MESTRADO PROFISSIONAL

USO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS NATURAIS EM REGIÕES TROPICAIS

TOBIAS CABRAL CARVALHO MACHADO DE ANDRADE

INVESTIGAÇÃO DE CONDICIONANTES DA ESTABILIDADE DE PILHAS DE MINÉRIO DE FERRO EM SERRA SUL - S11D/VALE

Belém / PA

2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE

TOBIAS CABRAL CARVALHO MACHADO DE ANDRADE

INVESTIGAÇÃO DE CONDICIONANTES DA ESTABILIDADE DE PILHAS DE MINÉRIO DE FERRO EM SERRA SUL - S11D/VALE

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, do Programa de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS).

Orientador: Sérgio Ivan Viademonte da Rosa, PhD.

Belém / PA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A553 Andrade, Tobias Cabral Carvalho Machado de.
Investigação de condicionantes da estabilidade de pilhas de minério de ferro em Serra Sul – S11D/Vale. / Tobias Cabral Carvalho Machado de Andrade - Belém: ITV, 2021.

27 p. : il.

Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável dos Recursos Naturais em Regiões Tropicais) – Instituto Tecnológico Vale, 2021.
Orientação: Dr. Sérgio Ivan Viademonte da Rosa.

1. Condicionantes. 2. Minério de ferro. 3. Software de dados. I. Rosa, Sérgio Ivan Viademonte da. II. Título

CDD 23. ed. 622.752098115

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves / CRB 2 – 525

TOBIAS CABRAL CARVALHO MACHADO DE ANDRADE

INVESTIGAÇÃO DE CONDICIONANTES DA ESTABILIDADE DE PILHAS DE MINÉRIO DE FERRO EM SERRA SUL - S11D/VALE

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, do Programa de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS).

Data de aprovação:

Banca examinadora:

_____

Sérgio Ivan Viademonte da Rosa, Dr.
Orientador - Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS)

_____

Valente José Matlaba, Dr
Membro interno - Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS)

_____

Bruno Duarte Gomes, Dr
Membro externo - Universidade Federal do Pará (UFPA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por ter aceito que eu fizesse meu mestrado, incluindo aulas e dedicação aos estudos, demandando deslocamentos e resultando em tempos de ausência durante algumas semanas.

Agradeço profundamente ao meu orientador, o Professor Doutor Sérgio Viademonte pelas instruções, recomendações e direcionamentos da minha pesquisa, sempre focando em algo que pudesse ser útil à empresa e ao meu desenvolvimento.

Expresso gratidão a todos os Docentes do ITV de Belém pelo preenchimento da minha “caixa de ferramentas” necessária para poder desenvolver a pesquisa de forma mais embasada e fundamentada.

A todos aqueles que trabalham no time de suporte administrativo do ITV direciono o mais cordial agradecimento. Sem eles, certamente, os prazos do cronograma não seriam cumpridos, afetando o desenvolvimento e entrega dos resultados da pesquisa.

Finalizo agradecendo aos meus colegas da Vale SA por terem contribuído com grandiosa empatia para o desenvolvimento dessa pesquisa, fornecendo incondicionalmente recursos que subsidiaram as análises realizadas.

RESUMO

O Complexo S11D Eliezer Batista, ou Serra Sul, localizado na cidade de Canaã dos Carajás, sudeste do estado do Pará, iniciou suas operações no final do ano de 2016, com a capacidade de produção anual de 90 milhões de toneladas de produto de minério de ferro, conhecido como fino comum, um produto granulado com maior tamanho de partícula, ou *top size* de 16 mm e teor de ferro próximo a 65%. A estocagem de produto de minério beneficiado é importante para absorver variações nas etapas de transporte, seja este rodoviário ou ferroviário. Em Serra Sul, as áreas de estocagem abrigam pilhas de fino comum com altura entre 12 e 18 metros. A estabilidade dessas pilhas estocadas em área aberta pode variar, levando a deslizamentos parciais que comprometem a segurança ocupacional e afetam a fluidez do transporte de produto do complexo S11D. O conhecimento das condições que contribuem para a estabilidade de pilhas pode proporcionar maior previsibilidade da firmeza do produto estocado. Na presente pesquisa foram realizadas análises de dados com o objetivo de identificar que variáveis melhor representam a estabilidade de pilhas formadas nos pátios de produto de Serra Sul. Com base nos resultados das análises, soluções tecnológicas voltadas à instrumentação industrial foram propostas para mitigar as ocorrências de deslizamentos de pilhas de minério de ferro.

Palavras-chave: minério de ferro; talude; empilhamento; análise exploratória de dados; tecnologias orientadas a dados.

ABSTRACT

The S11D Eliezer Batista Complex (S11D Complex), also known as South Range iron ore project, is located in the city of Canaã dos Carajás, at the southeast of the state of Pará, North Brazil. The S11D Complex started its operations in 2016. It has annual ore fines production capacity of 90 million tones, producing fines with the top size of 16 mm and average iron grade close to 65%. At the South Range operations, storage areas hold stockpiles with heights between 12 to 18 meters. Piles stability can vary, and the occurrence of stock piles slidings potentially brings safety problems as logistic disruptions. Being aware of conditions that can define pile stability can bring more predictability regarding to stacked product stability. Data analysis has been developed as part of this research project to evaluate the most representative variables, related to stockpile stability conditions at the South Range (S11D). As a result of this research project, the author proposed the allocation of industrial instrumentation procedures to minimize the risk of ore stockpile sliding.

Keywords: iron ore; stockpile; stacking; exploratory data analysis; data driven technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mina de Serra Sul: quatro sistemas IPCC para lavra de minério de ferro. 11
Figura 2 – Usina de Serra Sul com foco no pátio de produto.. 12
Figura 3 – Ilustração da recuperação de minério no pátio de produto de Serra Sul. 13
Figura 4 – Vagões carregados no silo de carregamento ferroviário de Serra Sul.. ..13
Figura 5 - Complexo S11D. 14
Figura 6 - Os quatro pátios de produto de Serra Sul 15
Figura 7 - Desmoronamento de pilha de minério no pátio de produto. 16
Figura 8 – Exemplos de navios que adernaram devido à liquefação de carga.....17
Figura 9 – Esquemas ilustrativos dos métodos de empilhamento. 22
Figura 10 - Pluviometria mensal nos anos de 2017 e 2018. 23
Figura 11 – Parte da planilha de controle de qualidade, base do estudo. 24
Figura 12 – Parte da planilha de registro de pluviosidade na usina de Serra Sul.....25
Figura 13 – Esquema ilustrativo para classificação de pilha como instável.....28
Figura 14 – Distribuição das variáveis nas duas principais componentes. 36
Figura 15 – Distribuição das observações entre as duas principais componentes...37
Figura 16 – Intervalo de confiança para os escores das componentes. 38
Figura 17 – Sistema de drenagem superficial no pátio B no porto.. 40
Figura 18 – Padrão de cargas em porões de navio. 41
Figura 19 – Utilização de analisador de granulometria portátil em Serra Sul. 43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação de qualidade do produto final de Serra Sul (Fonte: EPS-000245). 12
Tabela 2 – Resultados dos testes de normalidade univariada. 29
Tabela 3 – Pontos discrepantes por variável. 30
Tabela 4 – Resultados das correlações de Spearman 31
Tabela 5 – Análise de Componentes Principais (parte 1). 33
Tabela 6 – Análise de Componentes Principais (parte 2). 34
Tabela 7 – Análise de Componentes Principais. 35
Tabela 8 – Teste da estabilidade para as 4 principais componentes. 38
Tabela 9 – Estabilidade em função das duas componentes principais PC1 e PC2. . 39

LISTA DE SIGLAS

DMT – distância média de transporte;

PPC – perda por calcinação;

FCSS – fino comum de Serra Sul;

IPCC – in pit crushing and conveying;

MSR – mobile sizing rig;

MCR – mobile crushing rig;

Mt – milhões de toneladas;

Mtpa – milhões de toneladas por ano;

PCA – análise de componentes principais;

PC – componente principal;

TML – *transportable moisture limit*.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA 18
3 JUSTIFICATIVA 19
4 REVISÃO DE LITERATURA 20
5 OBJETIVOS 22
6 MATERIAIS E MÉTODOS 22
7 DETALHAMENTO DAS ETAPAS E RESULTADOS 30
8 DISCUSSÃO 40
9 CONCLUSÃO 43
REFERÊNCIAS 45

1 INTRODUÇÃO

Na cidade de Canaã dos Carajás, sudeste do estado do Pará, iniciaram em 2016 as operações de um dos maiores empreendimentos minerários do mundo: o Complexo Eliezer Batista ou S11D ou Serra Sul. Este empreendimento, composto por mina e usina objetiva a produção anual de 90 milhões de toneladas de fino comum, um produto de minério de ferro granulado (SILVA & MACEDO, 2019). O fino comum consiste no produto único do S11D e tem as especificações típicas de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - Especificação de qualidade do produto final de Serra Sul.

Componente	Concentração p/p (%)
Ferro	65,10
Sílica	2,30
Alumina	1,60
Fósforo	0,05
Manganês	0,35
Umidade	9,00
PPC	2,30
+ 19 mm	0,00

Fonte: EPS-000245, Vale (2016).

Para a produção do fino comum de Serra Sul (FCSS), o minério de ferro, de natureza hematítica (Fe_2O_3), é lavrado em uma mina a céu aberto utilizando-se de escavadeira em conjunto com um britador móvel sobre esteiras. A utilização de caminhões se dá para as tarefas auxiliares e complementares, objetivando a redução da distância média de transporte (DMT) no processo de lavra. A esta tecnologia de lavra se dá o nome IPCC – *In pit crushing and conveying*, ou britagem e transporte dentro da cava. O britador primário de rolos dentados (MSR – *mobile sizing rig*), situado na frente de lavra, gera um *top size* de 350 mm depois da fragmentação. Deve-se controlar a abertura ou *gap* entre vales e concavidades dos dentes como medida de controle do tamanho máximo de partícula. Para mineral compacto ou mineral estéril, que não possuem teores de ferro economicamente viáveis, é utilizado na etapa inicial de fragmentação, um britador de mandíbulas, o MCR (*mobile crushing rig*). Os

produtos das britagens primárias em cada um dos quatro sistemas de lavra alimentam uma casa de transferência (artifício que possibilita a mudança de direção dos transportadores de correia) que direciona para o empilhamento de estéril via *spreader* móvel, um grande equipamento de empilhar minério, ou para a pilha pulmão, uma pilha de minério capaz de absorver pequenas instabilidades de fornecimento da mina (figura 1).

Figura 1 - Mina de Serra Sul: quatro sistemas (S1, S2, S3 e S4).

Fonte: elaborado pelo autor, (2021).

Da pilha pulmão, o minério é alimentado por alimentadores de sapata (esteiras) ao transportador de correia de longa distância, que supre o segundo estágio de britagem[1].

