



MATEUS DO LÍBANO PEREIRA

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA SEÇÃO DE CAVA DE
MINERAÇÃO E PILHA DE ESTÉRIL NO ESTADO DE MG.**

LAVRAS – MG

2021

MATEUS DO LÍBANO PEREIRA


**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA SEÇÃO DE CAVA DE MINERAÇÃO E
PILHA DE ESTÉRIL NO ESTADO DE MG.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.



Prof.^a Me. Raquel Mariano Linhares

Orientadora



Eng.^a Me. Mirella Dalvi dos Santos

Coorientadora

LAVRAS – MG

2021

MATEUS DO LÍBANO PEREIRA

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA SEÇÃO DE CAVA DE MINERAÇÃO E
PILHA DE ESTÉRIL NO ESTADO DE MG.**

**STABILITY ANALYSIS OF A SECTION OF AN OPEN PIT MINE AND STERILE
WASTE PILE IN THE STATE OF MG**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 06 de maio de 2021

Prof.^a Me Raquel Mariano Linhares UFLA

Eng.^a Me Mirella Dalvi Dos Santos UFES

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido UFLA



Prof.^a Me. Raquel Mariano Linhares

Orientadora



Eng.^a Me. Mirella Dalvi dos Santos

Coorientadora

LAVRAS – MG

2021

RESUMO

A atividade mineradora de ferro vem crescendo de maneira acelerada com o passar dos anos, fruto da necessidade crescente deste elemento mineral que configura a base da indústria mundial. Com demandas cada vez maiores, foi observado uma ampliação da escala dos processos, tornando maiores as escavações e as estruturas de deposição de estéreis e rejeitos. Com o volume de minério lavrado aumentado, maiores se tornam as cavas a céu aberto e as pilhas de estéril. Devido às limitações físicas de espaço, as estruturas de deposição começaram a se aproximar das cavas, tornando o relevo ainda mais acidentado e composto por solos heterogêneos. Assim, o estudo de estabilidade dos taludes de uma cava de mineração a céu aberto implica na determinação da geometria da estrutura, de modo a priorizar a extração mineral de maneira mais simples, sem que seja prejudicada a segurança das pessoas envolvidas no processo. O foco deste trabalho é realizar a análise da estabilidade de uma seção de uma cava a céu aberto próxima a pilha de estéril, com histórico de operação datados de meados dos anos 1990, com anomalias recorrentes de surgimento de trincas de tração e outras anomalias a fim de determinar a real segurança da interface comparando as análises de estabilidade variando os parâmetros do solo e o nível de água, mostrando todo o processo de aquisição de dados desde a geometria da estrutura, evidenciando alguns problemas de engenharia enfrentados diariamente dentro da mineração. Os resultados obtidos foram satisfatórios e condizentes com a situação real das estruturas analisadas.

PALAVRAS-CHAVES: Estabilidade de Taludes, Engenharia geotécnica, geotecnia, Pilha de estéril, Cava a céu aberto, minério de ferro

ABSTRACT

The iron mining activity has been growing at an accelerated rate over the years, as a result of the growing need for this mineral element that forms the basis of the world industry. With increasing demands, an expansion of the scale of the processes was observed, making the excavations and deposition structures of stores and tailings larger. With the volume of ore mined increased, the open pit pits and waste piles become larger. Due to physical limitations of space, the deposition structures began to approach the pits, making the relief even more rugged, composed of heterogeneous soils. Thus, the study of the slope stability of an open pit mining involves determining the geometry of the structure, in order to prioritize mineral extraction in a simpler way, without jeopardizing the safety of the people involved in the process. The focus of this work is to perform the stability analysis of a section of an open pit near the waste dump, with a history of operation dated from the mid-1990s, with recurrent anomalies in the emergence of traction cracks and other anomalies in order to determine the real safety of the interface by comparing the stability analyzes by varying the parameters of the soil and the water level, showing the entire process of data acquisition from the geometry of the structure, showing some engineering problems faced daily within the mining. The results obtained were satisfactory and consistent with the real situation of the analyzed structures.

KEYWORDS: Slope Stability, Geotechnical Engineering, Geotechnics, Barren Pile, Open Pit, Iron Ore

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema geral de um empreendimento de mineração.....	9
Figura 2: Modelo de instrumentação em taludes.....	11
Figura 3: Desenho em corte de um piezômetro de tubo aberto.....	13
Figura 4: Desenho em corte de um INA.....	13
Figura 5: Sinais de ocorrência de rastejo.....	17
Figura 6: Planos de ruptura planas.....	18
Figura 7: Ruptura circular.....	19
Figura 8: Movimento de queda.....	19
Figura 9: Forças atuantes em uma lamela.....	22
Figura 10: Forças em uma fatia consideradas pelo método de Morgenstern & Price (1965).....	27
Figura 11: Imagem aérea da Cava B.....	29
Figura 12: Anomalia 1 na Cava B.....	29
Figura 13: Anomalia 2 na Cava B.....	30
Figura 14: Vista geral da PDE C.....	31
Figura 15: Mapeamento via VANT.....	33
Figura 16: Definição da seção AA. a) Vista superior.....	34
Figura 17: Localização de pontos de sondagem na Cava B.....	35
Figura 18: Perfil estratigráfico do solo.....	36
Figura 19: Instrumentos operantes.....	37
Figura 20: Deteminação do NA.....	38
Figura 21: Análise de estabilidade disponibilizada pela Mina A.....	43
Figura 21: Análise de estabilidade utilizando os parâmetros do solo estimados.....	44
Figura 23: Análise de estabilidade com solos ensaiados.....	44
Figura 24: Análise de estabilidade considerando NA rebaixado.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1. Noções gerais e terminologias aplicadas a mineração.....	9
2.2. Monitoramento de taludes de mineração.....	10
2.3. Aspectos gerais da movimentação de massa.....	14
2.4. Movimentação de massa e tipos de ruptura.....	15
2.5. Análise de estabilidade de taludes.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.1. Área do estudo.....	28
3.2. Topografia e definição da seção crítica.....	32
3.3. Perfil estratigráfico do solo.....	34
3.4. Determinação do nível do lençol freático.....	36
3.5. Análises paramétricas.....	38
4. RESULTADOS.....	43
4.1. Análise empregando parâmetros estimados (validação do modelo numérico).....	43
4.2. Análise empregando parâmetros obtidos experimentalmente.....	44
4.3. Análise considerando o rebaixamento do NA.....	45
5. CONCLUSÕES.....	47

1. INTRODUÇÃO

Na mineração, a atividade de lavra assume uma importância especial na evolução do processo de extração, uma vez que se caracteriza por uma atividade operacional complexa e de várias frentes de avanço. Esse cenário se torna ainda mais complexo em casos em que o minério mergulha a altas profundidades, exigindo técnicas de exploração cada vez mais arrojadas para garantir a viabilidade econômica do empreendimento. A adoção de ângulos de talude mais inclinados proporciona maior eficiência de lavra, menor geração de estéril e maior rapidez no processo; entretanto, podem gerar instabilidade nos taludes, podendo provocar rupturas locais ou globais (PARRA *et al.*, 2017)

Nas últimas décadas, observou-se um aumento na demanda de minerais metálicos e não metálicos, devido às constantes e aceleradas evoluções tecnológica e industrial vividas pela sociedade atual. Para suprir esta demanda, foi observado um aumento de escala nas operações mineradoras, aumentando as quantidades de minério, estéril e rejeito geradas por dia. Como resultado da alta produção, é comum existirem pilhas de estéril no limite de cavas a céu aberto, causando um gradiente de relevo ainda maior, fazendo com que a diferença de nível cresça duas vezes mais rápido e podendo colocar em dúvida a estabilidade global do empreendimento.

As condições de segurança exigidas para a estabilidade de taludes em cavas de mineração diferem das utilizadas nas diferentes obras civis (ABRÃO, OLIVEIRA, 1998). Essa diferença se dá ao caráter temporário destes taludes, sendo empregados menores fatores de segurança. Além disso, diversos são os fatores externos em uma mina que podem contribuir para a desestabilização destes taludes, como desmontes de lavra, tráfego de veículos pesados e, normalmente, ausência de vegetação.

No passado, a preocupação com a qualidade e estabilidade de pilhas de estéril era pouca (MCCARTER, 1990), havendo somente um local delimitado para que o caminhão basculasse o estéril. Estruturas deste tipo são chamadas de ponta de aterro e se diferem do controle de qualidade de pilhas de estéril. Apesar disso, as pontas de aterro têm vida útil longa e, mesmo após o término de deposição, ainda são de responsabilidade do empreendimento minerador, podendo se instabilizarem ou prejudicarem a estabilidade de estruturas próximas. Mesmo que a cultura tenha mudado e as leis se tornado mais rígidas, devido às práticas antigas, ainda existem incertezas quanto a estabilidade de algumas estruturas já existentes.

No presente trabalho, analisou-se a estabilidade de um talude composto por uma cava de extração de minério de ferro a céu aberto que está próxima à uma pilha de deposição de

estéril, localizado em uma mina no interior de Minas Gerais. Esta seção é composta por uma cava a céu aberto e uma pilha de estéril que, no passado, foi construída com ponta de aterro. Esta região apresenta anomalias recorrentes, como trincas de tração, erosões e surgência de água.

O objetivo foi compreender o comportamento da interface cava-pilha e comparar os resultados das análises de estabilidade realizadas com os parâmetros do solo obtidos por meio de ensaios de laboratório com aquelas realizadas anteriormente com os parâmetros do solo estimados ou extraídos da literatura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Noções gerais e terminologias aplicadas a mineração

SOUSA (2021) define mineração como sendo a atividade econômica industrial que consiste na pesquisa, exploração, lavra e beneficiamento de minérios presentes no subsolo, sendo este tipo de atividade crucial para a sociedade atual. Curi (2017) pontua que os bens minerais podem ser encontrados nos estados físicos sólido, líquido ou gasoso, sendo também possível classificar os minerais como metálicos ou não metálicos.

As operações minerárias podem ser divididas em quatro fases distintas em termos de execução, sendo elas a prospecção, exploração, desenvolvimento e lavra. A prospecção corresponde a etapa de pesquisa e descoberta dos minerais de interesse, a exploração corresponde à investigação do subsolo e do entorno para definição da jazida e construção do conhecimento geológico do local, o desenvolvimento é a etapa de planejamento da exploração da jazida e trabalhos necessários para a abertura da mina e por fim tem-se a etapa de lavra, que consiste no aproveitamento da jazida (CURI, 2014).

O processo de lavra ou exploração é responsável pela alteração geográfica característica do ambiente de mineração, composto por cavas a céu aberto, barragens de contenção, pilhas de estéril entre outras instalações, como evidenciadas na Figura 1.

Figura 1: Esquema geral de um empreendimento de mineração



Fonte: Adones (2019)

A exploração do minério pode ser realizada de maneira superficial ou subterrânea, sendo definida de acordo com o plano de lavra. As minas a céu aberto podem ser desenvolvidas a

partir de cavas (abaixo da cota original do terreno) ou meia encosta (acima do nível de escoamento da drenagem) (ADONES, 2019).

Juntamente com o minério, durante a lavra é extraído o estéril, que é a rocha ou solo sem valor econômico, sendo destinado para as pilhas de deposição. Após a separação do estéril, o minério é levado para as usinas de beneficiamento. Deste processo industrial origina-se o rejeito, material sem valor econômico, em forma de polpa (sólidos e água) (CURI, 2017).

