiais constituintes das pilhas foram determinados com base nos resultados dos ensaios especiais de laboratórios, conhecimento de materiais com características físicas e condições de disposição semelhantes

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros geomecânicos do rejeito.

Tabela 5. Parâmetros geomecânicos do material.

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Permeabilidade k - (m/s)
Rejeito	19	2	30	5,5 x 10 ⁻⁶

3.3 Análise de estabilidade da estrutura

A pilha de rejeito possui altura máxima de 48,7 metros em uma área de ocupação de 14,4 hectares, com 5 metros de altura de banco e 5 metros de largura de berma, ângulo geral do maciço de 19° e ângulo entre bermas variando de 22° a 31°.

Com relação a instrumentação existente na Pilha 2A, esta é composta por piezômetros e indicadores de nível d'água.

É possível verificar na Figura 2 a topografia da pilha juntamente com a localização dos instrumentos (destacadas em azul).

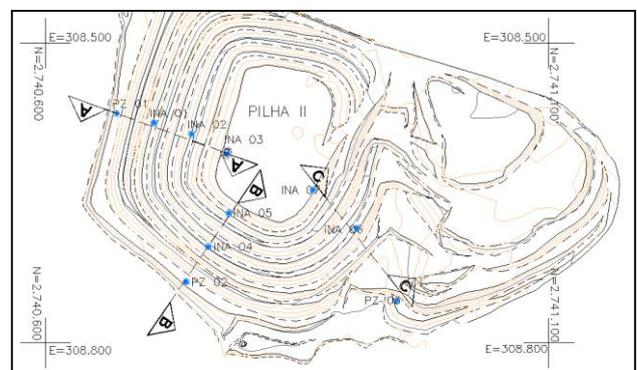


Figura 2. Planta topográfica da Pilha de rejeito denominada 2A – localização da instrumentação de controle.

Com base nas leituras dos instrumentos presentes nas pilhas e dos dados do material, a análise do fator de segurança foi feita baseada no método de Bishop simplificado (BISHOP, 1955), utilizando o Software GeoSlope®.

Na Tabela 6 constam os parâmetros geomecânicos de cada camada das seções descritas nas Figuras 3, 4 e 5, obtidos nos ensaios de laboratório do item 3.2.

Tabela 6. Parâmetros geomecânicos de cada camada.

Seção	Material	Tipo de amostra	γ_{Nat} . (kN/m ³)	c' (°)	ϕ' (°)
Aterro da Pilha	Aterro da Pilha	Amostra Deformada	24	14	32
		(G.C. - 98%)			
Rejeito da Barragem	Rejeito da Barragem	Amostra Deformada	19	2	30
		(E _{max})			
Fundação - Solo Residual	Fundação - Solo Residual	Amostra Indeformada	17	9	30

Nas Figuras 3, 4 e 5 são apresentadas as análises de estabilidade conforme as seções AA, BB e CC respectivamente.

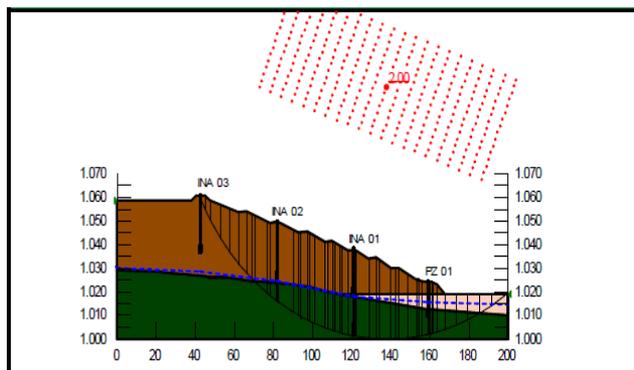


Figura 3. Seção AA – Ruptura crítica – FS=2,0.