Peneiras do tipo banana têm certa curvatura e inclinação, objetivando atingir altas taxas de processamento de minério, mesmo com grande concentração de finos, sem perder a eficiência de peneiramento (OLSEN, 2014). Na britagem secundária há seis peneiras banana onde o *oversize*, ou a fração retida nas peneiras, é destinado gravitacionalmente para seis britadores cônicos. O *undersize*, ou o passante pela malha das peneiras, e o produto dos britadores cônicos compõem o produto da

[1] É um processo de fragmentação que sucede a britagem primária realizada dentro da mina, com o processo de lavra móvel (Descritivo de Processo do S11D, 2019).

britagem secundária e, com *top size* de 110 mm, são empilhados por intermédio de empilhadeiras basculáveis (mudam a inclinação da lança durante o empilhamento) no pátio de regularização. Há também a opção de *by pass* para as usinas de classificação. Qualquer linha da britagem secundária tem a possibilidade de empilhar em qualquer um dos três pátios de regularização disponíveis (SILVA & MACEDO, 2019).

O minério em cada um dos três pátios de regularização é recuperado com retomadoras do tipo ponte para os prédios de classificação. Deve ser configurada, antes do início da operação das recuperadoras, a condição na qual se deseja iniciar a retomada, levando em consideração as características do *blend* de minério empilhado (mistura de diferentes litotipos de minério) e a produtividade desejada. É oportuno citar que há a possibilidade de retomada do minério de qualquer pátio para qualquer um dos três prédios da classificação existentes.

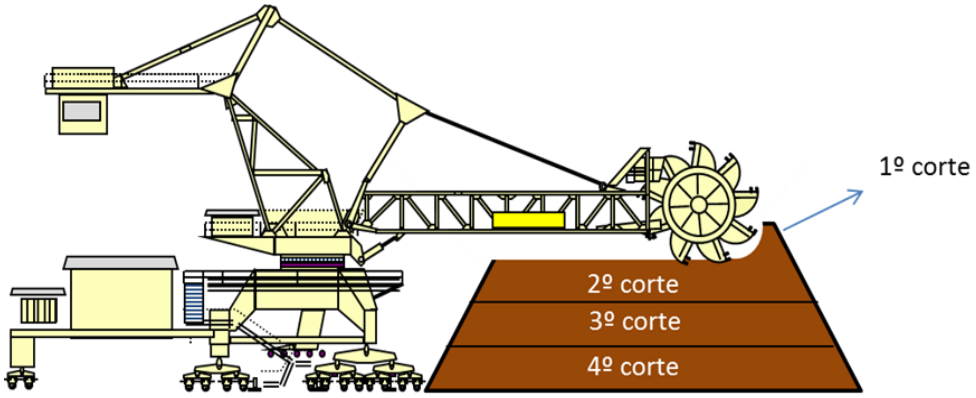
Os três prédios de classificação possuem dez peneiras modulares cada um. O *oversize* das peneiras é transportado por correias até o prédio de britagem terciária em circuito fechado com o referido prédio de classificação. Em cada um dos três prédios de britagem terciária há quatro britadores cônicos que descarregam o produto da fragmentação no mesmo transportador de minério recuperado do pátio de regularização, destinado ao prédio da classificação. O *undersize* das peneiras, por sua vez, tem *top size* de 16 mm e pode ser empilhado em cada um dos quatro pátios de produto (figura 2) ou seguir direto para o carregamento de vagões, via *by pass* (SILVA & MACEDO, 2019).

Figura 2 – Usina de Serra Sul com foco no pátio de produto

Fonte: Descritivo de processo do S11D/Vale, (2019).

Quando nos pátios, o minério é recuperado em três ou quatro cortes (divisão da altura das pilhas – vide figura 3) por recuperadoras de roda de caçamba para destinação do produto final ao carregamento de vagões. O S11D só beneficia minério gerando um produto, o fino comum com *top size* de 16 mm, denominado Fino Comum de Serra Sul – FCSS.

Figura 3 – Ilustração da recuperação de minério no pátio de produto de Serra Sul.



Fonte: elaborado pelo autor, (2021).

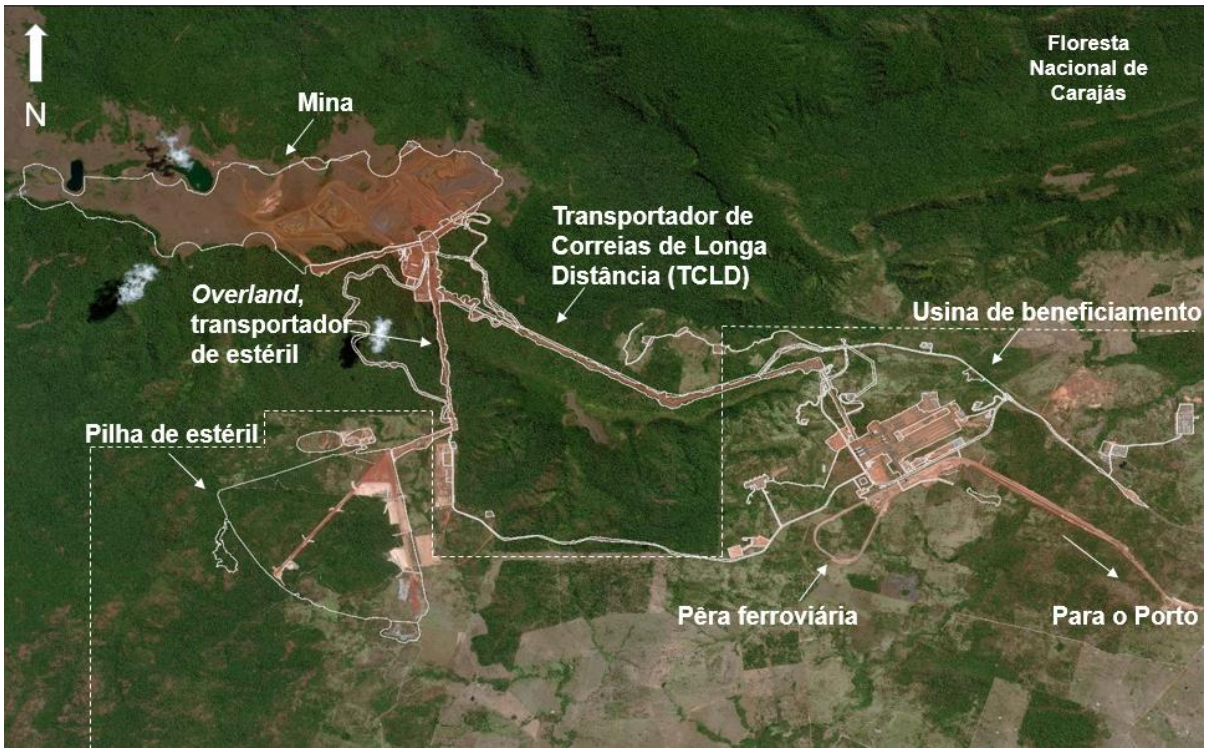
Para a expedição ferroviária de minério, o S11D conta com dois silos de carregamento, essencialmente volumétricos, onde os vagões são carregados (figura 4) baseando-se no volume de minério despejado. Cada silo é capaz de carregar uma composição ferroviária com 330 vagões em menos de três horas, sendo a instalação de carregamento do S11D suficientemente adequada para o carregamento de, em média, oito composições por dia (SILVA & MACEDO, 2019).

Figura 4 – Vagões carregados no silo de carregamento ferroviário de Serra Sul.

Fonte: elaborado pelo autor, (2021).

A figura 5 é uma imagem de satélite com todo o empreendimento Serra Sul.

Figura 5 - Complexo S11D.



Fonte: Relatório do Plano diretor do S11D/Vale, (2015).

Explicada a dinâmica de processo produtivo do fino comum de Serra Sul, é essencial frisar que o objeto de estudo se limita às pilhas de minério estocadas nos

pátios de produto. São quatro pátios de produto com capacidade total de estocagem que varia de acordo com a estação do ano. Durante o período chuvoso, com a formação de pilhas com altura máxima de 12 m, aproximadamente 1,3 milhões de toneladas podem ser estocadas nos pátios. No período seco, por sua vez, formando pilhas com altura máxima de 16 m, podem ser estocadas aproximadamente 2,3 milhões de toneladas de fino comum. Vale destacar que, inicialmente (2017), eram formadas pilhas com até 18 m de altura, o que diante das instabilidades de algumas pilhas gerou efeitos nocivos à integridade dos ativos, além do risco às pessoas. Formar pilhas com altura reduzida foi uma medida visando aumentar a proteção das pessoas e equipamentos contra os possíveis deslizamentos de pilhas, mais comuns na estação chuvosa (Plano de chuva 2019-2020 / Vale). A figura 6 é uma fotografia, obtida pelo autor, da área dos pátios de produto de Serra Sul.

Figura 6 - Os quatro pátios de produto de Serra Sul

Fonte: elaborado pelo autor, (2021).

O aumento da previsibilidade da estabilidade das pilhas estocadas pode fazer com que o limite de altura máxima das pilhas seja aumentado e, por consequência, aumente também a capacidade de estocagem de fino comum nos pátios de produto de Serra Sul, uma vez que os limites atuais foram estipulados de maneira conservadora, apenas se baseando em histórico sem um trabalho aprofundado com dados. Logo, com obsessão por segurança, a Vale tem formado pilhas nos pátios com alturas inferiores às adequadas para a utilização melhorada das áreas de estocagem (Plano de chuva 2019-2020 / Vale, 2019).

2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

As pilhas de minério (produto final – fino comum) estocadas no pátio de produto podem vir a ter sua estabilidade reduzida, levando a desmoronamentos parciais (deslizamentos de face de pilha), afetando a sustentabilidade e continuidade do negócio Serra Sul. Esses desmoronamentos são ocasionados por algumas condições, que são objeto de estudo desse projeto de mestrado. Nos anos de 2017 e 2018, ocorreram dezesseis desmoronamentos grandes e outros vários menores que tiveram consequências nocivas aos equipamentos situados nos pátios de estocagem, demandando paradas para reparos e restabelecimento das atividades operacionais (Plano de chuva 2019-2020 / Vale, 2019). Na figura 7 segue um registro fotográfico, feito pelo autor, de uma ocorrência de desmoronamento em 22 de fevereiro de 2018.

Figura 7 - Desmoronamento de pilha de minério no pátio de produto

Fonte: elaborado pelo autor, (2021).

As ocorrências de desmoronamentos poderiam ser reduzidas se houvesse uma previsibilidade da estabilidade das pilhas formadas nos pátios. A caracterização da estabilidade da pilha poderia contribuir para a mitigação do problema de desmoronamento recuperando-se com o uso de recuperadoras de roda de caçambas as pilhas com menor estabilidade, direcionando o fino comum prontamente para o silo de carregamento ferroviário. Neste caso, para não se caracterizar como uma “transferência de problema”, um registro formal é entregue ao cliente, ou seja, ao pessoal das operações portuárias em São Luís.