2.2. Monitoramento de taludes de mineração

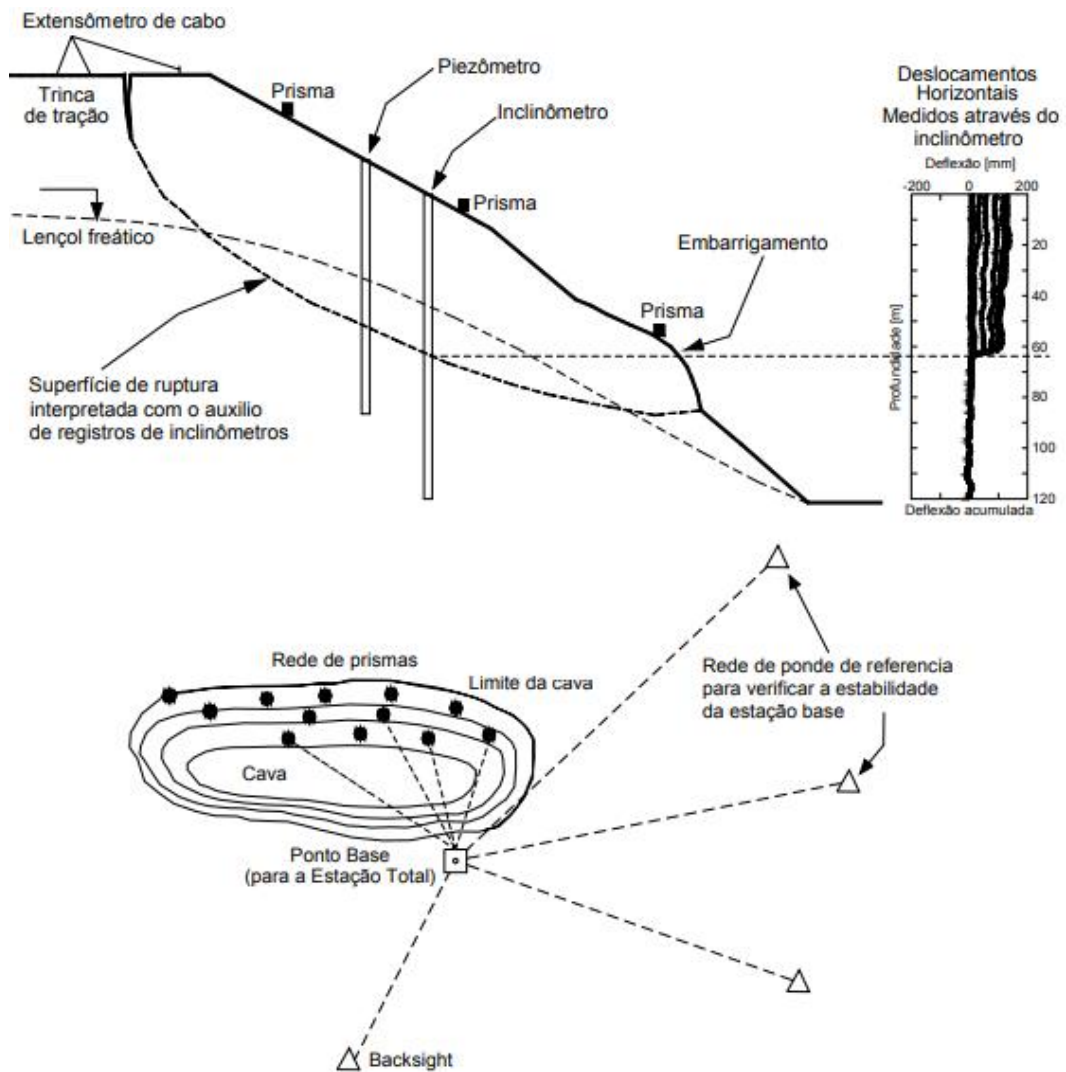
A instrumentação geotécnica de obras de engenharia é uma das ferramentas principais para garantir a segurança destas obras. A partir de inspeções visuais (monitoramento qualitativo) e da leitura de instrumentação é possível acompanhar a evolução das estruturas, estabelecer níveis de alerta e tomar atitudes corretivas ou mitigatórias. Deste modo, pode-se dizer que o monitoramento geotécnico tem como finalidade garantir a segurança pessoal e material, detectar sinais precoces de instabilização e fornecer informações geotécnicas que ajudem o entendimento do mecanismo de ruptura (CALL, 1982; CALL e SAVELY, 1990 *apud* HUALLANCA 2003).

De acordo com Reis (2010), existem duas razões básicas para a instrumentação de taludes de mineração. A primeira é de verificar e garantir a aderência do talude aos projetos operacionais e de segurança. A segunda é possibilitar o acompanhamento de áreas específicas sujeitas a instabilização.

A partir do monitoramento periódico dos taludes, é possível construir um adequado banco de dados destas estruturas, que auxiliam na interpretação de possíveis oscilações, permitem o estabelecimento de níveis de controle, de atenção e de urgência.

Huallanca (2004) traz um modelo básico com os principais equipamentos de monitoramento de taludes (Figura 2), descritos em seguida.

Figura 2: Modelo de instrumentação em taludes.



Fonte: Huallanca (2004).

Prismas são instrumentos que medem deslocamentos verticais e horizontais através de levantamentos topográficos periódicos. A instalação de prismas se faz necessária para o acompanhamento das deformações superficiais do maciço. Pode ser realizada manualmente, a partir de estação total, ou de maneira automatizada, por estações robóticas. O ideal é que a frequência mínima do monitoramento seja semanal ou quinzenal, no caso de levantamentos manuais, possibilitando criação de série histórica e identificação de ruídos provenientes da instrumentação (imprecisão do instrumento, dilatação térmica). Para estações robóticas, normalmente adota-se o tempo entre medições igual ao tempo necessário para cobrir toda a rede de prismas (MARTINS, 2019).

Inclinômetros, por sua vez, são tubos providos de ranhuras inseridos ao longo de um tubo guia de alumínio instalado previamente com a finalidade de medição dos deslocamentos

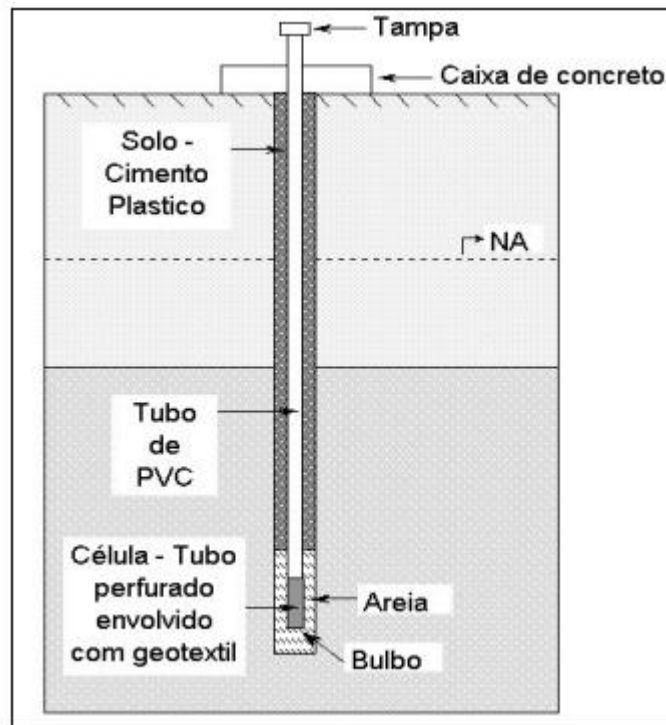
horizontais da massa de solo (DE AGUIAR, 2012); são muito úteis para identificação de uma possível superfície de ruptura.

A determinação da poropressão no solo é de suma, sendo seu acompanhamento fundamental para aferição da segurança do maciço. Os instrumentos mais utilizados para o monitoramento da poropressão são os piezômetros de tubo aberto, também chamados de piezômetro de Casagrande, e piezômetros elétricos. Dentre as principais vantagens da utilização do piezômetro de Casagrande, Da Cruz (1996) destaca a confiabilidade, durabilidade, sensibilidade, possibilitar a verificação de funcionamento a partir de testes de vida, permitir a aferição da permeabilidade do solo e o baixo custo.

Além da utilização dos piezômetros para medição da poropressão, é muito comum no monitoramento geotécnico de taludes a utilização de instrumentos de nível d'água (INAs) para monitoramento da altura do lençol freático (REIS, 2010).

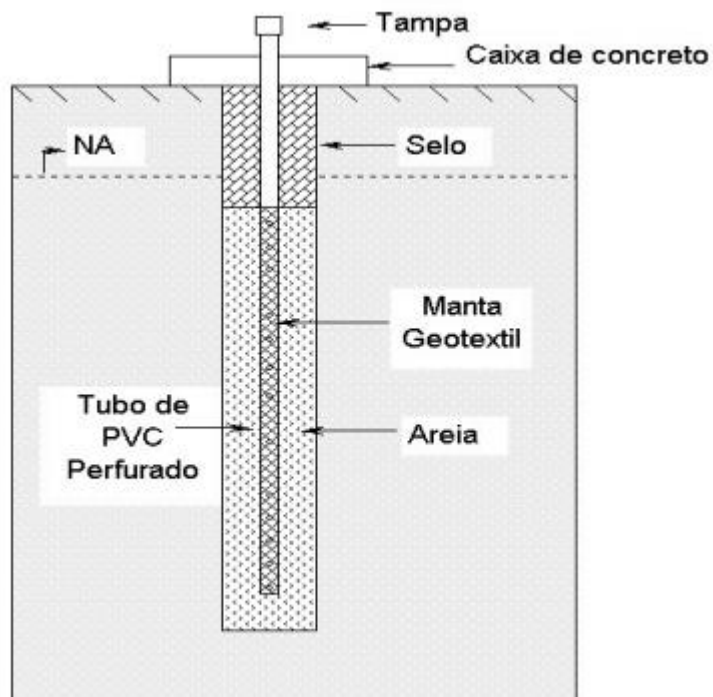
É importante ressaltar que apesar de relacionados, estes instrumentos medem grandezas diferentes. Thá (2007) evidencia que a função dos piezômetros é de fornecer a carga de pressão no ponto instalado, sendo a leitura realizada com a finalidade de obtenção da cota piezométrica, resultado da soma da carga de pressão e carga de elevação. Já o instrumento de nível de água (INA) tem como finalidade indicar a cota da superfície freática referente ao local que o instrumento foi instalado. Nas Figura 3 e Figura 4 é possível observar os materiais utilizados para construção de um piezômetro de Casagrande e de uma INA, respectivamente.

Figura 3: Desenho em corte de um piezômetro de tubo aberto.



Fonte: Fonseca (2003).

Figura 4: Desenho em corte de um INA.



Fonte: Fonseca (2003).

2.3. Aspectos gerais da movimentação de massa

Entende-se por movimentos de massa ou movimentos coletivos de solos e rocha qualquer deslocamento de volume. Diversos são os autores que se dedicam a estudar os movimentos de massa, dada a sua importância não só como agentes atuantes nas formas de relevo, mas também devido as suas implicações práticas (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

Para um bom entendimento dos movimentos de massa, primeiramente se faz necessária a definição de taludes e encostas e suas características. Segundo Gerscovich (2016), talude é a denominação para qualquer superfície inclinada de solo ou rocha, seja ela natural ou construída pelo homem. Os taludes naturais podem ser constituídos de rochas, de solos residuais (solos originados da intemperização da rocha mãe) e/ou solos transportados (transportados devido aos agentes naturais como chuvas, ventos e gravidade) (GERSCOVICH, 2016).

Muitas obras de engenharia são projetadas em terrenos naturais, sujeitos então a problemas de estabilidade. Não é incomum taludes naturais que permaneceram estáveis durante décadas virem a colapsar; este é, inclusive um processo natural da evolução do relevo. Esta instabilização pode ser causada por mudanças na topografia, alterações sísmicas, variação da poropressão e imposição de carregamentos externos. Estes agentes citados podem fazer com que as tensões cisalhantes atuantes superem as tensões resistentes, levando o talude à ruptura.

Os taludes construídos pelo homem resultam de cortes de encostas, escavações ou lançamento de aterros. Cortes em taludes são processos necessários em vários tipos de obras civis, inclusive em mineração. O corte deve ser feito de tal maneira que seja econômico e permaneça estável durante sua vida útil, sendo que sua geometria é influenciada pelas circunstâncias do terreno, como tipo de solo, pluviometria da região, probabilidade de desastres naturais etc.

Os aterros são necessários para o nivelamento do terreno ou quando o solo natural não apresenta os parâmetros de resistência necessários. Como as propriedades geotécnicas do solo aterrado são conhecidas, os cálculos de estabilidade se mostram mais precisos que para os taludes naturais (GERSCOVICH, 2016). Para aterros sanitários ou outros tipos de deposição de resíduos sólidos urbanos contendo matéria orgânica, não existe tal precisão, devido à heterogeneidade do material.

Aterros são utilizados também como diques e barragens de água ou rejeito industrial. Para a contenção de sólidos, é comum a prática da utilização do próprio material de deposição

como estrutura de contenção, caso de inúmeras barragens de rejeito. Devido às incertezas desse material, é necessário monitoramento contínuo para assegurar a sua estabilidade.