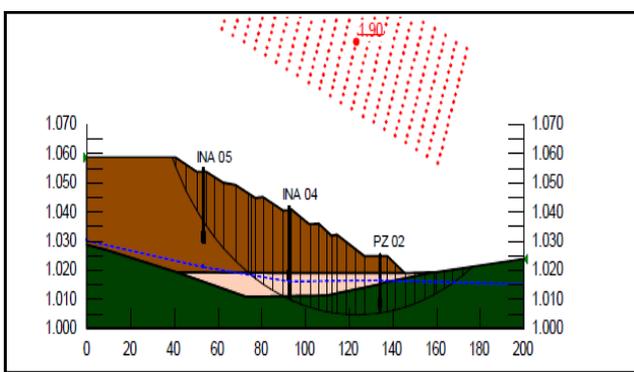


Figura 4. Seção BB – Ruptura crítica – FS=1,9.

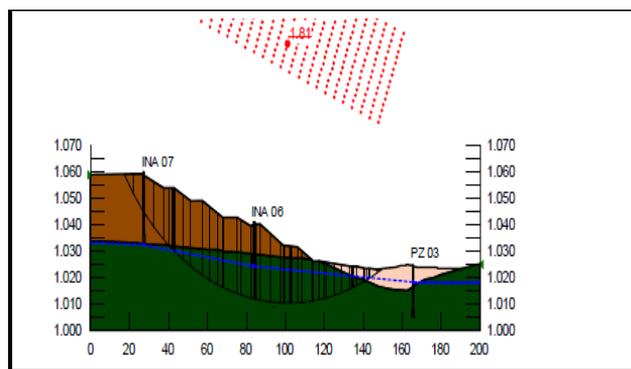


Figura 5. Seção CC – Ruptura crítica – FS=1,81.

De acordo com as análises, a estrutura encontra-se em condições estáveis para operação.

De mesma forma, segue abaixo gráfico com a evolução do fator de segurança no período de Julho a Dezembro de 2014, conforme Figura 6.

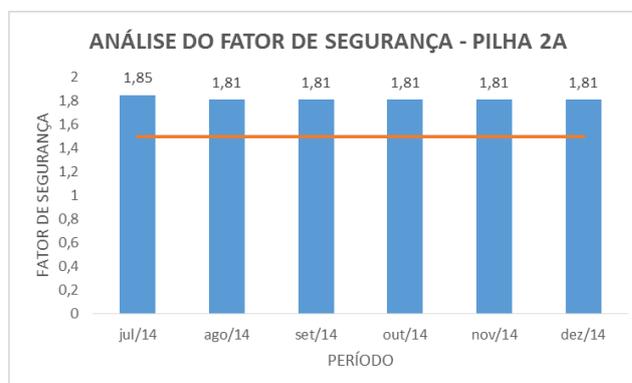


Figura 6. Evolução do fator de segurança no período de Julho a Dezembro de 2014.

Cabe ressaltar que para o controle de estabilidade das pilhas, são executados mensalmente inspeções em campo visualizando os dispositivos de drenagem, ensaios de caracterização e compactação, controle geométrico do empilhamento através de levantamento topográfico e leituras dos instrumentos instalados.

4 CONCLUSÕES

As análises de estabilidade foram realizadas utilizando o método de Bishop simplificado (BISHOP, 1955) e a estrutura mostrou-se em condições estáveis para operação, apresentando fatores de segurança superiores ao mínimo de referência, que é maior ou igual a 1,5.

Considerando os métodos de construção das

pilhas de rejeito, os métodos de monitoramento utilizados nas estruturas analisadas neste estudo, as características geomecânicas do rejeito de mineração e as condições de estabilidade da pilha encontradas, este estudo pode servir de base para alternativas no sistema de gerenciamento de rejeito em empreendimentos cuja capacidade de estocagem de rejeito encontra-se limitada.

REFERÊNCIAS

- Araujo, C.B. (2006). *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação de Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro 133 p.
- Bishop, A., W. (1955). "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes". *Géotechnique*, Vol. 5, N. 1, pp. 7-17.
- Epósito, T.J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 363 p.
- Gerscovich, D. (2012). *Estabilidade de Taludes*. Oficina de textos, São Paulo.
- Lima, L.M.K. (2006). *Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 90 p.