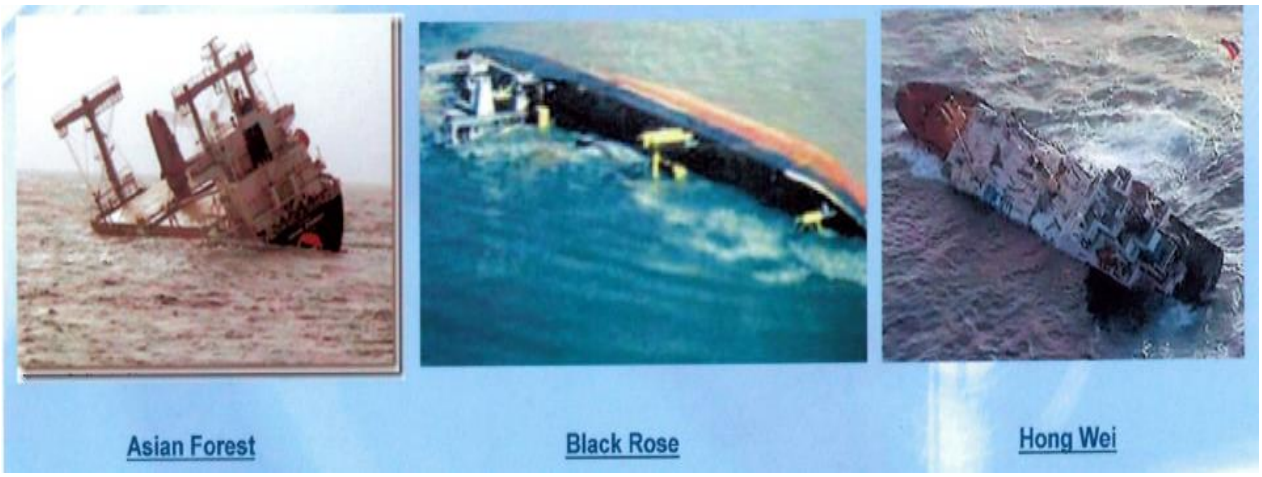
3 JUSTIFICATIVA

Instabilidades de pilhas de minérios levam à redução da segurança ocupacional dos trabalhadores que necessitam realizar intervenções nos transportadores de correia às margens dos pátios de estocagem ou simplesmente realizar inspeções de área.

Adicionalmente, há o dispêndio financeiro para a execução de reparos nos equipamentos danificados com os desmoronamentos. Para cada desmoronamento, o custo médio de reparo foi de aproximadamente R$ 500.000,00 no ano de 2018 (Base de custeio da manutenção de usina, 2018).

É importante salientar que as pilhas instáveis na mina são transportadas até o porto para expedição ao cliente final. Uma vez sabendo da característica de empilhamento, pode-se prever o comportamento dentro do porão dos navios, quando o acúmulo de água em proporções adequadas à litologia[2], pode levar à liquefação da carga (figura 8). Segundo o IMSBC Code (2009, item 1.7.5), “Cargas que podem se liquefazer são cargas que contêm uma certa proporção de partículas finas e uma certa quantidade de umidade. Elas podem se liquefazer se embarcadas em excesso do seu limite de umidade transportável (TML)”.

Figura 8 – Exemplos de navios que adernaram devido à liquefação de carga.



Fonte: Relatório de dados técnicos de riscos de liquefação de minérios - Vale, (2019).

[2] Segundo Sareyed et al. (2018), é necessário realizar um controle de TML onde é apurado o valor de umidade da carga objetivando garantir que esta seja inferior ao limite máximo para risco de liquefação (estado sólido se convertendo ao estado líquido). O TML é determinado através de testes físicos de laboratório.

Portanto, a pesquisa desenvolvida nessa dissertação de mestrado visa prover uma maior previsibilidade sobre a estabilidade das pilhas formadas em Serra Sul (objetivo geral), melhorando o processo de tomada de decisão operacional, e contribuindo para a redução das ocorrências de eventos de desmoronamentos de pilhas (objetivos específicos).

4 REVISÃO DE LITERATURA

A origem do estudo da estabilidade de taludes e encostas se deu com a geotecnia, nos processos de cortes e aterros (CAPUTO; 1988). A execução de cortes nos maciços pode condicionar movimentos de massa ou, mais especificamente, escorregamento de taludes, desde que as tensões cisalhantes ultrapassem a resistência ao cisalhamento dos materiais, ao longo de determinadas superfícies de ruptura (OLIVEIRA; 1998). Atualmente, o estudo da estabilidade de pilhas de minério é frequentemente abordado por instituições de pesquisa e/ou empresas e corporações. No entanto, a maior parte dos estudos é voltada ao empilhamento de *pellet feed* ou, até mesmo, de rejeito de minério de ferro (FERRANTE; 2016). Para fino comum, são escassas as publicações apresentando estudo de casos e soluções para o problema de instabilidade de pilhas.

Segundo Gama et al. (2014), as pilhas de estocagem apresentam em certos momentos uma estabilidade temporária, porém, mesmo após a formação, estas pilhas são instáveis e as partículas estão sempre em movimento. Sendo isso verdade, se constitui como tarefa da equipe operacional controlar a rotatividade das pilhas nos pátios de forma a reduzir a probabilidade de colapsos. Atualmente é realizado o rastreamento das pilhas dos pátios.

Segundo Aragão et al. (2011) é válido obter a classificação das pilhas de estéril visando melhorar a gestão de pilhas. O sistema de classificação desenvolvido por Aragão et al. (2011) demonstrou ser uma ferramenta muito útil na avaliação de todas as fases da vida de uma pilha de estéril, sendo de fácil interpretação e utilização. Apesar de ser foco desse trabalho as pilhas de minério, ter ciência das ferramentas e técnicas utilizadas para a gestão das formações minerais estéreis pode ser válido no estabelecimento dos métodos de investigação, bem como interpretação dos resultados obtidos.

Segundo Carvalho (1991), os deslizamentos de massas têm as seguintes classificações:

- Escorregamento devido à inclinação do talude: ocorrem quando a inclinação do talude excede aquela imposta pela resistência ao cisalhamento do maciço e nas condições de presença de água. Para este estudo, considera-se o ângulo de repouso das pilhas como o ângulo do talude. Este ângulo varia de acordo com diversas características do minério como distribuição granulométrica, umidade e caracterização litológica. A variável ângulo de repouso não foi analisada neste estudo por ser uma medição impraticável considerando os recursos disponíveis.
- Escorregamento por descontinuidade: ocorre devido à transição de diferentes tipos de materiais. Embora não seja tão recorrente, este fato é evidenciado na prática quando uma pilha que, por alguma razão, não foi finalizada foi complementada com minério possuindo outras características físico-químicas.
- Escorregamento por percolação de água: ocorre durante períodos chuvosos, quando a água de chuva percola, elevando o nível do lençol freático ou há saturação de finas camadas de solo. Esse fenômeno foi observado muitas vezes nos pátios de Serra Sul ao longo dos seis meses de precipitação pluviométrica. Quando os taludes interceptam o lençol freático, pode haver erosão interna, podendo contribuir para a falta de estabilidade de pilha (CARVALHO, 1991).
- Escorregamento em aterro: este ponto se refere à consistência da base onde é formada a pilha. As estabilidades de pilhas formadas sobre terreno rochoso ou aterro se diferem. Maciços sobre rochas resistentes têm maior estabilidade. Sobre solos moles, como argila ou minério de canga, deve haver um projeto respeitando especificidades de modo a reduzir a probabilidade de deslizamentos.
- Escorregamentos em massas coluviais: essas massas constituem corpos em condições de estabilidade tão precárias, que pequenos cortes ou pequenos aterros, são suficientes para aumentar os movimentos de solos superficiais, mais ainda em situações de alta pluviometria. Isso é evidenciado quando há falhas no empilhamento, paralisações e repentinos reinícios, principalmente durante chuvas. A precipitação pluviométrica do dia foi uma variável considerada nesta pesquisa.

5 OBJETIVOS

É objetivo geral desta pesquisa investigar e verificar quais são as variáveis que melhor influenciam a estabilidade de pilhas de fino comum de Serra Sul durante os anos de 2017 e 2018.

São objetivos específicos desse trabalho:

- Verificar se existe relação entre pluviometria, altura e estabilidade das pilhas formadas no pátio de produto de Serra Sul.
- Propor soluções tecnológicas que possam contribuir na mitigação do problema de desmoronamento de pilhas de minério de ferro em Serra Sul.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram objetos de estudo dessa pesquisa os fatores relacionados direta ou indiretamente à estabilidade das pilhas de produto, listados a seguir:

6.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO MINÉRIO EMPILHADO

Antes de ser empilhado nos pátios de produto, o fino comum é amostrado por uma torre de amostragem seguindo os requisitos da norma ABNT NBR ISO 3082 – Minério de ferro – Procedimentos de amostragem e preparação de amostras, para determinar, de forma representativa, as características químicas e físicas das pilhas de minério.

O minério amostrado é, então, caracterizado no laboratório químico/físico localizado dentro do empreendimento de Serra Sul. Foram avaliadas as influências das seguintes variáveis:

- Concentração de manganês (Mn): por alterar as características de manuseio do minério;
- Concentração de alumina (Al_2O_3): possui natureza fina, podendo alterar a fluidez do minério e, por consequência, a estabilidade das pilhas formadas;
- Percentual de PPC: a perda por calcinação pode estar relacionada diretamente com o conteúdo de minério hidratado (canga) e argilominerais (FERNANDES, 2008);
- Concentração de sílica (SiO_2): altera a dureza do minério e tem fator de correlação negativo com o teor de ferro total no minério (FERNANDES, 2008).

6.2 UMIDADE DO MINÉRIO EMPILHADO

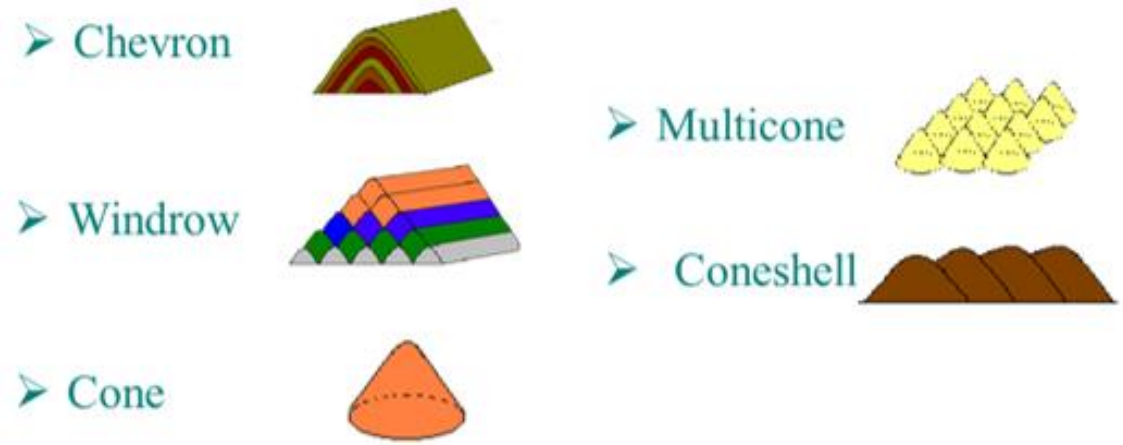
Foi considerada a umidade como uma das variáveis que a alteram a estabilidade das pilhas formadas. O aumento da umidade leva ao aumento da fluidez do minério que está relacionado à redução do ângulo de repouso da pilha (SACRAMENTO, 2012), que por sua vez pode ocasionar o cisalhamento de massa de minério empilhada. Essa foi uma hipótese avaliada neste estudo.