2.4. Movimentação de massa e tipos de ruptura

As movimentações de massa são classificadas de acordo com a velocidade de deslocamento do solo/rocha e com a profundidade da ruptura. Existem diversas propostas de classificação destas movimentações, como Varnes (1978), Hutchinson (1968), Guidicini e Nieble (1983), sendo que a de Varnes (1978) é a mais utilizada internacionalmente, considerada oficial pela *International Association of Engineering Geology and the Environment* – IAEG (Associação Internacional de Geologia de Engenharia e Meio Ambiente) (Quadro 1).

Quadro 1: Classificação de movimentos de massa.

Tipo de Movimento			Tipo de Material		
			Rocha	Solos de engenharia	
				Grossoiro	Fino
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamentos	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
	Translacional		De blocos rochosos	De blocos de detritos	De blocos de terra
			Muitas unidades	De rocha	De detritos
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
				(Rastejo de solo)	

Fonte: Adaptado de Varnes (1978).

Por mais que a classificação de Varnes (1978) seja completa e prática, a geologia varia de acordo com o clima, fazendo com que a aplicabilidade da classificação seja limitada à região na qual esta foi desenvolvida. Portanto, Augusto Filho (1992) trouxe, a partir da classificação de Varnes (1978), uma adaptação para a dinâmica ambiental brasileira, composta majoritariamente de solos tropicais (Quadro 2).

Quadro 2: Classificação de movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992).

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo ou fluência	<p>Vários planos de deslocamento (internos)</p> <p>Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade</p> <p>Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes</p> <p>Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada</p> <p>Geometria indefinida</p>
Escorregamento	<p>Poucos planos de deslocamento (externos)</p> <p>Velocidades médias (km/h) a altas (m/s)</p> <p>Pequenos a grandes volumes de material</p> <p>Geometria e materiais variáveis</p> <p>Planares → Solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza</p> <p>Circulares → Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturados</p> <p>Em cunhas → Solos e rochas com dois planos de fraqueza</p> <p>Sem planos de deslocamento</p>
Queda	<p>Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado</p> <p>Velocidades muito altas (m/s)</p> <p>Material rochoso</p> <p>Pequenos a médios volumes</p> <p>Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.</p> <p>Rolamento de matacão</p> <p>Tombamento</p>
Corrida	<p>Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação)</p> <p>Movimento semelhante ao de um líquido viscoso</p> <p>Desenvolvimento ao longo das drenagens</p> <p>Velocidades médias a altas</p> <p>Mobilização de solo, rocha, detritos e água</p> <p>Grandes volumes de material</p> <p>Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas</p>

Fonte: Augusto Filho (1992).

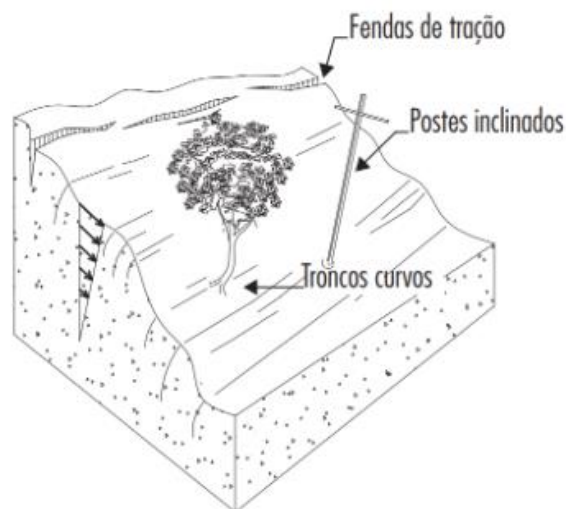
2.4.1. Rastejo ou Fluência

Rastejos são movimentos de solos ou rochas caracterizados por serem muito lentos, na ordem de grandeza de milímetros a centímetros por ano. Ocorrem sobre superfícies horizontais de solo, bem como em transições de solo/rocha, sendo uma deformação de caráter plástico, sem superfície de ruptura definida (BORCHARDT, 2012).

Terzaghi (1950) dividiu o movimento de rastejo em dois tipos: rastejos sazonais e contínuos. Os rastejos sazonais são ocasionados devido a variação da temperatura e período chuvoso, sendo variável seu movimento de acordo com a sazonalidade. Já os rastejos contínuos são causados, majoritariamente pela força da gravidade, não apresentando grandes variações durante o ano.

É possível a constatação do fenômeno de rastejo a partir da inspeção visual, visualizando o deslocamento angular de troncos de árvores e postes, ocorrência de fendas de tração, soterramento de canaletas de drenagem, etc. O rastejo é um indicativo de instabilidade do maciço, principalmente pela ação do intemperismo, que ocorre até que o equilíbrio limite seja atingido, quando pode vir a ocorrer uma ruptura rápida, como escorregamentos (Figura 5) (QUEIROZ, 2016).

Figura 5: Sinais de ocorrência de rastejo.



Fonte: Queiroz, 2016.

2.4.2. Escorregamento

Guidicini e Nieble (1983) definem escorregamentos como movimentos rápidos, com superfície bem definida, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora do talude, sendo possível a distinção entre a massa movimentada e a massa estável. O escorregamento

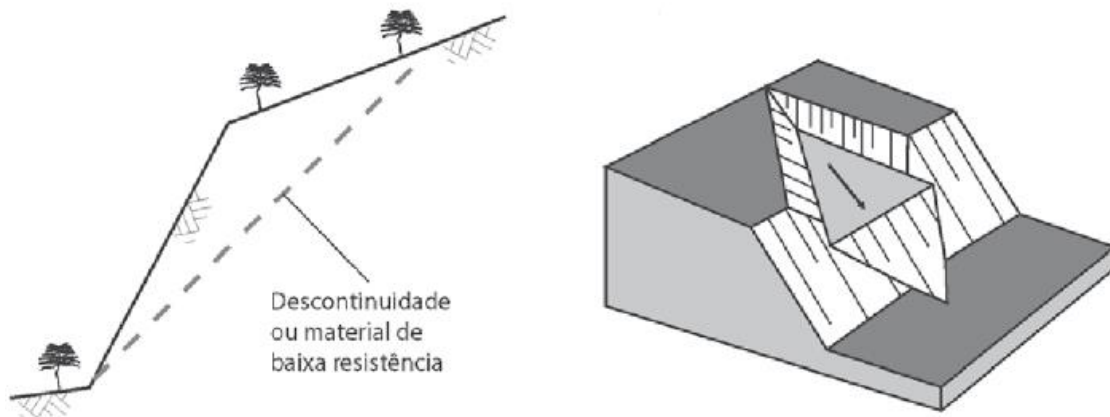
acontece quando as tensões cisalhantes solicitantes ultrapassam as tensões cisalhantes resistentes. Tanto solos quanto rochas apresentam ruptura no plano de menor resistência. Os escorregamentos podem ser divididos em duas grandes categorias: translacionais e rotacionais.

De acordo com Freu (2012), escorregamentos translacionais ocorrem em materiais com planos de fraqueza bem definidos, como planos de estratificação, falhas, fraturas, ou ao longo de contatos entre rocha, solo, saprolito e colúvio, aproximadamente paralelos a superfície. Este tipo de ruptura costuma ser longa horizontalmente e de baixa profundidade, associada, normalmente ao aumento da poropressão. Quando planos de fraqueza se cruzam, a ruptura acontece em forma de cunha, delimitada por dois ou mais planos de ruptura (Figura 6).

Figura 6: Planos de ruptura planas.

a) um plano de fraqueza.

b) dois planos de ruptura (cunha).



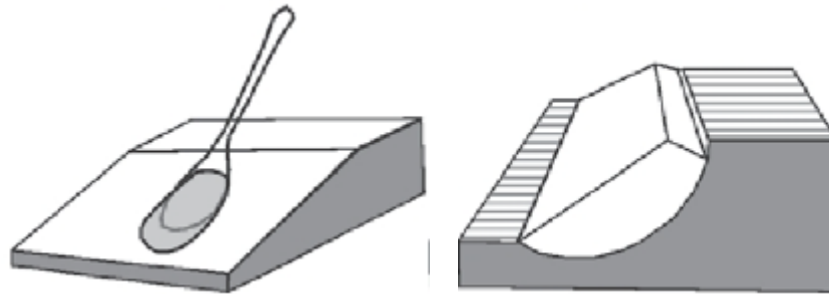
Fonte Gerscovich, 2016.

Para solos homogêneos, a superfície de ruptura tende a ser circular e bem definida e assume-se que a resistência ao cisalhamento deste plano seja constante. Este tipo de rompimento pode ser bem definido fisicamente e matematicamente, pontuando-se os esforços solicitantes e resistentes. Em três dimensões, este tipo de ruptura pode assumir a forma cilíndrica ou de colher (Figura 7).

Figura 7: Ruptura circular.

a) Forma de colher.

b) Forma cilíndrica.



Fonte: Gerscovich, 2016.

2.4.3. Queda

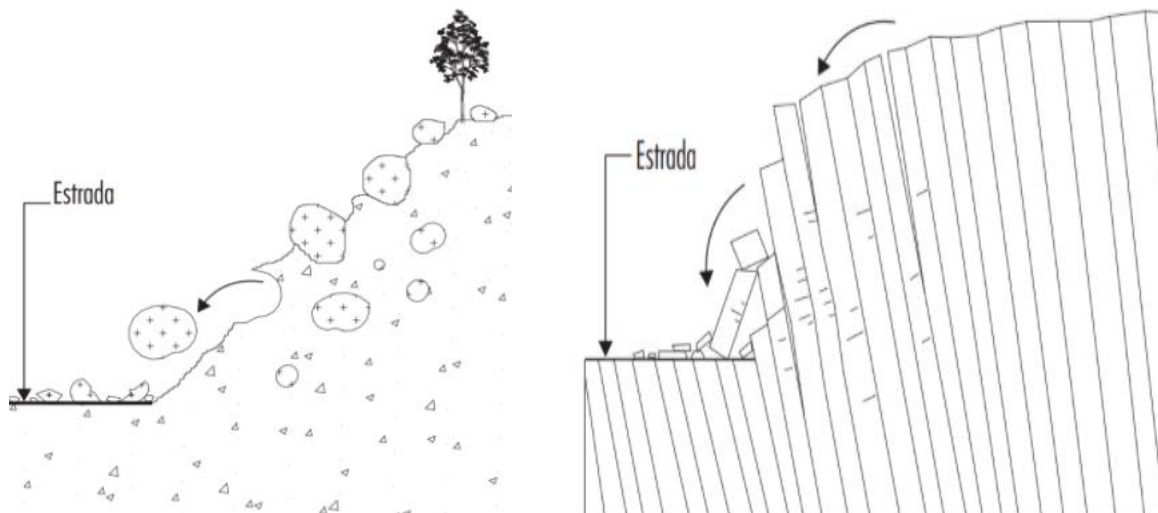
A queda de blocos rochosos é caracterizada por elevada velocidade, maior que em escorregamentos, e curta duração. Como principal causa, pode-se citar o efeito do intemperismo, amplitudes térmicas e ação antrópica, sendo comum o desprendimento de matacões da rocha matriz, ocasionando a movimentação. A geometria do elemento rompido é variável e pode ser relacionado com os planos de descontinuidade (HIGHLAND E BOBROWSKY, 2008).

Os movimentos de queda são caracterizados pelo completo desconfinamento do elemento da matriz, sendo análogo a um plano inclinado. Os movimentos de queda englobam desde rolamento de matacões a tombamentos (Figura 8) (GERSCOVICH, 2016).

Figura 8: Movimento de queda.

a) Rolamento de blocos.

b) Tombamento.



Fonte: Queiroz, 2016.

2.4.4. **Corrida**

Corridas são movimentações de solo e rocha de velocidade alta caracterizadas pela perda completa da resistência ao cisalhamento do solo, apresentando comportamento fluido, próximo de um líquido viscoso. As corridas costumam apresentar grandes volumes de solos deslocados, mesmo quando a angulação do terreno não é elevada (QUEIROZ, 2016).

Gerscovich (2016) aponta como principais causas da fluidificação do solo: a adição de água em solos arenosos, ocorrência de esforços dinâmicos (terremotos, cravação de estacas) e amolgamento em argilas muito sensíveis, sendo mais comum a ocorrência de corridas por excesso de chuvas.

2.5. **Análise de estabilidade de taludes**

Uma vez que a geometria do talude e as condições do subsolo foram determinadas, é possível realizar a análise de estabilidade do talude, seja a partir de metodologias de equilíbrio-limite ou de análise tensão-deformação, que devido a sua complexidade, emprega métodos numéricos (elementos finitos, diferenças finitas, etc) para sua solução.