6.3 ALTURA DE PILHA DE MINÉRIO

As alturas das pilhas de minério foram avaliadas como variáveis do modelo. Pode ser que isoladamente a altura não se revele como contribuinte para a estabilidade de pilha, mas, em conjunto com outra variável, como a umidade, por exemplo, pode se relacionar diretamente com a rigidez das pilhas formadas. Por limitações dos equipamentos de empilhamento no pátio de produto, o tipo de empilhamento não será avaliado neste trabalho. Atualmente, as pilhas são formadas somente pelo método Chevron. São conhecidos os seguintes métodos de empilhamento (figura 9):

- Chevron: empilhamento de várias camadas de minério sobre o mesmo eixo de empilhamento;
- Windrow: empilhamento de vários prismas paralelos;
- Cone: consiste no empilhamento de cones simples;
- Multicone: empilhamento de pequenos cones distribuídos uniformemente pelo pátio;
- Coneshell: empilhamento de cones completos, com pequenos deslocamentos, formando uma única pilha.

Figura 9 – *Esquemas ilustrativos dos métodos de empilhamento.*



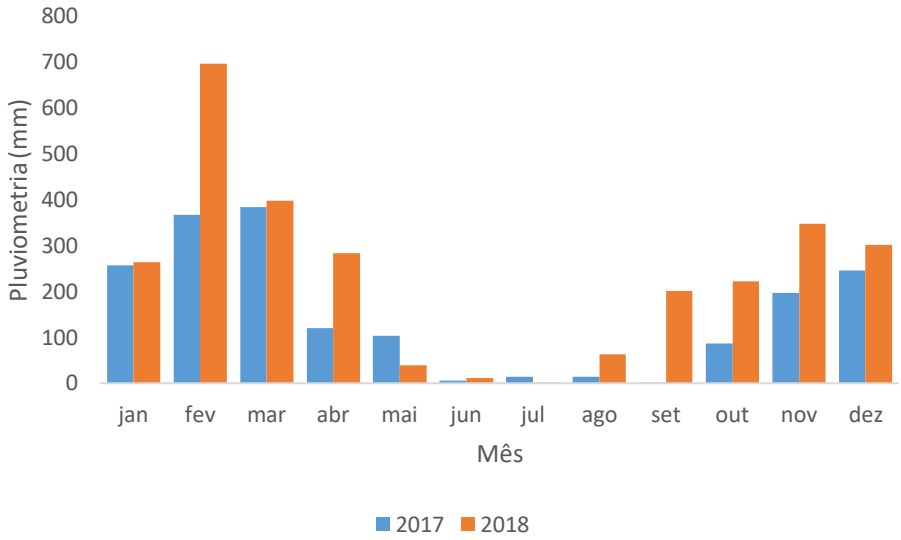
Fonte: PRO-022745 - Manuseio de minério nas operações de lastro, rechego e vias de acesso – Vale, (2019).

6.4 PLUVIOSIDADE DA REGIÃO

Na região sudeste do Pará, são conhecidos, basicamente, dois períodos de pluviosidade: período seco, que vai de maio até outubro e período chuvoso, com permanência entre novembro e abril. É importante explanar que a umidade do minério listada no item 6.2 como umas das variáveis a ser estudada é independente da contribuição pluviométrica medida nos pátios, uma vez que é determinada a partir da análise de amostra coletada em torre de amostragem, etapa anterior ao empilhamento. A pluviosidade é uma contribuição positiva de umidade no minério após o empilhamento e pode ser que afete a estabilidade das pilhas formadas.

A figura 10 ilustra o gráfico da pluviometria da região das pilhas de minério nos anos de 2017 e 2018:

Figura 10 - Pluviometria mensal nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: Dados climatológicos do S11D - Vale, (2017/2018).

De acordo com a figura 10, podem ser constatadas visualmente a separação dos dois períodos distintos (seco e chuvoso). Outra característica que chama a atenção é a precipitação pluviométrica quase duas vezes superior ao mesmo mês do ano anterior em fevereiro de 2018.

6.5 FRAÇÃO GROSSEIRA E FINA NO MINÉRIO

Foram também avaliadas as influências das frações grosseira e fina no minério, ou seja, a concentração mássica das partículas com tamanho superior a 19 mm e inferior a 0,15 mm, respectivamente, na estabilidade das pilhas formadas nos pátios de produto. A concentração e o tipo de formação com diferentes tamanhos de partículas estão relacionados à característica de permeabilidade na pilha, afetando a estabilidade (PEREIRA, 2009).

6.6 DADOS

A metodologia desse desenvolvimento foi um estudo de caso (YIN, 2001), e se baseou na investigação do problema de desmoronamento de pilhas de minérios, fundamentada no levantamento/coleta de dados históricos nos dois primeiros anos de operação de Serra Sul (2017 e 2018). Segue nas subseções o detalhamento da metodologia da investigação.

O estudo realizado usou uma base de dados do empilhamento de FCSS nos pátios de produto do S11D, compreendendo 2017 e 2018. Deste modo, foi possível analisar os dados e determinar dentre as hipóteses levantadas, quais foram as variáveis que mais se relacionaram com a estabilidade das pilhas nos pátios de produto de Serra Sul no período avaliado.

Os dados foram obtidos através do fornecimento de material pelos integrantes das equipes de planejamento de longo prazo, operação de usina e controle de qualidade do complexo S11D da Vale SA (Controle de qualidade do produto de Serra Sul - Vale, 2017 e 2018).

6.6.1 Dados de controle de qualidade

Planilhas com as análises químicas e físicas do produto final (Figura 11), ou seja, do FCSS foram utilizadas como fontes para o desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 11 – Parte da planilha de controle de qualidade, base do estudo.

DATA	Real. - Usina Total (t)			Produção Total Usina Dia										
	Dia	Mês	Ano	Fe	SiO2	P	Al2O3	Mn	PPC	H2O	+19mm	+6,3mm	+1mm	-0,15mm
01/01/2017	33.218	33.218	33.218	66,44	1,47	0,060	0,60	0,080	2,2	5,4	0,36	13,77	46,31	27,58
02/01/2017	40.015	73.233	73.233	66,16	1,30	0,070	0,67	0,069	2,9	6,4	0,58	17,29	48,81	26,78
03/01/2017	59.801	133.034	133.034	65,89	1,14	0,080	0,74	0,058	3,7	7,4	0,80	20,80	51,30	25,99
04/01/2017	57.079	190.113	190.113	65,45	1,00	0,106	0,81	0,055	3,4	7,8	0,50	17,30	51,80	24,50
05/01/2017	16.945	207.058	207.058	64,85	0,88	0,142	1,09	0,050	3,7	7,5	0,50	17,30	51,80	24,00
06/01/2017	25.408	232.466	232.466	65,42	0,94	0,105	0,74	0,050	3,2	7,7	1,74	32,59	59,24	17,82
07/01/2017	45.856	278.322	278.322	65,45	0,94	0,105	0,75	0,051	3,3	7,9	1,74	32,59	59,24	17,82
08/01/2017	52.482	330.805	330.805	65,62	1,15	0,080	0,64	0,065	3,1	8,5	0,93	27,31	54,37	26,48
09/01/2017	8.033	338.837	338.837	65,62	1,15	0,080	0,64	0,065	3,2	8,5	0,93	27,31	54,37	26,48
10/01/2017	0	338.837	338.837	0,00	0,00	0,000	0,00	0,000	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
11/01/2017	0	338.837	338.837	0,00	0,00	0,000	0,00	0,000	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Controle de qualidade do produto de Serra Sul - Vale, (2017).

A planilha com os dados analisados (figura 11) é composta pelo registro das variáveis de controle de qualidade em dois anos de coleta. A primeira coluna é o dia dos registros e as três em sequência representam, respectivamente, a massa de produto empilhada no dia, no mês e no ano, em toneladas. Em azul estão as variáveis de qualidade do FCSS empilhado, expressas em percentual:

- Fe: concentração/teor de ferro;
- SiO_2: concentração/teor de sílica;
- P: concentração/teor de fósforo;
- Al_2O_3: concentração/teor de alumina;
- Mn: concentração/teor de manganês;
- PPC: perda por calcinação;

- H_2O: concentração de água ou umidade do produto final (% p/p);
- + 19 mm: fração com tamanho de partícula superior a 19 mm;
- + 6,3 mm: fração com tamanho de partícula superior a 6,3 mm;
- + 1 mm: fração com tamanho de partícula superior a 1 mm;
- - 0,15 mm: fração com tamanho de partícula inferior a 0,15 mm.

6.6.2. Dados climatológicos

Com relação aos dados pluviométricos, planilhas geradas pelo time de meio ambiente de Serra Sul (figura 12) foram utilizadas como fonte dessa pesquisa. As saídas correspondiam à precipitação pluviométrica do dia, expressa em milímetro (mm).

Figura 12 – Parte da planilha de registro de pluviosidade na usina de Serra Sul.

INDICE PLUVIOMÉTRICO - mm
Estação Climatológica da USINA - S11D - 2018

DATA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	0	OUT	NOV	DEZ
1	0,00	0,25	5,08	33,01	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	7,36
2	0,00	14,73	0,00	3,30	18,54	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,39
3	0,00	77,22	0,00	22,09	0,25	0,00	0,00	1,27	1,01	0,00	0,00	33,52
4	15,74	30,72	1,77	9,39	0,25	0,00	0,00	0,00	14,73	0,00	3,81	3,55
5	0,00	23,11	0,00	13,21	1,78	0,00	0,00	1,01	33,52	0,00	0,00	18,03
6	0,00	173,23	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	12,95	1,77	12,44	1,76
7	18,79	34,54	0,25	0,76	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	38,60	0,50	4,05
8	1,52	1,01	33,52	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	16,50	0,25	79,24	43,18
9	28,44	15,49	4,31	11,43	0,00	1,02	0,00	0,00	0,76	0,00	0,00	11,43
10	27,69	10,66	6,60	0,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	19,56	0,00	14,47

Fonte: Dados climatológicos do S11D 2018 - Vale, (2019)

6.6.3. Altura das pilhas

Os dados desta variável no período analisado foram obtidos a partir da sala de controle de Serra Sul. Os valores das alturas em metros se relacionam diretamente com a inclinação das lanças das empilhadeiras. Uma vez atingida a inclinação máxima, a empilhadeira envia um sinal para os servidores da sala de controle, referenciando pilha concluída. Como procedimento operacional, nenhuma pilha é recuperada se não estiver concluída.

6.7. Metodologia

As seguintes tarefas compuseram esta pesquisa:

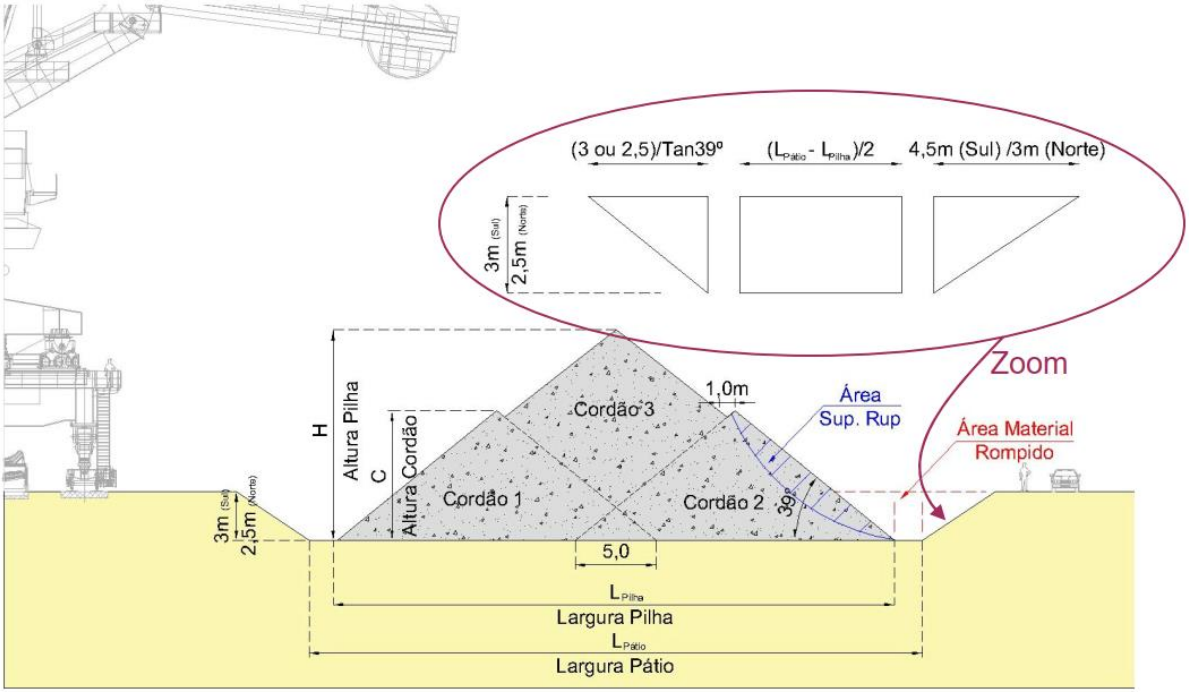
- Coleta dos dados de pluviometria, operação e controle de qualidade;
- Processamento e organização dos dados;
- Criação de um modelo de dados a ser utilizado nas análises;
- Caracterização do minério empilhado no momento dos eventos de desmoronamentos, ou seja, vincular características químicas e físicas às pilhas;
- Realização de análise de dados para identificação das condições de desmoronamento, visando selecionar as variáveis com maior influência nos eventos de desmoronamento. Os dados base estão registrados em uma planilha com 730 linhas, referindo-se a dois anos de registros diários. As variáveis utilizadas nas análises foram as 11 variáveis do controle de qualidade (item 6.6.1), a pluviometria (item 6.6.2), a altura das pilhas (item 6.6.3) e os registros de ocorrências de desmoronamentos, indicando se a pilha era estável ou não.

6.7.1. Avaliação da estabilidade das pilhas

Foi realizada inicialmente a AED (análise exploratória de dados) para inspecionar os dados e verificar possíveis relações teóricas entre as variáveis.

Para a classificação das pilhas formadas nos dias, foi simplesmente adotado o critério binário: estável/instável. Uma pilha é considerada instável se a distância entre a pilha e a berma do pátio é preenchida com minério proveniente de deslizamento. A figura 13 ilustra geometricamente esta premissa.

Figura 13 – Esquema ilustrativo para classificação de pilha como instável.



Fonte: EPS-002918 - Diretrizes geotécnicas para o processo de empilhamento - Vale, (2020).

6.7.3. Análise de componentes principais (PCA)

A proposta da análise de componentes principais ou PCA (*Principal Component Analysis*) é de encontrar um padrão entre as variáveis que justifiquem dimensões ou termos inerentes (HAIR, 2009). Tem como objetivo principal resumir o número de variáveis em componentes que expliquem uma parcela máxima da variação total dos dados, ou seja, perdendo o mínimo de informação. Em resumo, cada componente terá seus escores escritos pela equação 1.

$$C_{ki} = \sum_{j=1}^{13} w_{kj} x_{ij} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde C_{ki} é o escore da componente *k* para a unidade amostral *i*; w_{kj} é o *loading* (peso) da componente *k* para a variável *j* e x_{ij} é o valor amostral *i* da variável *j*.

A utilização dessa análise no trabalho objetivou diferenciar as pilhas estáveis das não estáveis por meio da obtenção de um padrão de variáveis.

7 DETALHAMENTO DAS ETAPAS E RESULTADOS

Nos itens a seguir são descritos as etapas e os resultados das análises estatísticas realizadas sobre a base de dados utilizando-se dos softwares estatísticos IBM SPSS 22, RStudio e Minitab 17. Para melhor se familiarizar com as variáveis, foram realizados testes estatísticos de normalidade e linearidade.

7.1. EXCLUSÃO DE OBSERVAÇÕES

Das 730 observações iniciais na base de dados, sete foram desconsideras, pois apresentaram valores nulos na maioria das variáveis. Das restantes, 75 (10,4%) foram classificadas como pilhas instáveis e 648 (89,6%) como pilhas estáveis.

7.2. NORMALIDADE

Um pressuposto que deve ser verificado é o padrão da distribuição das variáveis da amostra. Na tabela 2 estão presentes os resultados dos testes de normalidade das variáveis pelo método de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk (HAIR, 2009).

Tabela 2 – Resultados dos testes de normalidade univariada.

	Kolmogorov-Smirnov[a]			**Shapiro-Wilk**		
	Estatística	**df**	**Sig.**	**Estatística**	**Df**	**Sig.**
Fe	0,045	723	0,001	0,995	723	0,011
SiO_2	0,084	723	0,000	0,922	723	0,000
P	0,042	723	0,004	0,980	723	0,000
Al_2O_3	0,082	723	0,000	0,937	723	0,000
Mn	0,064	723	0,000	0,928	723	0,000
PPC	0,078	723	0,000	0,977	723	0,000
H_2O	0,032	723	0,078	0,995	723	0,019
+ 19 mm	0,208	723	0,000	0,674	723	0,000
+ 6,3 mm	0,050	723	0,000	0,974	723	0,000
+ 1 mm	0,063	723	0,000	0,968	723	0,000
- 0,15 mm	0,033	723	0,063	0,978	723	0,000
Pluviometria	0,338	723	0,000	0,474	723	0,000
Altura Pilha	0,281	723	0,000	0,808	723	0,000

Fonte: elaborado pelo autor, (2021).
Notas: a. Correlação de Significância de Lilliefors.

Os testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk são dois testes que verificam a normalidade de uma base de dados. A coluna “Estatística” representa o valor da estatística segundo o teste realizado. Foram realizados testes pelas variáveis desse

estudo, numa base com 723 valores para cada, e a confirmação da normalidade se daria caso ambos os testes resultassem em valor de significância superior a 0,05.

Com base nos resultados dos testes de normalidade, ambos demonstraram a inexistência de normalidade dos dados, exceto para H_2O e - 0,15 mm para as quais o teste de Kolmogorov-Smirnov confirmou a normalidade. No entanto, a não normalidade univariada e, por consequência, a multivariada não implica na impossibilidade de realizar análise de componentes principais. Portanto, deve-se ter cautela ao interpretar testes estatísticos cujos valores não seguem uma distribuição normal.

7.3. VALORES DISCREPANTES UNIVARIADOS E MULTIVARIADOS

Outliers ou valores discrepantes podem prejudicar as estimativas e estatísticas que forem obtidas com base na amostra. Para evitar prejuízos nas análises, é necessário avaliar se existem observações atípicas ou discrepantes na amostra que podem levar a interpretações imprecisas.

A Análise de Componentes Principais (PCA) necessita da verificação de forma multivariada, visto que essa técnica trabalha com um conjunto de variáveis. Mesmo ciente desse fato, como forma de verificação e familiarização com a base de dados, foram feitas as análises de valores discrepantes univariados e multivariados (tabela 3).

Tabela 3 – Pontos discrepantes por variável.

	N	Média	Desvio padrão	Ausentes		N de extremos[a]	
				Contagem	Porcentagem	Baixa	Alta
Fe	692	65,6012	0,70344	0	0,0	3	1
SiO_2	692	1,0204	0,24324	0	0,0	0	8
P	692	0,0936	0,02579	0	0,0	0	11
Al_2O_3	692	0,9021	0,21083	0	0,0	0	10
Mn	692	0,0478	0,01957	0	0,0	0	15
PPC	692	3,9079	0,81239	0	0,0	0	0
H_2O	692	7,9736	0,63500	0	0,0	4	1
+19 mm	692	0,1929	0,19837	0	0,0	0	42

+6,3 mm	692	20,1876	3,45474	0	0,0	0	13
+1 mm	692	52,5061	4,73101	0	0,0	1	12
-0,15 mm	692	24,2292	4,13289	0	0,0	1	2

Fonte: elaborado pelo autor, (2021).
Notas: a. Número de casos fora da amplitude (Q1 - 1,5*IQR, Q3 + 1,5*IQR).

De forma univariada, apenas a variável +19 mm apresentou um número elevado de pontos discrepantes, acima de 5% (tabela 4). Mas sabe-se que as variáveis não possuem um comportamento normal e era, de certa forma, esperada essa pequena variação acima do limite. Preferiu-se, então, manter todas as variáveis e realizar a análise multivariada dos pontos discrepantes. Usando a distância de Mahalanobis (Hair et al., 2009), foram detectados um total de 31 observações discrepantes (nível de confiança de 95%), sendo 2 em pilhas instáveis e 29 em pilhas estáveis. Assim, todas essas linhas das 723 unidades foram removidas, ficando um total amostral de 692 registros.