Abramson *et al.* (2001) pontuam que a utilização de elementos finitos na estabilidade de taludes, apesar de ser um método mais refinado, requer um nível de conhecimento do terreno e condições de entorno muitas vezes não compatíveis com a magnitude do empreendimento. Deste modo, a análise de estabilidade de taludes por elementos finitos se torna restrita aos grandes empreendimentos, como barragens de contenção de rejeitos, por exemplo.

Já os métodos de equilíbrio-limite baseiam-se na hipótese de haver uma massa de solo assumida como um corpo rígido-plástico na iminência de entrar em um processo de escorregamento. Admite-se que o solo rompe bruscamente sem que haja sinais de deformação. Para a utilização do método de equilíbrio-limite, necessitam-se de hipóteses acerca do mecanismo de ruptura que afetará o talude, assumindo que ao longo da superfície de ruptura atuam parâmetros conhecidos de resistência ao cisalhamento (SILVA, 2013).

2.5.1. **Fator de Segurança**

O entendimento do significado físico do fator de segurança (FS) é de suma importância para a análise de estabilidade. De acordo com a NBR 11682 (ABNT, 2009), o fator de segurança é a relação entre os esforços resistentes e os esforços solicitantes para determinado método de cálculo adotado, conforme Equação 1

$$FS = \frac{\text{Resistência ao cisalhamento}}{\text{Tensões cisalhantes mobilizadas}} \quad (1)$$

Entretanto, o valor encontrado por este cálculo não é o fator de segurança real do talude, uma vez que existem imprecisões relacionadas aos parâmetros utilizados no cálculo, como parâmetros de resistência, distribuição da poropressão e estratigrafia do solo. Portanto, a NBR 11682 (ABNT, 2009) estipula valores mínimos de FS de acordo com a utilização e localização das encostas (Tabela 1), sendo exigidos FS maiores de acordo com a magnitude do empreendimento, perdas vitais e matérias envolvidas numa possível ruptura (risco geotécnico).

Tabela 1: Fatores de segurança mínimos.

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

NOTA 1: No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10%. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no anexo D.

NOTA 2: No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3: Esta tabela não se aplica em casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Entretanto, a NBR 11682 (ABNT, 2009) não inclui requisitos específicos para taludes de cavas de mineração e pilhas de estéril, bem como qualquer outra situação distinta que não envolva encostas. Para cavas em mineração, esta norma é utilizada pois não existe norma específica. Para pilhas, deve-se consultar a norma NBR 13029 (ABNT, 2017) – “Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha”.

De acordo com a NBR 13029 (ABNT, 2017) as análises de estabilidade da pilha devem ser realizadas em seções críticas com relação à altura, fundação, condições de percolação e parâmetros de resistência do solo, sendo o FS mínimo para o talude geral de 1,5 em situação freática normal e mínimo de 1,3 para situação freática crítica. Já para ruptura local (talude entre

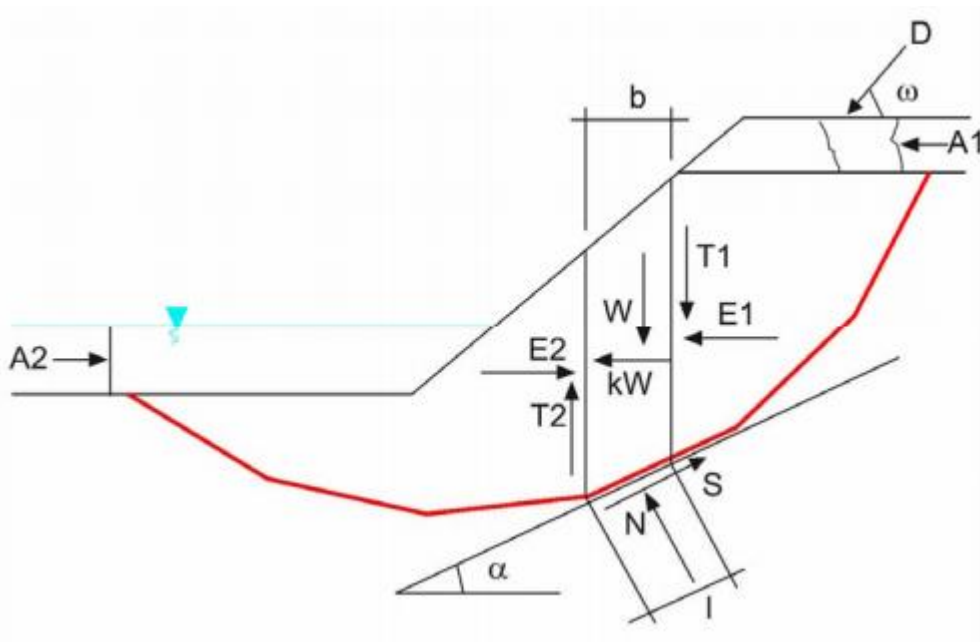
bermas) este fator deve ser de 1,5, salvo situação na qual o talude for composto predominantemente de rochas, sendo aceito 1,3.

2.5.2. Método do equilíbrio limite

Os métodos de análise de equilíbrio limite devem ser aplicáveis a problemas práticos em geral, de modo a incluir situações em que as propriedades do solo e poropressão variam no interior do maciço. Para que esta consideração seja possível, os métodos utilizados adotam a divisão da superfície potencial de ruptura em um número arbitrário de fatias (lamelas), analisando as condições de equilíbrio das forças atuantes em cada uma delas, bem como a interação entre elas.

De acordo com Gerscovich (2016), o método das fatias é o mais utilizado em estudos de estabilidade de taludes por não apresentar restrições quanto a homogeneidade do solo, geometria do talude e tipo de análise (tensões efetivas ou totais). Deste modo, é possível realizar análises mesmo que o solo seja heterogêneo, existam imperfeições na geometria do talude, além de possibilitar a inclusão da poropressão na análise (Figura 9).

Figura 9: Forças atuantes em uma lamela.



Fonte: GEO SLOPE/W *apud* PACHECO, 2005.

Onde:

- W: peso da fatia.
 kW: força horizontal para incorporar efeitos sísmicos.
 N: força normal à base da fatia.

S:	força tangencial à base da fatia.
E ₁ , E ₂ :	componente horizontal das forças entre as fatias.
T ₁ , T ₂	componente vertical das forças entre as fatias.
D:	força aplicada na superfície.
b:	largura da fatia.
l	comprimento da base da fatia.
A ₁ , A ₂	forças hidrostáticas.

Abaixo é descrita a metodologia de cálculo para solos secos ou saturados (Equação 2)

$$S = \tau_{mob} l \quad (2)$$

Onde:

$\tau_{mob} = \frac{\tau}{FS}$	tensão cisalhante mobilizadora.
τ	tensão cisalhante resistente.
FS	fator de segurança.

Substituindo o valor de τ_{mob} presente na Equação 2 e deixando o valor de τ em termos dos parâmetros de resistência do solo (Equação 3):

$$S = \frac{\tau l}{FS} = \frac{l}{FS} [c' + (\sigma - u) \tan \varphi'] \quad (3)$$

Onde:

$\sigma = \frac{N}{l}$	tensão normal média na base da fatia.
u	poropressão atuante no centro da base da fatia.
c' φ'	parâmetro de resistência em termos de tensões efetivas.

Considerando a soma dos momentos igual a 0 em um ponto arbitrário, tem-se (Equação 4):

$$\sum Wx - \sum Sr - \sum Nf + \sum kW e \pm D d \pm \sum_{i=1}^2 A_i h = 0 \quad (4)$$

Onde x, r, f, e, d e h representam os braços dos momentos das diferentes fatias existentes no modelo.

Manipulando a equação 4 de modo a isolar a força tangencial à base da fatia (S) e substituindo na Equação 2, isolando o FS, é possível encontrar a seguinte igualdade (Equação 5):

$$FS_{momentos} = \frac{\sum[c'l r + (N - u l)r \tan \varphi']}{\sum W x - \sum N f + \sum kW e \pm D d \pm \sum_{i=l}^2 A_i h} \quad (5)$$

Considerando a soma das forças horizontais igual a 0 no ponto escolhido (Equação 6):

$$\sum (E_2 - E_1) - \sum N \sen \alpha + \sum S \cos \alpha - \sum kW - D \cos \omega \pm \sum_{i=l}^2 A_i = 0 \quad (6)$$

Assim como realizado na equação 3, isolando a força tangencial à base da fatia (S) e substituindo na equação 3, é possível encontrar a seguinte igualdade (Equação 7):

$$FS_{forças} = \frac{\sum c'l \cos \alpha + (N - u l) \tan \varphi' \cos \alpha}{\sum N \sen \alpha + \sum kW + D \cos \omega \pm \sum_{i=l}^2 A_i} \quad (7)$$

A partir da análise das Equações 5 e 7 acima, percebe-se que ambas possuem um número excessivo de incógnitas, configurando a análise de estabilidade em um problema indeterminado. Para resolver o problema, algumas hipóteses simplificadoras devem ser adotadas, sendo estas hipóteses que diferenciam os diversos métodos existentes na literatura (Bishop Simplificado, 1955; Janbu Simplificado, 1968; Morgenstern & Price, 1965; Sarma 1973, 1979; entre outros), sendo possível separá-los em dois grandes grupos, os métodos rigorosos e não rigorosos, como disposto no Quadro 3 e Quadro 4.

Quadro 3: Métodos de equilíbrio limite não rigorosos.

Método	Hipóteses	Comentários (Tipo de Superfície de Ruptura)
Fellenius (1927) (fatias)	Não Considera forças entre fatias.	(Circular)
Bishop Simplificado (1955) (fatias)	Resultante das forças entre fatias é horizontal.	(Circular) - n hipóteses sobre o ponto de aplicação da força normal e (n-1) sobre a magnitude das forças tangenciais entre fatias. FS determinado a partir da consideração do equilíbrio de momentos.
Janbu Simplificado (1968) (fatias)	Resultante das forças entre fatias é horizontal. Um fator de correção empírico f_0 é usado para levar em conta os efeitos das forças tangenciais.	(Qualquer) - Valores de f_0 sugeridos para condições de solos homogêneos. FS é determinado a partir do equilíbrio de forças.
Janbu Generalizado (1968) (fatias)	Localização da força normal entre fatias definida por uma linha de empuxo arbitrária.	(Qualquer) - n hipóteses sobre o ponto de aplicação das forças normais entre fatias. Posição da última não é usada, com o equilíbrio de momentos não sendo satisfeito na última fatia. FS determinado a partir do equilíbrio de forças e de momentos.

Fonte: De campos 1985.

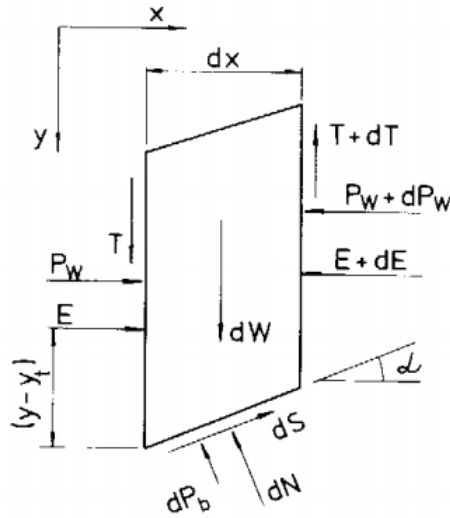
Quadro 4: Métodos de equilíbrio limite rigorosos.

Método	Hipóteses	Comentários (Tipo de Superfície de Ruptura)
Spencer (1967) (fatias)	Resultantes das forças entre fatias têm inclinações constantes através da massa do solo.	(Qualquer) - método semelhante ao de Morgenstern - Price com $f(x) = 1$
Morgenstern - Price (1965) (fatias)	Direção da resultante das forças entre fatias definidas usando uma função arbitrária $f(x)$. A parcela de $f(x)$ necessária para satisfazer o equilíbrio de forças e de momentos é calculada.	(Qualquer) - n hipóteses sobre o ponto de aplicação da força normal e (n-1) sobre a magnitude relativa das forças entre fatias. Uma incógnita λ é introduzida. Fatias são de espessura infinitesimal.
Sarma 1973 (fatias)	Resistência interna entre fatias é mobilizada. Distribuição das resultantes das forças tangenciais entre fatias definidas com base em uma função arbitrária. A porcentagem da função λ necessária para satisfazer o equilíbrio de forças e momentos é calculada.	(Qualquer) - n hipóteses sobre o ponto de aplicação das forças normais e (n-1) sobre a magnitude relativa das forças tangenciais entre fatias. Incógnita λ introduzida.
Sarma 1979 (cunhas)	Assume que a resistência ao cisalhamento é mobilizada nos lados de todas as cunhas. A inclinação das interfaces das cunhas é variada para produzir uma condição crítica de equilíbrio.	(Qualquer) - (n-1) hipóteses sobre o ponto de aplicação das forças normais ou das forças tangenciais entre cunhas e (n-1) sobre o valor relativo das forças entre cunhas. Solução obtida de um fator de aceleração crítico k_c .