7.4. LINEARIDADE

Este conceito é um requisito para uma técnica da estatística multivariada, como a PCA. A medida de correlação, quando significativa, explica que duas variáveis possuem uma relação linear entre elas. Para a verificação desse pressuposto usou o coeficiente de correlação de Spearman. Essa medida é mais adequada quando a suposição de normalidade não é atendida, o que se adere à classificação da base amostral deste estudo. Para um total de 13 variáveis, foram calculadas 78 correlações bivariadas (resultado da combinação 13 em 2 a 2). Desse total, 66 (84,6%) foram significativas ao nível de 5% bicaudal, sendo que 62 (79,5% do total e 93,9% das correlações significativas a 5%) possuem significância ao nível de 1% bicaudal. Logo o nível de linearidade das variáveis para o estudo pode ser considerado alto. A tabela 4 apresenta os resultados das correlações de Spearman.

Tabela 4 – Resultados das correlações de Spearman

	Fe	*SiO_2*	*P*	*Al_2O_3*	*Mn*	*PPC*	*H_2O*	*+19mm*	*+6,3mm*	*+1mm*	*-0,15mm*	*Pl. (mm)*	*Alt. (m)*
Fe	**1,000**												
SiO_2	0,151	**1,000**											
P	-0,550	-0,392	**1,000**										
Al_2O_3	-0,537	-0,175	0,742	**1,000**									
Mn	0,276	0,311	-0,475	-0,400	**1,000**								
PPC	-0,863	-0,407	0,606	0,510	-0,333	**1,000**							
H_2O	-0,387	-0,061	0,176	0,067	-0,014	0,410	**1,000**						
+19mm	0,082	0,042	0,104	0,089	0,007	-0,065	-0,148	**1,000**					
+6,3mm	-0,519	-0,274	0,589	0,542	-0,224	0,577	0,231	0,303	**1,000**				
+1mm	-0,549	-0,272	0,671	0,617	-0,278	0,578	0,147	0,198	0,862	**1,000**			
-0,15mm	0,714	0,293	-0,546	-0,521	0,262	-0,648	-0,035	-0,021	-0,650	-0,786	**1,000**		
Pl. (mm)	0,131	0,092	-0,014	-0,139	0,073	-0,176	0,125	-0,123	-0,163	-0,183	0,229	**1,000**	
Alt. (m)	0,461	0,281	-0,261	0,021	0,188	-0,456	-0,409	0,345	-0,059	-0,092	0,287	-0,134	**1,000**

Fonte: elaborado pelo autor, (2021).

Com base nos resultados dos testes de Spearman apresentados na tabela 5, os coeficientes de Spearman têm valores entre -1 e +1; quando assume esses valores, a associação negativa ou positiva perfeita, respectivamente. Correlações próximas de zero e significantes são consideradas fracas.

Algumas associações interessantes podem ser obtidas a partir da tabela de coeficientes de Spearman como a relação negativa forte entre o teor de ferro e a perda por calcinação. Pode-se observar também a relação positiva forte entre o teor de ferro com a fração de finos inferior a 0,15 mm. No entanto, não se observou relação forte entre uma variável e a pluviometria ou a altura de pilha.

7.5. RESULTADOS DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Com o tratamento dos dados removendo os nulos (item 7.1) e outliers (item 7.3), para a seguinte análise, têm-se *i* indo de 1 a 692 observações e o *j* indo de 1 a 13 variáveis. As tabelas 5 e 6 apresentam os ajustes dos pesos de cada uma das componentes, depois da utilização da equação 1.

Tabela 5 – Análise de Componentes Principais (parte 1).

Variáveis	**PC1**	**PC2**	**PC3**	**PC4**	**PC5**	**PC6**
Fe	-0,362	-0,180	0,299	0,083	-0,180	-0,053
SiO_2	-0,164	-0,144	-0,541	0,029	0,576	0,289
P	0,359	-0,071	0,233	0,123	0,107	0,078
Al_2O_3	0,323	-0,215	0,074	-0,003	0,389	0,198
Mn	-0,166	-0,016	-0,617	0,005	-0,172	-0,523
PPC	0,369	0,194	-0,154	-0,061	-0,108	0,027
H_2O	0,153	0,373	-0,311	0,413	-0,256	0,443
+19 mm	0,003	-0,512	-0,087	0,374	-0,403	0,177
+6,3 mm	0,356	-0,244	-0,110	0,169	-0,188	-0,108
+1 mm	0,380	-0,221	-0,062	0,045	-0,037	-0,184
-0,15 mm	-0,361	0,059	0,062	0,244	-0,088	0,371
Pluviometria	-0,045	0,176	0,165	0,756	0,381	-0,427
Altura de pilha	-0,137	-0,560	-0,048	0,035	0,119	0,039
Auto Valor	5,174	1,857	1,206	1,053	0,910	0,814
% Var.	39,8%	14,3%	9,3%	8,1%	7,0%	6,3%
% Acum.	39,8%	54,1%	63,4%	71,5%	78,5%	84,7%

O percentual de variância explicada de cada uma das componentes demonstra o quanto foi extraído de informação dos dados. Observou-se que a primeira componente teve um total extraído de 39,8% e a componente de número 13 apenas 0,4%. Ou seja, para resumir o número de variáveis a serem analisadas, usaram-se somente as principais componentes que englobam um percentual aceitável acima de 50% (HAIR, 2009).

Tabela 6 – Análise de Componentes Principais (parte 2).

Variáveis	**PC7**	**PC8**	**PC9**	**PC10**	**PC11**	**PC12**	**PC13**
Fe	-0,075	-0,002	-0,439	-0,061	-0,016	0,353	0,615
SiO_2	0,357	-0,018	-0,145	-0,138	0,173	0,087	0,195
P	-0,165	-0,533	-0,119	-0,008	0,658	-0,120	0,075
Al_2O_3	-0,379	-0,285	-0,038	0,058	-0,640	0,078	0,092
Mn	-0,359	-0,394	-0,063	-0,008	-0,023	0,010	0,004
PPC	-0,134	0,147	0,506	-0,387	0,103	0,413	0,400
H_2O	-0,231	0,182	-0,263	0,381	0,013	-0,013	0,088
+19 mm	0,365	-0,287	0,370	0,162	-0,113	0,069	0,022
+6,3 mm	0,079	0,243	-0,309	-0,505	-0,126	-0,524	0,142
+1 mm	0,117	0,167	-0,377	0,007	0,069	0,614	-0,447
-0,15 mm	-0,263	-0,145	-0,009	-0,610	-0,016	0,124	-0,423
Pluviometria	0,042	0,104	0,160	-0,004	-0,041	0,027	0,020
Altura de pilha	-0,521	0,472	0,204	0,157	0,283	-0,072	-0,039
Auto Valor	0,607	0,444	0,429	0,191	0,180	0,088	0,049
% Var.	4,7%	3,4%	3,3%	1,5%	1,4%	0,7%	0,4%
% Acum.	89,4%	92,8%	96,1%	97,6%	98,9%	99,6%	100,0%

Na tabela 7 são apresentadas as quatro primeiras componentes e seus coeficientes, que extraíram um total de 71,5% da variância, e os valores médios e desvios de cada uma das 13 variáveis do estudo, tanto para pilhas estáveis quanto para pilhas instáveis.

Tabela 7 – Análise de Componentes Principais.

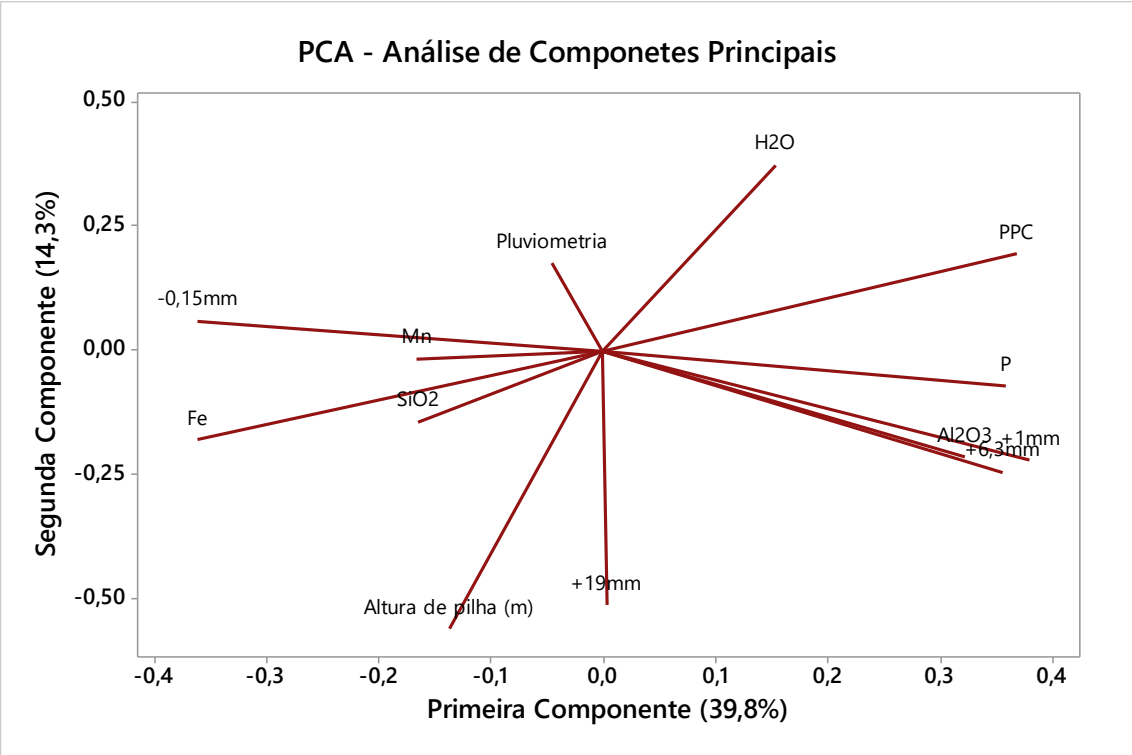
	Coeficientes da PCA				Estável (N = 619)		Instável (N = 73)	
Variáveis	**PC1**	**PC2**	**PC3**	**PC4**	**Média**	**Desvio-padrão**	**Média**	**Desvio-padrão**
Fe	-0,362				65,585	0,717	65,737	0,563
SiO_2			-0,541		1,016	0,247	1,054	0,206
P	0,359				0,095	0,026	0,086	0,022
Al_2O_3	0,323				0,913	0,209	0,814	0,203
Mn			-0,617		0,047	0,020	0,053	0,017
PPC	0,369				3,938	0,825	3,656	0,650
H_2O		0,373	-0,311	0,413	7,941	0,632	8,252	0,597
+19 mm		-0,512		0,374	0,195	0,194	0,174	0,235
+6,3 mm	0,356				20,298	3,461	19,253	3,281
+1 mm	0,380				52,749	4,725	50,446	4,288
-0,15 mm	-0,361				23,999	4,142	26,183	3,516
Pluviometria				0,756	5,339	11,955	8,499	14,427
Altura Pilha		-0,560			16,535	1,590	16,089	1,446
Auto Valor	5,174	1,857	1,206	1,053	-	-	-	-
% Var.	39,8%	14,3%	9,3%	8,1%	-	-	-	-
% Acum.	39,8%	54,1%	63,4%	71,5%	-	-	-	-

Por convenção (HAIR, 2009), coeficientes maiores do que 0,3 ou 0,4 (em absoluto) representam grande correlação entre componente e variáveis (os valores variam entre -1 e 1). Com isso, coeficientes inferiores a 0,3 foram ocultados na tabela 7 para facilitar a interpretação, visto que todos são usados para a criação dos escores de uma componente (equação 1).

Logo, para a componente 1, as variáveis Fe, P, Al_2O_3, PPC, +6,3 mm, +1 mm e -0,15 mm foram as mais significativas, sendo que Fe e -0,15 mm se correlacionando na mesma direção (mesmo sinal) e as demais inversamente. Isso induz a pensar que menores valores de Fe e -0,15 mm e maiores valores das demais variáveis

significativas, produzem maiores escores da componente 1. Note que as médias em pilhas estáveis têm valores mais baixos em Fe e -0,15mm e maiores em Al_2O_3, PPC, +6,3 mm e +1 mm o que poderia ser um indício para a classificação da estabilidade de uma pilha. O gráfico da figura 14 mostra a disposição dos coeficientes em relação às duas principais componentes.

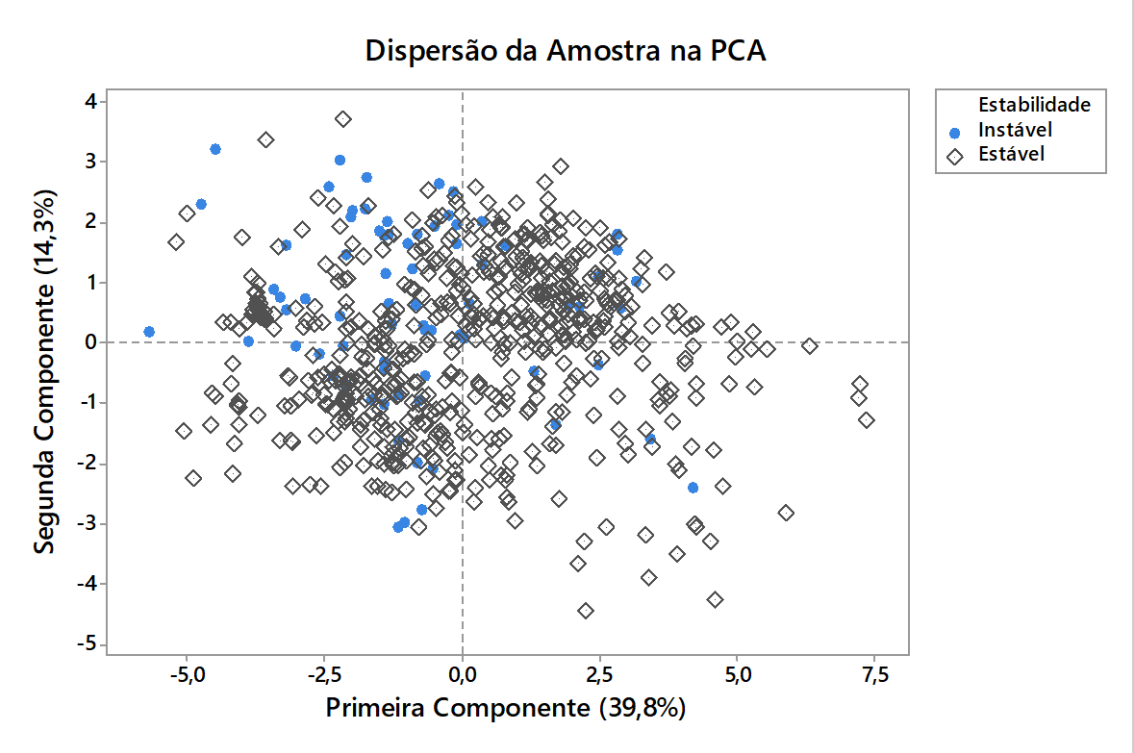
Figura 14 – Distribuição das variáveis nas duas principais componentes.



A componente 2 mostra que +19 mm, altura da pilha e H_2O foram as variáveis mais significativas, contudo as duas primeiras apresentaram coeficiente muito maiores (acima de 0,5). As pilhas instáveis possuem médias de +19 mm e altura menores e apresentam valores altos de H_2O quando se compara com os valores dessas variáveis nas pilhas estáveis.

No gráfico da figura 15, a concentração de pontos das pilhas instáveis está maior para valores menores dos escores da componente 1 e maiores na componente 2. Ou seja, altos valores de Fe e -0,15 mm e baixos valores de Al_2O_3, PPC, +6,3 mm e +1 mm, produzem um escore da componente 1 mais baixo, sinalizando de maneira geral para uma pilha instável. Complementarmente, valores altos de H_2O e menores para altura e +19 mm, o que significa altos valores de escores da componente 2, tendem, de maneira geral, a ser características de pilhas instáveis.

Figura 15 – Distribuição das observações entre as duas principais componentes.



Fonte: elaborado pelo autor, (2021).

As demais componentes, 3 e 4, explicam situações específicas das características das pilhas. A terceira componente, tem como significativas as variáveis SiO_2 e Mn, com coeficientes acima de 0,5 e a quarta componente tem a Pluviometria e H_2O como variáveis significativas. Em resumo, valores altos de SiO_2 e Mn produzem escores baixos para a componente 3, sendo menores em pilhas instáveis para SiO_2 e maiores em Mn e por fim, na componente 4, H_2O e Pluviometria são maiores para as pilhas instáveis.

Com a proposta de avaliar como ficaram os escores de cada componente em relação ao status das pilhas, foi realizado um teste de comparação de média utilizando a estatística Mann-Whitney. Em todas as componentes percebe-se diferença significativa entre as médias, como pode ser observado na tabela 8. Valores p inferiores a 5% ($p < 0,05$) indicam diferença significativa entre as médias dos escores das componentes. Assim, todas as componentes criadas conseguem diferenciar através das variáveis utilizadas na PCA, o que seria uma pilha estável ou instável, através de características médias.

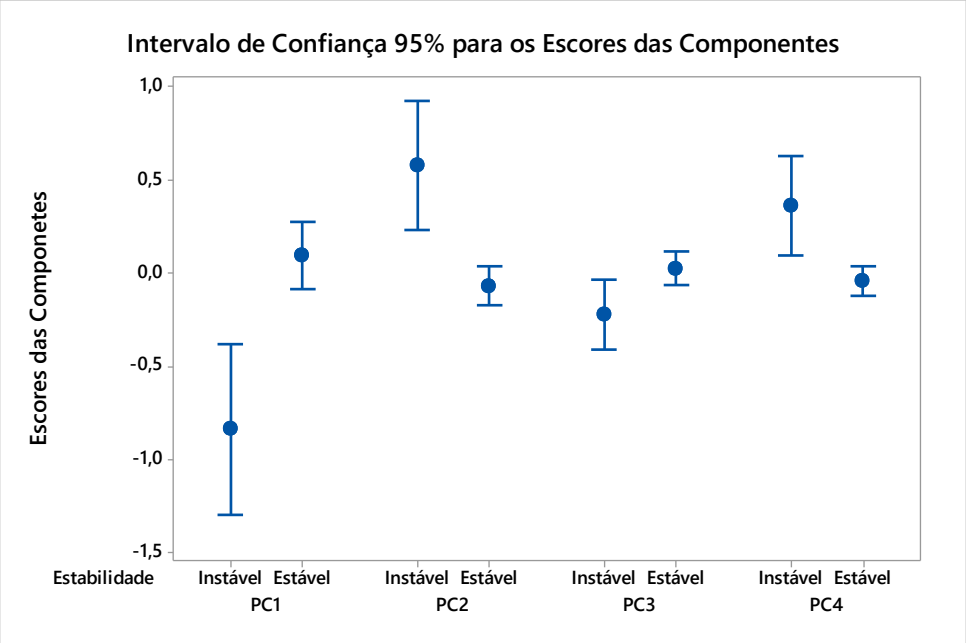
Tabela 8 – Teste da estabilidade para as 4 principais componentes.

	Status	N	Média	Desvio	Desv. da Média	*Mann-Whitney*	Valor p
PC1	**Instável**	73	-0,84	1,97	0,23	19708	0,001
	Estável	619	0,10	2,29	0,09		
PC2	**Instável**	73	0,58	1,49	0,17	31394	0,000
	Estável	619	-0,07	1,33	0,05		
PC3	**Instável**	73	-0,22	0,82	0,10	21509	0,019
	Estável	619	0,03	1,12	0,05		
PC4	**Instável**	73	0,36	1,14	0,13	30486	0,001
	Estável	619	-0,04	1,00	0,04		

Fonte: elaborado pelo autor, (2021).

As diferenças ficam mais evidentes pelo gráfico da figura 16 no qual estão apresentados intervalos de confiança de 95% das médias dos escores.

Figura 16 – Intervalo de confiança para os escores das componentes.



Fonte: elaborado pelo autor, (2021).

A componente 1 apresenta médias menores para pilhas instáveis e maiores na componente 2. Com pouca diferença, mas significativa, a componente 3 possui escores médios mais altos para pilhas estáveis e, por fim, maiores na componente 4.

8 DISCUSSÃO

A utilização da Análise de Componentes Principais gerou componentes que conseguiram diferenciar pilhas estáveis das instáveis. Desta forma, existe a possibilidade de classificar pilhas quanto à estabilidade com base nas características físico químicas determinadas pelo laboratório de Serra Sul.

Buscando a simplificação/objetividade da análise, as principais características das pilhas estáveis, usando somente as duas primeiras componentes, responsáveis pelo acúmulo de 54,1% (sendo 63,4% para três componentes) da variância da base amostral estudada, podem ser vistas na tabela 9.

Tabela 9 – Estabilidade em função das duas componentes principais PC1 e PC2.

Pilhas Estáveis	**PC1**	**PC2**
Fe	Baixo	
P	Alto	
Al_2O_3	Alto	
PPC	Alto	
H_2O		Baixo
+19 mm		Alto
+6,3 mm	Alto	
+1 mm	Alto	
-0,15 mm	Baixo	
Altura de pilha		Alto
Escores	**Alto**	**Baixo**

Escores altos para a componente 1 e valores baixos para a componente 2, resultam em pilhas com maiores chances de estabilidade, assim como o inverso que resultará na maior probabilidade de se ter pilhas instáveis.

A concentração de ferro (Fe) no produto é um fator positivo que leva ao aumento da receita da empresa, uma vez que o preço do produto fino comum no mercado consumidor é em função da concentração de ferro. Deste modo, não seria possível buscar métodos viabilizando a redução desta variável.