Fonte: De Campos 1985.

Dentre os métodos de equilíbrio limite listados nos Quadros 3 e 4, destaca-se o método de Morgenstern & Price (1965) por ser considerado um método rigoroso aplicável a qualquer superfície. O método apresenta como características a divisão da possível área de ruptura em fatias infinitesimais, exigindo o auxílio de um computador para a sua utilização. As forças consideradas por esse método estão demonstradas na Figura 10.

Figura 10: Forças em uma fatia consideradas pelo método de Morgenstern & Price (1965).



Fonte: Fabrício (2006).

Onde:

P_w	pressões neutras nas laterais da fatia.
dP_b	resultante das pressões neutras na base da fatia.
dW	força peso da fatia.
T	força tangencial entre as fatias.
E	força normal entre as fatias.
dN	força normal na base da fatia.
dS	força cisalhante mobilizada na base da fatia.

A hipótese adotada por Morgenstern & Price (1965) para solucionar a indeterminação matemática é relacionar as forças interlamelares (T e E) a partir de uma função arbitrária $f(x)$:

$$T = \lambda f(x) E \quad (7)$$

Onde:

λ	constante a ser determinada por processo iterativo.
$f(x)$	função arbitrária.

De acordo com Morgenstern & Price (1965) arbitra-se para $f(x)$ a função de arco de seno, sendo a função que menos impacta no valor final do fator de segurança, sendo possível aplicar também funções $f(x)$ constantes, arco seno incompleto, trapezoidal ou outras.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área do estudo

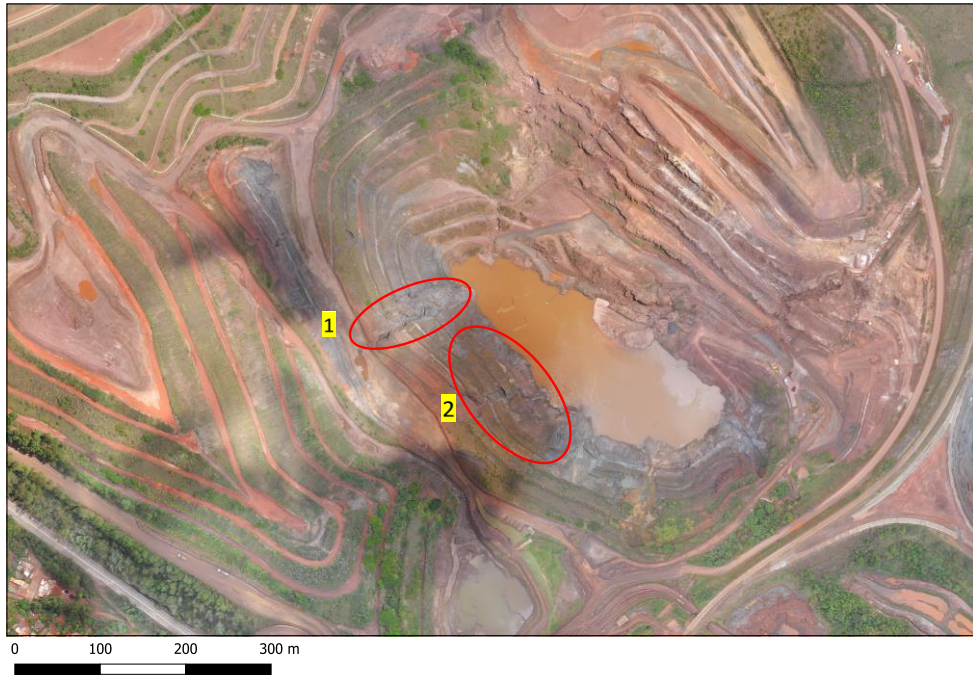
A área em estudo está localizada no interior de Minas Gerais, dentro da formação geológica do quadrilátero ferrífero, que compõe a região de maior produção nacional de minério de ferro. O complexo minerário em estudo, identificado neste trabalho como Mina A, é composto por diversas cavas a céu aberto, pilhas de estéril e barragens de rejeito, dentre eles, tem-se a Cava B e a Pilha de Estéril (PDE) C, objetivos de estudo deste trabalho. Ressalta-se que os nomes utilizados aqui são pseudônimos, uma vez que não houve autorização da empresa para a sua identificação, bem como dos locais de operação e suas respectivas condições de operação e/ou manutenção.

A Mina A tem histórico de operações desde meados de 1970. Nesta época, os procedimentos de escavação e deposição de estéril não seguiam padrões rigorosos, propiciando um cenário onde o surgimento de trincas, deformações e rompimentos localizados eram rotineiros. Após os acidentes na barragem de Fundão em Mariana-MG (2015) e na barragem do córrego do feijão em Brumadinho-MG (2019), foi observado um aumento no rigor dos órgãos fiscalizadores com relação à segurança, em destaque a Associação Nacional de Mineração (ANM), que aumentou a periodicidade de fiscalizações e exigência de evidências de estabilidade mais consistentes. Com estas mudanças, complexos minerários, como o caso da Mina A, que contém estruturas antigas com poucos documentos disponíveis, foram obrigadas a paralisar suas operações até a confirmação de segurança de suas barragens.

3.1.1. Cava B

A cava B encontra-se no momento paralisada para operação e, também, para sua própria manutenção, uma vez que não há indícios de que a movimentação de máquinas pesadas seja inofensiva à estrutura. Esta situação corrobora para a evolução de anomalias existentes, que no momento não podem ser tratadas. Na Figura 11, podem-se observar diversas anomalias por toda a estrutura. Circuladas em vermelho, encontram-se as duas anomalias presentes no talude oeste da cava. A Anomalia identificada com o número 1 caracteriza-se por uma erosão de grande porte, englobando todos os bancos da cava (Figura 12). A evolução desta anomalia compromete os acessos à estrutura, bem como pode causar instabilização ao seu redor, onde localiza-se a pilha de estéril C.

Figura 11: Imagem aérea da Cava B.



Fonte: Autor (2021).

Figura 12: Anomalia 1 na Cava B.



Fonte: Documentos internos (2020).

A Anomalia 2 caracteriza-se por erosões de diferentes portes, causada muito provavelmente devido à drenagem superficial ineficiente da cava, já que o sistema de drenagem superficial da cava é operacional, sendo somente inclinação da berma de 3% em direção ao pé do talude e 1% na direção longitudinal. Este tipo de drenagem é empregado em cavas devido ao dinamismo da estrutura, entretanto necessita de constante manutenção via máquina, neste momento impedida de transitar no local.

Estas erosões fizeram com que o ângulo do talude afetado se tornasse negativo, indicando ruptura iminente (Figura 13). Assim como a Anomalia 1 descrita acima, a evolução da situação pode causar uma possível instabilização na pilha de estéril, alvo de preocupação geotécnica, uma vez que é possível que aconteçam rupturas progressivas.

Figura 13: Anomalia 2 na Cava B.



Fonte: Documentos internos (2020).

A observação destas anomalias reforça a necessidade do conhecimento do real estado de estabilidade da cava. Apesar de não se tratar de instabilizações mecânicas, estas erosões podem ser sinais de que o nível do lençol freático na cava está próximo à superfície, hipótese que é justificada pelas eventuais surgências de água observadas no maciço e pela formação do lago no fundo da cava. Além da situação atual, existem registros de instabilizações anteriores causadas por recalques diferenciais dos bancos da pilha de estéril C, ao lado da cava.

3.1.2. Pilha de Estéril C

De acordo com documentos internos, a PDE C entrou em operação no final da década de 1990, com a finalidade de atender a demanda de disposição de estéril gerado pela Cava B. De acordo com o primeiro planejamento de lavra, foi estimado que esta pilha teria capacidade de armazenamento de estéril até o ano de 2005. Pela necessidade operacional de maximizar a utilização da pilha, foi elaborada e executada em 2005 uma proposta de expansão da pilha, elevando sua cota máxima até 1.180 m de altura, chegando à altura máxima de 80 m.

A deposição de estéril na PDE C ocorreu, até o início dos anos 2000, sem definição de espessura de bermas ou altura dos taludes, tendo lançamento do estéril a partir do procedimento de ponta de aterro. Esta prática não é mais utilizada na Mina A ou em qualquer outra da empresa.

Atualmente, a PDE C (Figura 14) encontra-se inativa devido ao atingimento da cota máxima de deposição licenciada e às novas diretrizes em relação à lavra da cava B. Para estruturas inativas, os dispositivos de drenagem superficiais tendem a ser definitivos (normalmente canaletas de concreto). Entretanto no caso da PDE C, o tipo de drenagem de berma da estrutura é operacional, assim como na Cava B, diferenciando somente na existência de decidas d'água de concreto.

Quanto à composição da pilha, documentos internos (relatórios de estabilidade da PDE C) relatam a partir de inspeções visuais, que a pilha é constituída de materiais com texturas variadas, desde argila até pedregulho grosso e blocos de rocha dessimétricos a métricos, tendo como principal material o filito, originado da cava B.

Figura 14: Vista geral da PDE C.



Fonte: Documentos internos (2017).

3.1.3. Interface Cava-Pilha

Devido às condições da Cava B e da PDE C, da evolução de anomalias de erosões, que sugerem um NA elevado, juntamente com o histórico de deposição na PDE C por ponta de aterro, o risco de rompimento desta área é considerável, devendo ter sua análise de estabilidade periodicamente revisada. Para a construção do modelo computacional desta interface, foi necessário o levantamento de uma série de parâmetros, como a topografia do local, o perfil

estratigráfico do solo, a determinação do NA, assim como os parâmetros do solo, tanto da cava, quanto da pilha.

3.2. Topografia e definição da seção crítica

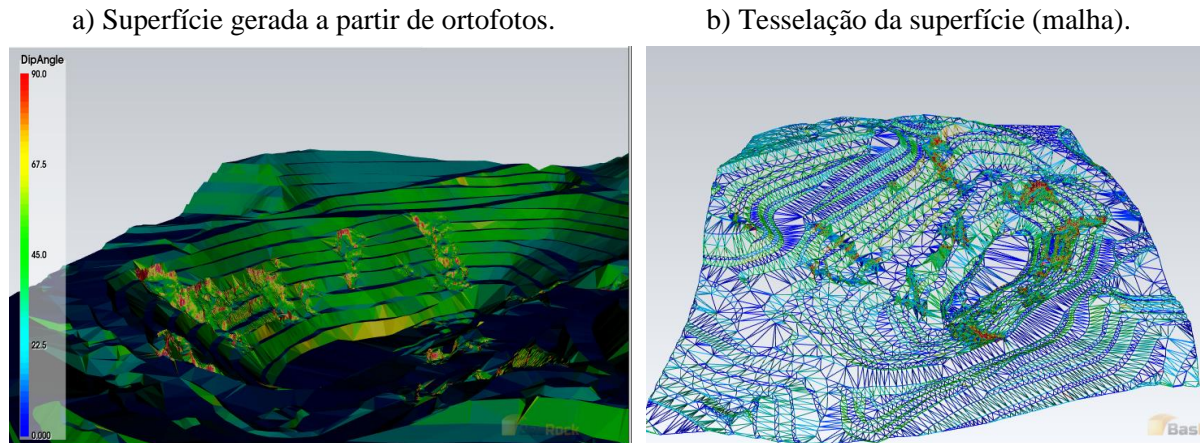
Para a obtenção da topografia da região, foi utilizado o método de mapeamento de superfícies via VANT (veículo aéreo não tripulado), conhecido como aerofotogrametria. Esta é uma prática comum dentro da Mina A, uma vez que cobre vastas áreas de maneira remota, rápida, precisa e totalmente segura, com um custo relativamente baixo.

De acordo com Coelho e Brito (2007), a fotogrametria é a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço-objeto, a partir de um conjunto não-vazio de imagens bidimensionais, chamado de espaço-imagem. O mesmo autor também cita a importância da obtenção de pelo menos duas imagens de um mesmo ponto durante o levantamento fotogramétrico, a fim de viabilizar a visão estereoscópica (tridimensional).

LOPES (2019) divide o processo de obtenção de coordenadas em três etapas principais: obtenção das fotos via VANT, leitura das fotos e análise das informações. A primeira etapa consiste em programar o voo do VANT e realizá-lo para obtenção das fotos. O responsável (operador do VANT) deve se atentar a altura de voo, que impacta diretamente na precisão das fotos e no gasto de bateria do aparelho. A segunda etapa consiste na junção destas fotos em uma foto de mesma qualidade e precisão, chamada de ortofoto. É nesta etapa que são corrigidas as distorções provenientes da câmera do VANT, são extraídas e interpretadas as informações da nuvem de pontos, que interpoladas geram a superfície de interesse.

Para o caso deste estudo, foi realizado todo o procedimento descrito acima para a interface da Cava B e da PDE C, resultando nas imagens abaixo, visualizadas a partir do software de beta livre GEM4D da empresa BasRock (Figura 15).

Figura 15: Mapeamento via VANT.

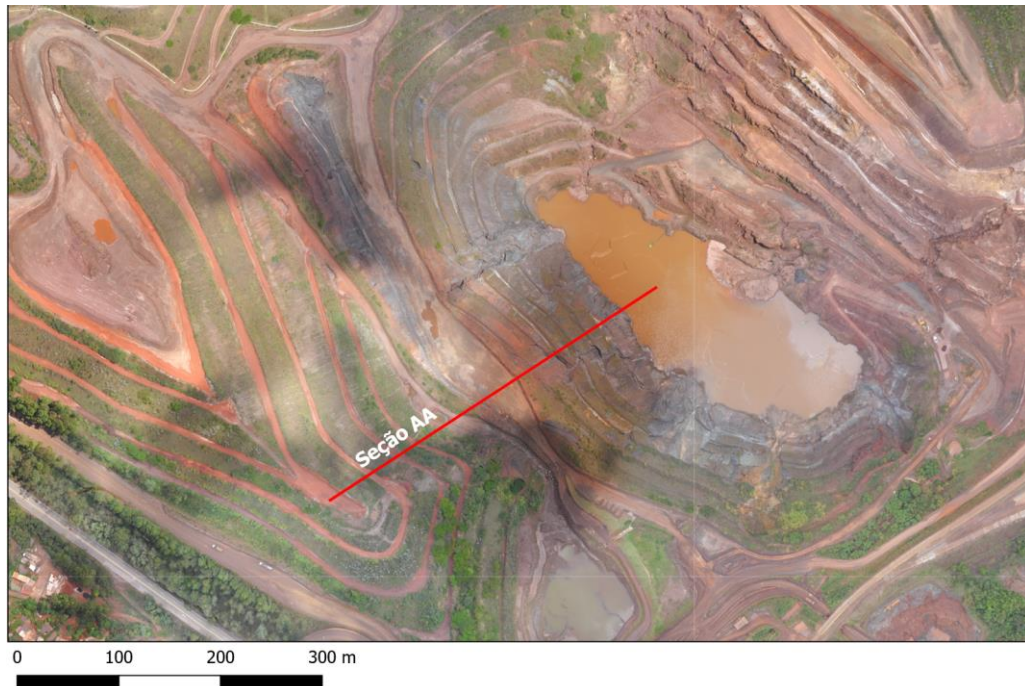


Fonte: Documentos internos (2020).

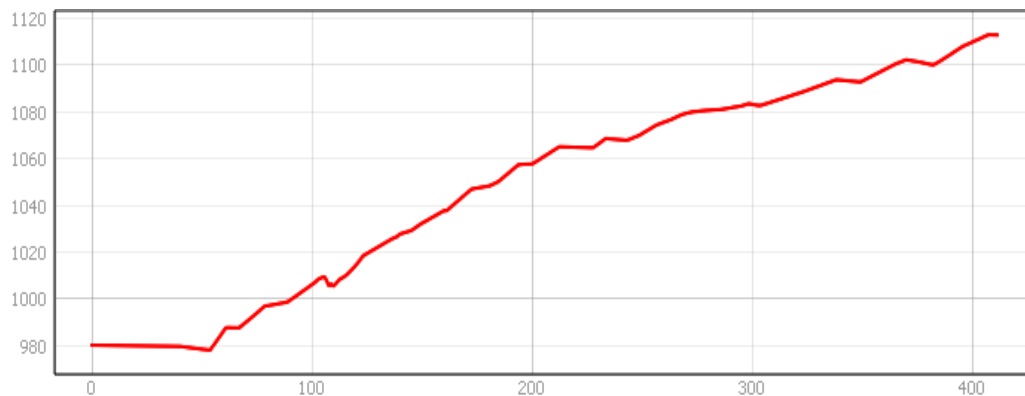
Como observado na Figura 15, a realização do mapeamento via ortofoto gera uma superfície muito próxima do real, reproduzindo as anomalias e as imperfeições provenientes da estrutura. Deste modo, a utilização deste método para obtenção da seção de análise traz maior confiabilidade nos resultados, ao invés da simples obtenção das cotas individuais de cada banco. Também deve-se atentar para a angulação dos taludes, visualmente próximos de 45° , até mesmo os da pilha, que são supostamente solos movimentados sem compactação adequada.

A partir da criação da superfície, foi utilizado do software livre de geoprocessamento Quantum GIS (QGIS) para obter a seção de estudo de estabilidade. Foi utilizada a seção que representa a maior proximidade entre a Cava B e a PDE C para análise. A escolha desta seção para estudo foi definida a partir da disponibilidade de informações do local, distribuição de instrumentos para determinação do NA e histórico de recalques e trincas no local (Figura 16).

Figura 16: Definição da seção AA.
a) Vista superior.



b) Visão em corte.



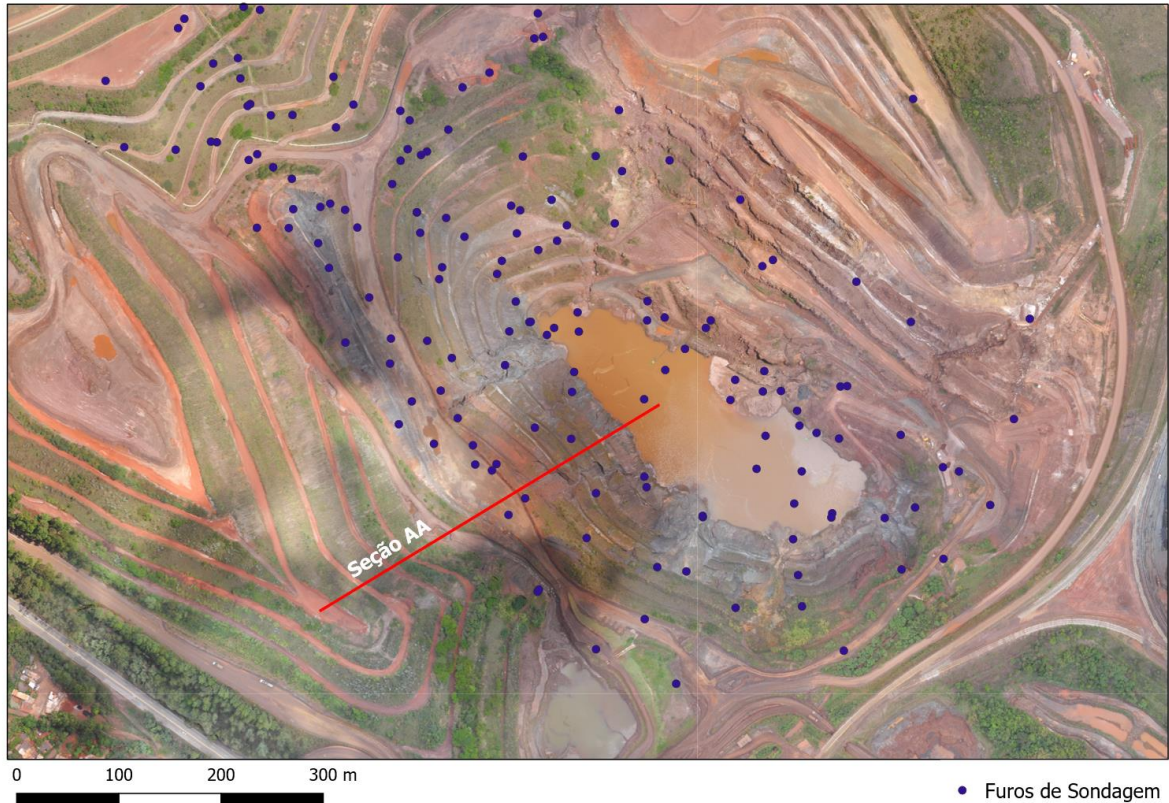
Fonte: Autor (2021).

3.3. Perfil estratigráfico do solo

No âmbito da mineração, a realização de sondagens do tipo rotativa diamantada é uma prática muito comum, uma vez que o conhecimento do solo está diretamente ligado com a viabilidade econômica do empreendimento (SAGA CONSULTORIA, 2020). A realização deste tipo de sondagem permite a determinação do perfil estratigráfico do solo, bem como a determinação de parâmetros químicos de interesse (teor de ferro, por exemplo), por meio da extração de corpos de prova para análise em laboratório (WEBBER, 2008 *apud* DE CARVALHO, 2014).

Na Mina A, existem diversas campanhas de sondagem datadas desde 1976 até a data atual, identificadas no mapa (Figura 17).

Figura 17: Localização de pontos de sondagem na Cava B.

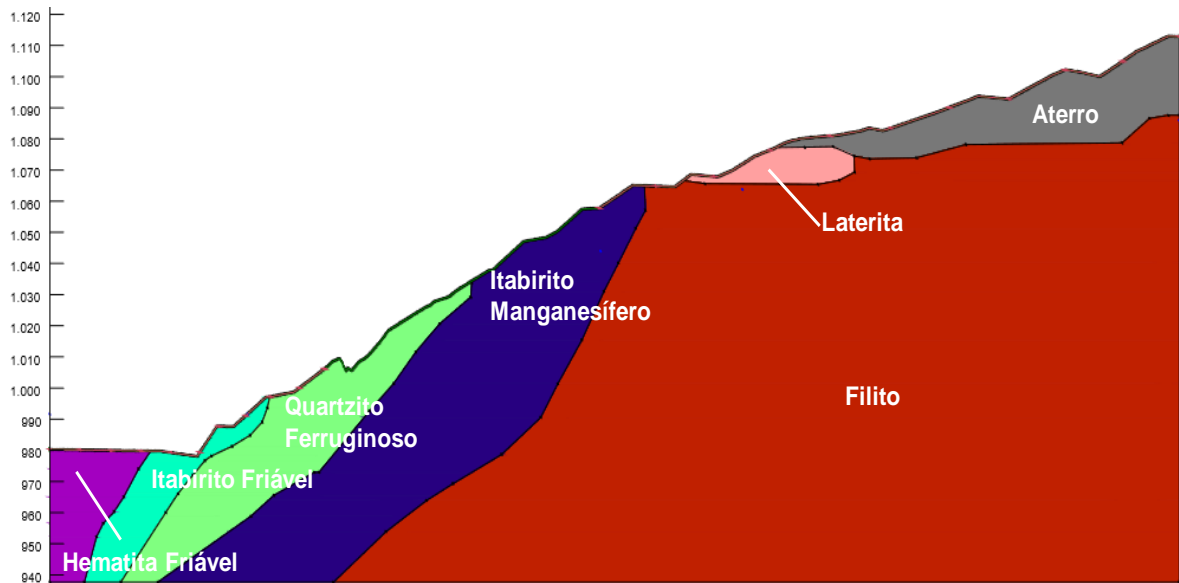


Fonte: Autor (2021).

É notável o grande número de sondagens distribuídas por todo o território da cava. No entanto, não existem sondagens na PDE C, devido, muito provavelmente, ao desinteresse econômico do material ali depositado. Logo, enquanto é possível determinar o perfil estratigráfico do solo da Cava B de maneira precisa, o solo da PDE C fica como uma incógnita, sendo classificado vagamente como estéril. Como citado no item 3.1.2, tem-se estimativas da origem do solo ali depositado, mas estas informações não passam de observações apontadas em relatórios antigos, não existindo dados que comprovem quaisquer informações.

O perfil estratigráfico da seção de estudo disposto na Figura 18 foi obtido por meio de relatórios anteriores de estabilidade das estruturas analisadas neste trabalho.

Figura 18: Perfil estratigráfico do solo.