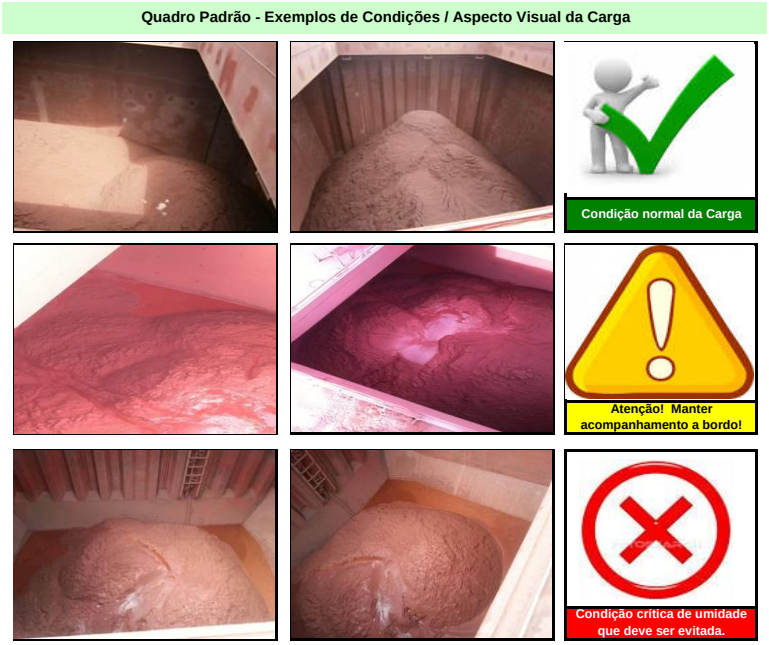
As variáveis concentração de fósforo (P), concentração de alumina (Al_2O_3) e PPC (perda por calcinação) são inerentes às diferentes frentes de lavra na mina. Seus valores são particulares e variam de acordo com as diferentes partes da anomalia mineral lavrada. Deste modo, não podem ser alterados, a não ser com o devido *blending* nas pilhas estocadas no porto, com base nos resultados de qualidade recebidos da mina.

O aumento da umidade, representada pela variável H_2O, influencia na direção do aumento da probabilidade de a pilha ser instável. Ciente disso, podem ser adotadas medidas que melhorem o controle da umidade no produto final de Serra Sul. No ano de 2021 serão instalados medidores de umidade nas saídas dos sistemas da mina para aumentar a previsibilidade da umidade do minério lavrado, favorecendo *blending* nos processos que antecedem o empilhamento no pátio de produto. Além disso, sistemas de drenagem de água superficial foram solicitados para serem instalados no 5º pátio de produto vindouro com a próxima expansão de Serra Sul que tem finalização de implantação prevista para dezembro de 2021. Nos pátios do porto em São Luís, esse tipo de drenagem já é utilizado. A figura 17 exibe o pátio B (Terminal de Ponta da Madeira, São Luís, Maranhão) sem minério e em processo de adequação com a construção da drenagem superficial.

Figura 17 – Sistema de drenagem superficial no pátio B no porto. Fotos tiradas pelo autor.

Com relação ao carregamento de navios no porto, é importante mapear e rastrear as pilhas que são carregadas nas minas até o porto para tomar devidas precauções para evitar problemas no transporte marítimo. As pilhas com piores características de estabilidade devem ser carregadas em menores proporções nos porões dos navios. Além disso, deve-se continuar seguindo os procedimentos de drenagem dos pátios no porto e inspeção da carga em porões (figura 18).

Figura 18 – Padrão de cargas em porões de navio.



Fonte: PRO-019620 - Operação de drenagem de equipamentos das linhas de embarque de minérios do Terminal de Ponta da Madeira - Vale, (2019).

As variáveis granulométricas +19 mm, +6,3 mm, +1 mm e -0,15 mm indicam que para pilhas estáveis é desejável que se tenha uma menor concentração de finos e, consequentemente, maior concentração de fração grosseira. É válido ressaltar que o produto tem as especificações (tabela 1) bem documentadas junto às áreas clientes e, exceder em grosseiros pode trazer ônus na comercialização da *commodity* minério de ferro. Acima de 19 mm, seguindo a especificação de processos, não se deveria ter fração de produto. Otimização buscando reduzir a geração de finos na britagem é benéfica ao processo e à empresa, uma vez que se busca reduzir a britagem excessiva e, consequentemente, consumo desnecessário de energia (DA LUZ, 2010). Isso é feito com a melhoria do processo de classificação em peneiras, reduzindo o *by pass* de peneiramento que é o envio de minério já suficientemente fino para o processo de britagem. Iniciativas como o aumento da eficiência de britagem com o estudo de novos revestimentos junto aos fornecedores já estão em andamento e os frutos deste trabalho serão colhidos em 2021 (trabalhos internos dentro de Vale SA).

Com relação à altura das pilhas, inicialmente se formavam pilhas com 18 m, seja no período seco ou no chuvoso, em função da pouca oferta de trens para transporte do produto até o porto. Atualmente, são formadas pilhas com no máximo 16 m (período seco) para garantir que os danos provenientes de um deslizamento sejam menores. No período chuvoso, são formadas pilhas com no máximo 12 m de altura. De acordo com a tabela 9, pilhas mais altas favoreceram a sua classificação como estáveis. Tem-se que tomar a devida cautela ao analisar esta informação, pois o pátio tem limite de largura e, consequentemente, a pilha tem limite de altura. Talvez seja possível obter o ganho de formar pilhas um pouco mais altas, sem ferir os limites estabelecidos pelas bermas dos pátios ou quaisquer restrições que visam garantir a segurança operacional dos pátios. Mesmo assim, ter a altura do lado das pilhas estáveis ao invés das instáveis dá uma perspectiva de poder futuramente elevar a altura das pilhas e melhorar a utilização dos pátios.

9 CONCLUSÃO

Com a realização desse estudo de caso, pode-se concluir que é muito desafiador garantir uma pilha de minério com 100% de estabilidade, devido às várias condições que influenciam a estabilidade, conforme demonstrado nesse estudo. A estabilidade ou instabilidade de uma pilha é fundamentada em uma série de características conhecidas e, provavelmente, algumas ainda desconhecidas. Ainda

assim, medidas podem ser tomadas visando formar pilhas com menor probabilidade de se tornarem instáveis antes e depois de serem empilhadas nos pátios.

As componentes principais levantadas nesse trabalho podem ajudar os tomadores de decisão a aumentar a probabilidade de se formar pilhas estáveis, uma vez conhecidos os principais fatores do fenômeno geotécnico de deslizamento parcial de pilhas de minério de ferro fino.

O presente trabalho atingiu os objetivos propostos, pois foram identificadas variáveis que mais influenciam na estabilidade de pilhas de minério de ferro, conseguiu evidenciar algumas relações entre variáveis e ainda demostrou que não é representativa a relação entre estabilidade de pilha e altura ou pluviometria. Seguem as explicações detalhadas dos fatos evidenciados:

Objetivo 1: Investigar as variáveis que influenciam a estabilidade de pilhas de fino comum de Serra Sul.

As variáveis que melhor representam a estabilidade de pilhas de fino comum de Serra Sul e se mostraram de controle viável, foram a **umidade** e a **concentração de finos com tamanho de partícula inferior a 0,15 mm**. As soluções tecnológicas propostas para ajudar no controle de estabilidade de pilha foram:

- Analisador de umidade nos transportadores de correia que se originam na mina de Serra Sul;
- Analisador de tamanho de partícula nos fluxos que se direcionam aos britadores terciários;
- Analisador de tamanho de partícula portátil para utilização em diversos pontos.

Objetivo 2: Verificar se existe relação entre as variáveis estudadas.

Algumas associações fortes entre variáveis com **teor de ferro** versus **PPC** (perda por calcinação) e **teor de ferro** versus **fração inferior a 0,15 mm** foram identificadas.

Objetivo 3: Verificar se a altura de pilha se relaciona com a estabilidade de pilha.

Não ficou evidente a relação entre altura de pilha e estabilidade. Mesmo assim, na componente principal dois (PC2) foi identificada a relação direta entre estabilidade e altura de pilha. Uma análise mais profunda e específica deve ser realizada a fim de se verificar essa relação.

Objetivo 4: Verificar se a pluviometria se relaciona com a estabilidade das pilhas formadas no pátio de produto de Serra Sul.

Não foi identificada uma relação entre pluviometria e estabilidade de pilha, uma vez que os esses fenômenos podem estar defasados, sendo imprecisa a correlação que houve um deslizamento de pilha devido à chuva daquele momento ou de momentos passados.

Ficam como sugestões para continuidade desse trabalho a utilização de métodos diferentes da EDA e PCA, *bem como a utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina (machine learning) para identificar padrões menos explicítos nas bases de dados*. Com base nas variáveis de entrada, como os dados de qualidade do minério empilhado, teria a oportunidade de prever as variáveis de saída, especificamente a condição de estabilidade.

Outra sugestão é a utilização de modelos de regressão logística onde algumas variáveis, como a pluviometria, poderiam compor os dados de entrada diretamente ou de maneira defasada para ajudar a explicar a estabilidade de pilhas.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, G. A. S.; FILHO, W. L. O. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. Escola de Minas. Ouro Preto, 2011.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações:** fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1988.

CARVALHO, P. A. S. **Manual de geotecnia: taludes de rodovia:** orientação para diagnóstico e solução de seus problemas. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.

CONCEIÇÃO, G. M. S.; ALENCAR, A. P.; ALENCAR, G. P. **Noções básicas de estatística.** Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2018.

DA LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**, 5ª Ed.; Cap. 4; pág. 143–211, 2010.

FERNANDES, E. Z**. Caracterização física, química, mineralógica e metalúrgica dos produtos granulados de minério de ferro**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

FERRANTE, F.; DE AGUIAR, M. F. P.; CARVALHO, E. P.; COTA, F. L. D. G**.** Análise da estabilidade de pilha de rejeito de minério de ferro. **In:** CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., Belo Horizonte, 2016.

GAMA, E. M.; MATIAS, G. P.; GAMA, F. A. Estudo experimental da estabilidade de pilhas de estocagem de minério de ferro. **In:** CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA COBRAMSEG, 16., Goiânia, 2014.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados.** 6. ed. Bookman, 2009.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em Educação:** Abordagens Qualitativas. São Paulo: Pedagógica e Universitária, 1986.

MARANGON, M. **Notas de aula:** Tópicos em Geotecnia e Obras de terra. UFJF, 2006.

OLIVEIRA, A. M. S. **Geologia e engenharia**. São Paulo, 1998.

OLSEN, L.; CARNES, B. **Screen capacity calculation**. Technical paper T-JCI-201, Austrália, 2014.

PEREIRA, W. L. **Análise da estabilidade da pilha de estéril do Correia - Mina de Gongo Soco - para implantação da ferrovia Estrada de Ferro Vitória Minas - EFVM**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

SACRAMENTO, R. C. F. **Transportadores contínuos para granéis sólidos**. Salvador: UFBA, 2012.

SAREYED, L; RIVA, W. **Fundamentos da Operação Portuária**. Vale SA, 2018.

SILVA, H.; MACEDO, J. **Descritivo de Processo do S11D**. Vale SA, 2019.

YIN, R. K. **Estudo de caso:** planejamento e métodos. 2. ed. Porto Alegre: Bookmam, 2001.