Fonte: Documento internos (2020)

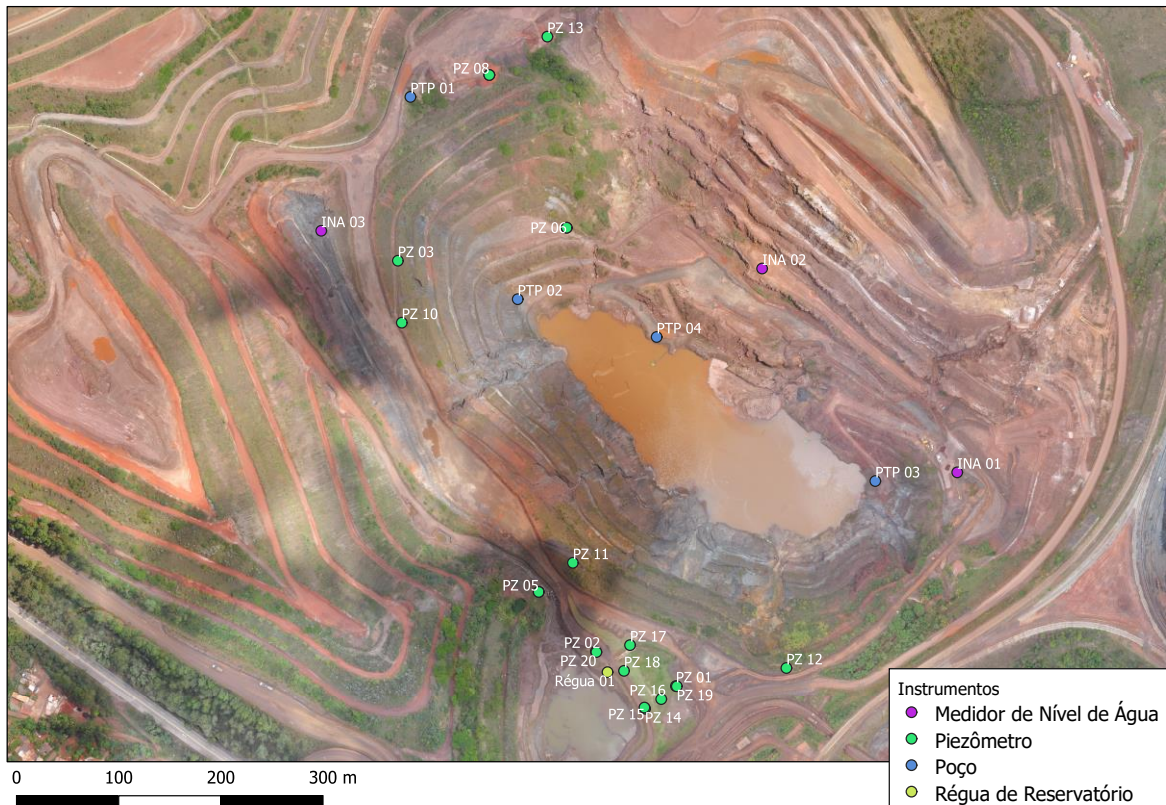
3.4. Determinação do nível do lençol freático

A assertividade na definição do lençol freático é determinante para a confiabilidade da análise de estabilidade a ser realizada, uma vez que o aumento do nível d'água (NA) pode desencadear a instabilização da estrutura. Deste modo, foi realizada uma abordagem mais conservadora, considerando o pior cenário possível, a fim de assegurar que até mesmo em períodos que a precipitação seja intensa, a estrutura permaneça estática.

Para a determinação do NA na seção escolhida para este trabalho, foram utilizados dados de instrumentos de nível de água e piezômetros existentes na estrutura e da cota do lago de fundo da cava. Foram considerados somente os instrumentos operantes nos anos de 2019 e 2020, que correspondem ao período no qual a cava esteve interdita.

Os instrumentos existentes na área de interesse deste estudo estão distribuídos pela área de estudo segundo a Figura 19.

Figura 19: Instrumentos operantes.



Fonte: Autor (2021).

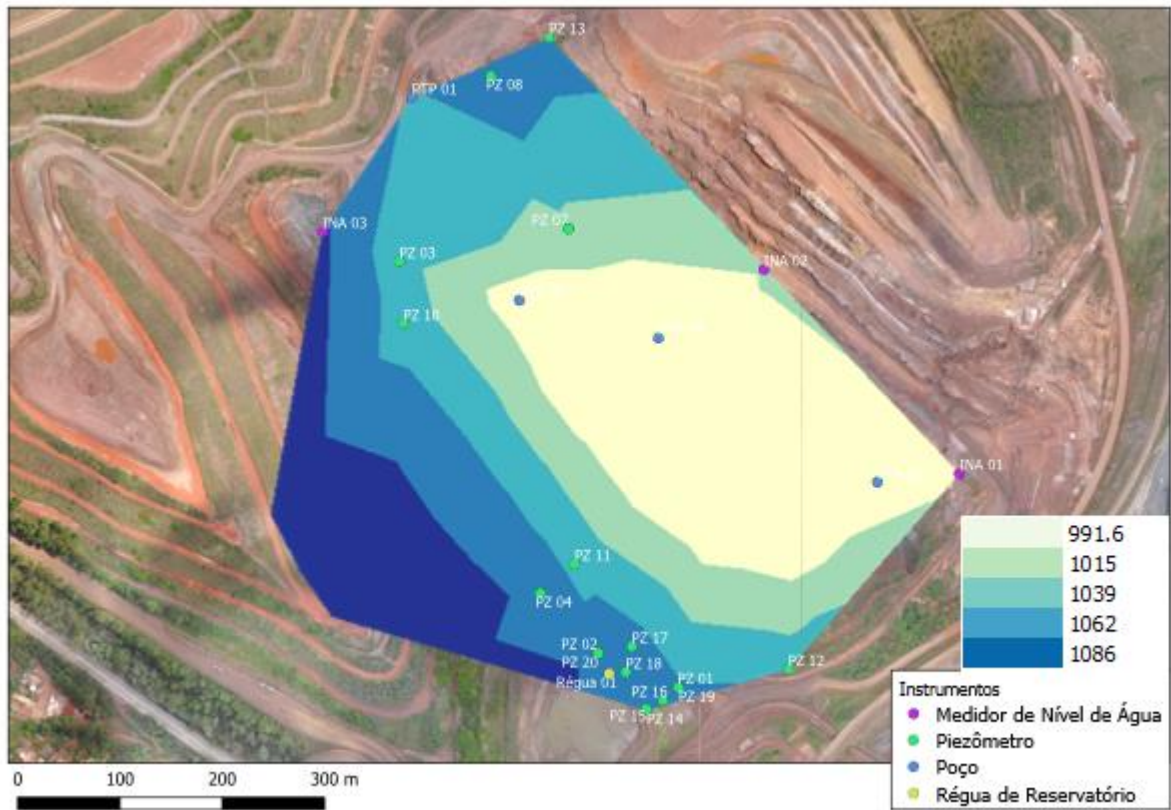
Como pode ser observado na Figura 19, não existem instrumentos locados nas bermas da PDE C. Deste modo, para obtenção do NA na pilha, foram consultados documentos internos (relatórios de inspeção visual na PDE C), constatando a ausência de surgências na pilha. Deste modo, devido à ausência de maiores informações, foi considerado que o NA está na cota da fundação, prática também adotada pelas análises de estabilidade realizadas pela Mina A.

As leituras destes instrumentos estão dispostas no APÊNDICE (Tabela 5). É possível observar pequena amplitude entre os valores históricos dos instrumentos, exceto dos poços tubulares profundos. Isso é devido à natureza do instrumento, sendo que as cotas mais altas foram obtidas com o poço desligado, obtendo o NA estático, enquanto as cotas mais baixas foram obtidas com os poços ligados, obtendo então o NA dinâmico.

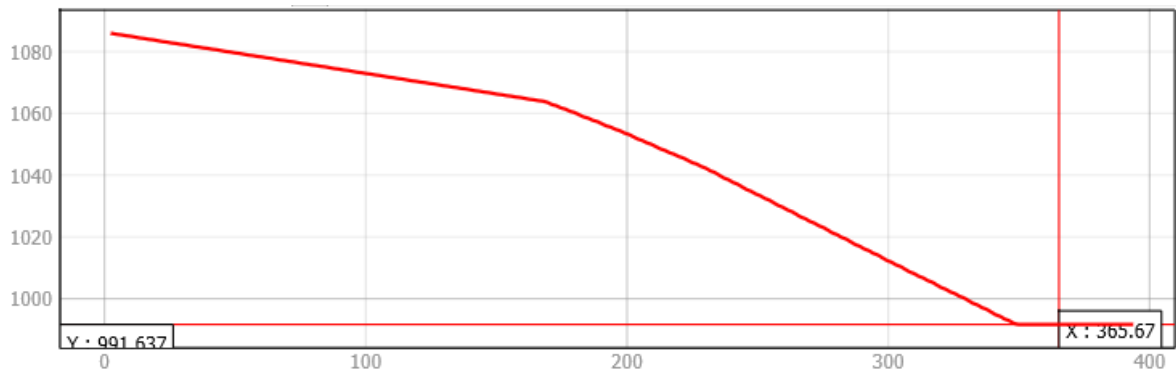
O NA na cava pôde ser determinado a partir da ferramenta de interpolação, do software livre Quantum GIS, por meio do método de interpolação linear, devido as escassas informações da cota de NA por toda a área de estudo. O mapa potenciométrico pode ser observado na Figura 20.

Figura 20: Deteminação do NA.

a) Mapa potenciométrico.



b) NA em corte na seção de estudo.



Fonte: Autor (2021).

3.5. Análises paramétricas

Primeiramente teve-se como objetivo reproduzir a análise realizada pelos profissionais da Mina A a fim de validar o modelo numérico utilizado. Após, foram realizadas análises de estabilidade com parâmetros reais do solo. Para a realização das análises de estabilidade, foi utilizado o método de Morgenstern–Price (1965) com o auxílio do software de análise de estabilidade do solo SLOPE/W (2018) versão teste gratuita, da empresa Geostudio, critério de

ruptura de Morh-Coulumb e ruptura circular, uma vez que a seção analisada é composta de material muito alterado (solo).

3.5.1. Validação da modelagem numérica

Até meados de 2020, não havia informações detalhadas sobre a origem dos dados de resistência do solo das cavas da Mina A. Para a realização das análises de estabilidade eram utilizados parâmetros do solo retirados da literatura, de minas vizinhas e a partir da experiência dos profissionais que estavam realizando o estudo. Deste modo mesmo que determinada a segurança na seção estudada, não havia confiabilidade no resultado.

Como a interface da Cava B com a PDE C foi, e ainda é, alvo de preocupação dentro da Mina A, no primeiro momento foi realizada uma análise de estabilidade utilizando os mesmos parâmetros do solo estimados que foram utilizados em análises anteriores, a fim de validar o modelo utilizado, comparando os resultados obtidos com os disponíveis nas análises de estabilidade anteriores realizadas pelos profissionais da Mina A.

Como premissas para a realização da análise de estabilidade, foram definidos: NA conforme determinado no item 3.4, parâmetros do solo estimados com base na literatura (Tabela 2) e inexistência de trincas de tração.

Tabela 2: Parâmetros do solo utilizados na Mina A

Tipo de Solo	γ_{nat} (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Φ' (°)
Aterro	18,0	10	28
Filito	20,0	35	30
Hematita Friável	33,0	70	34
Itabirito Friável	22,0	122	32
Itabirito Manganífero	26,0	35	32
Laterita	24,0	50	40
Quartzito Ferruginoso	26,0	35	36

Fonte: Autor (2021)

Nos documentos disponibilizados pela Mina A não é especificado se os valores da Tabela 2 são de parâmetros efetivos ou totais.

Como parâmetros numéricos, foram utilizados:

- Profundidade mínima da superfície de pesquisa: 0,1 metro
- Número de fatias: 150
- Número máximo de iterações: 1000
- Diferença tolerável em FS: 0,0001
- Método de busca: Buscar raiz
- Diferença tolerável entre FS inicial e convergido: 3
- Número máximo de iterações para calcular lambda convergido: 20
- Lambda máximo absoluto: 2

3.5.2. Parâmetros de resistência dos materiais

Em meados de 2020, foi realizada em toda a Mina A uma campanha de ensaios dos solos das cavas, a fim de se entender melhor o comportamento geotécnico das estruturas. Nesta campanha as pilhas não foram contempladas.

Foram retirados trinta e seis (36) amostras distribuídos por toda a Mina A, e realizados em cada um deles, salvo poucas exceções, ensaios para determinação de granulometria, massa específica dos sólidos, densidade aparente, limites de Atterberg, permeabilidade de carga variável e ensaios para determinação das resistências mecânicas, sendo utilizado o ensaio triaxial drenado para obtenção destes parâmetros. Com a realização destes ensaios, foi possível a obtenção dos parâmetros de resistência de todos os solos presentes na seção de estudo deste trabalho, dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de resistência efetivos do solo ensaiados.

Tipo de Solo	γ_{nat} (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Φ' (°)
Filito	17,57	62,9	23,6
Hematita Friável	29,63	115,3	35,3
Itabirito Friável	30,70	10,8	32,6
Itabirito Manganosífero	14,24	84,8	20,6
Laterita	21,30	77,8	31,6
Quartzito Ferruginoso	18,30	50,2	29

Fonte: Autor (2021).

A comparação entre os parâmetros ensaiados e estimados está disposta na Tabela 4, e foi feita a partir da divisão dos parâmetros ensaiados pelos estimados; deste modo, quanto maior o valor, mais superestimados foram os parâmetros do solo.

Tabela 4: Comparação entre os valores ensaiados e estimados.

Tipo de Solo	γ_{nat} (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Φ' (°)
Filito	88%	180%	79%
Hematita Friável	90%	165%	104%
Itabirito Friável	140%	9%	102%
Itabirito Manganêsífero	55%	242%	64%
Laterita	89%	156%	79%
Quartzito Ferruginoso	70%	143%	81%

Fonte: Autor (2021).

É possível observar que o peso específico dos solos Itabirito Friável e Itabirito Manganêsífero apresentaram resultados bastante distintos dos estimados. Em relação à coesão e ângulo de atrito, houve uma variação considerável em todos os materiais, evidenciando a necessidade de se conhecer os reais parâmetros, enquanto a maioria dos valores de coesão foram maiores de 100% (a favor da segurança), os valores de ângulo de atrito obtidos experimentalmente foram menores que os estimados.

Após a determinação dos parâmetros ensaiados dos solos presentes na interface entre a Cava B e a PDE C, por meio de ensaios triaxiais, se mostra necessária a realização de outra análise de estabilidade, uma vez que foi observada uma grande variação entre valores estimados e obtidos por meio de ensaios. A fim de evidenciar as diferenças causadas pelo desconhecimento da verdadeira resistência dos solos presentes na seção, a análise de estabilidade foi realizada mantendo todas as premissas adotadas inicialmente, alterando somente os materiais.

3.5.3. Rebaixamento do NA

As análises de estabilidade foram realizadas admitindo-se como hipótese o máximo nível de água possível, combinando as maiores leituras dos instrumentos em um período de dois anos, bem como considerando os poços de rebaixamento desligados.

A fim de propor uma solução de curto prazo, foi realizada uma análise de estabilidade considerando o rebaixamento do nível de água em 30 m, medida que será necessária para o retaludamento da área ou para avanço da lavra. Para esta análise de estabilidade, foram utilizados como premissas: os parâmetros do solo ensaiados, inexistência de trincas de tração ou cargas externas, NA rebaixado em 30 metros em relação ao calculado no item 3.4.

3.5.4. Considerações adicionais sobre estabilidade

Além das análises de estabilidade variando o NA, é considerada boa prática a realização de análises sísmicas em pilhas de estéril, apesar da NBR 13029 (ABNT, 2017) não a recomendar diretamente. Para análises deste tipo utilizam-se as recomendações da NBR 13028 (ABNT, 2017) - “Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos”, utilizando o critério de sismo máximo provável (MCE – *Maximum Credible Earthquake*).

No entanto, a magnitude de tremores de terra em todo o Brasil é baixa, devido ao fato do país se localizar ao centro da placa tectônica sul-americana. Deste modo, os tremores de terra detectados são originados de falhas geológicas, costumeiramente de menor magnitude. Além disso, devido à proximidade em que a PDE C se encontra da Cava B, os tremores de terra originados por falhas geológicas são ínfimos comparados aos gerados por desmontes de rocha e trânsito de máquinas pesadas, cenário comum em frentes de lavra, como na Cava B.

Neste sentido, não se justifica a realização de uma análise sísmica sem que sejam consideradas as variáveis locais do empreendimento. No entanto, a consideração de desmontes de rocha ou trânsito de veículos pesados contradiz as hipóteses adotadas em todas as análises de estabilidade realizadas neste trabalho, uma vez que a Mina A se encontra, no momento, impedida de operar, como explicitado no tópico 3.1.1.

4. RESULTADOS

A partir das informações levantadas sobre as estruturas Cava B e PDE C, foram realizadas análises de estabilidade na seção determinada, variando os parâmetros de nível de água e resistência do solo, a fim de determinar a real situação de estabilidade da seção, cotejá-la com a estimada anteriormente e analisar possíveis cenários futuros.

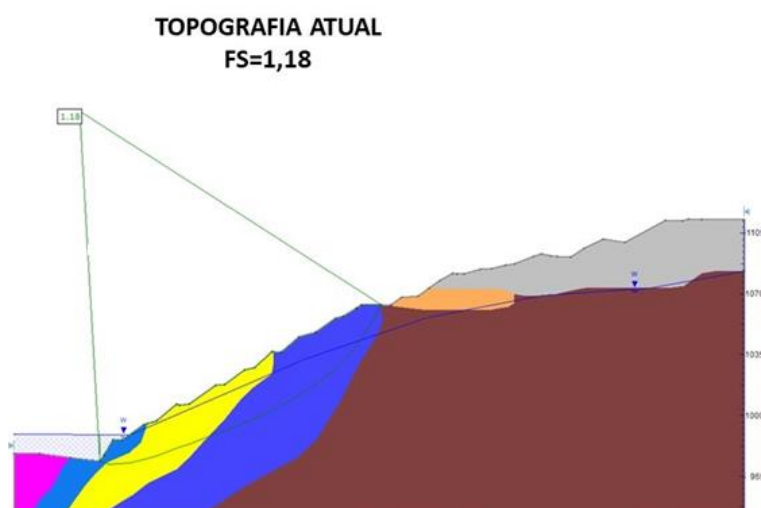
Os resultados foram comparados com as normas vigentes NBR 11682 (ABNT, 2009), NBR 13029 (ABNT, 2017) e os documentos normativos da Mina A. Para utilização da NBR 11682 (ABNT, 2009) foi considerada estrutura de impacto baixo de danos materiais e pessoas, portanto, de acordo com a Tabela 1, FS mínimo igual a 1,2.

Foram utilizados os mesmos parâmetros numéricos citados no tópico 3.5.1 para todas as análises de estabilidade realizadas.

4.1. Análise empregando parâmetros estimados (validação do modelo numérico)

O objetivo da realização da análise de estabilidade utilizando os parâmetros estimados do solo foi de comparar o modelo desenvolvido neste trabalho com a análise previamente realizada pela Mina A, disposta na Figura 21, validando o modelo numérico para as análises seguintes.

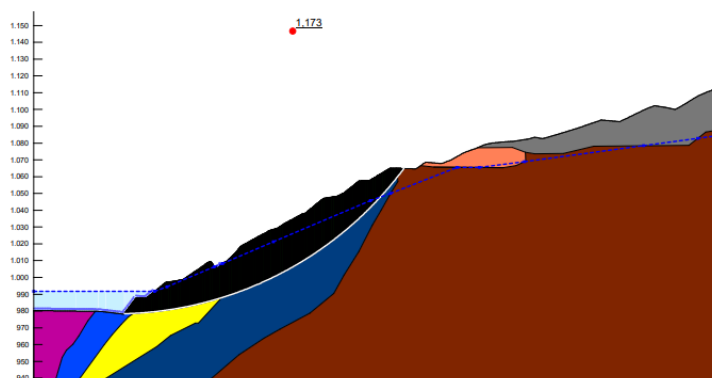
Figura 21: Análise de estabilidade disponibilizada pela Mina A



Fonte: Documentos internos (2020)

Os resultados da análise de estabilidade com os parâmetros do solo estimados estão dispostos na Figura 22.

Figura 22: Análise de estabilidade utilizando os parâmetros do solo estimados.



Fonte: Autor (2021).

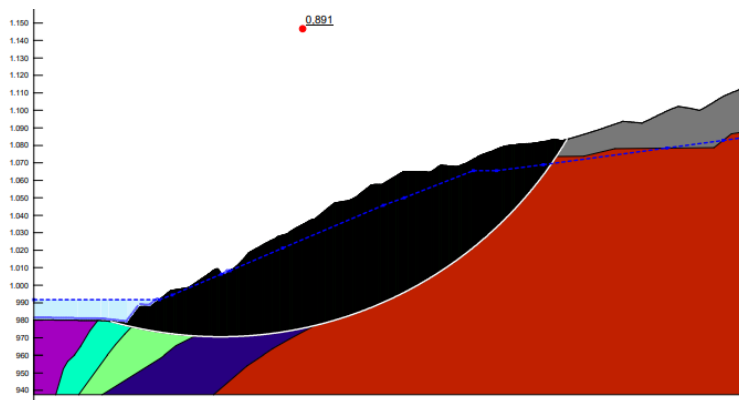
Observa-se que a seção de ruptura crítica (indicada em preto) determinada na análise possui fator de segurança (FS) de 1,173. Este valor está fora dos padrões de segurança estabelecidos pela NBR 11682 (ABNT, 2009), pela NBR 13029 (ABNT, 2017) e fora do aceitável pela Mina A, que é de 1,3 para taludes operacionais e 1,5 para taludes em geometria final. Além disso, é possível observar que a seção crítica não passa pelo aterro (representado pela cor cinza), sendo um problema de estabilidade majoritariamente da cava.

Ao comparar a Figura 22 com a Figura 21, é possível observar que tanto a superfície de ruptura da seção quanto o fator de segurança são próximos, sendo de 1,173 obtido neste trabalho e 1,18 obtido pela Mina A. Desde modo, pode-se dizer que o objetivo de validar o modelo foi cumprido, garantindo maior confiabilidade às análises a seguir.

4.2. Análise empregando parâmetros obtidos experimentalmente

Foi realizada uma análise de estabilidade alterando somente os parâmetros de resistência do solo para aqueles obtidos a partir de ensaios triaxiais dispostos na Tabela 4. Os resultados desta análise estão dispostos na Figura 23.

Figura 23: Análise de estabilidade com solos ensaiados.



Fonte: Autor (2021).

Foi observada uma redução no fator de segurança após a mudança dos parâmetros dos materiais, indicando que a redução dos valores de ângulo de atrito governou a resistência do solo (Tabela 5). O FS menor que 1, sem significado físico, indica que as forças cisalhantes mobilizadoras são maiores que as resistentes e que a seção se encontra na iminência de ruptura. O valor de FS menor que 1 é obtido devido às limitações do método utilizado, bem como possível inconsistência dos parâmetros do solo utilizados na análise com os parâmetros obtidos experimentalmente.

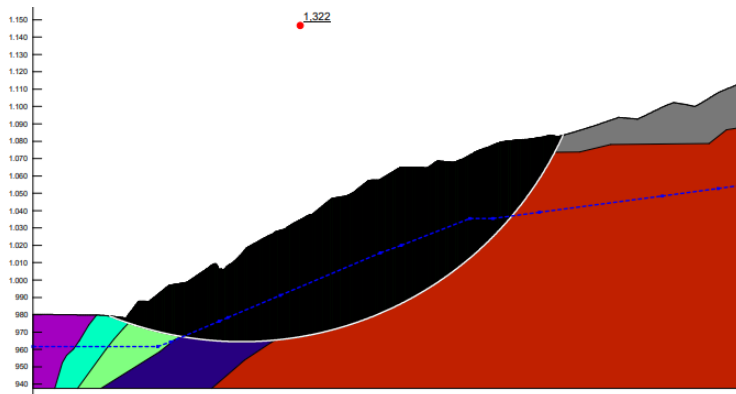
Como explicado no tópico 3.5.2, não existe caracterização do solo da PDE C, sendo representado e entendido como “aterro”. Este fator, associado a baixa precisão na estimativa de parâmetros do solo, deixa uma grande incerteza em relação a real segurança destas estruturas, fazendo com que a investigação do solo da PDE C seja uma prioridade. Apesar deste resultado não conter significado físico, o baixo FS justifica o histórico de movimentações no local, bem como aparecimento de trincas de tração no período de chuvas.

Observa-se também que a superfície crítica de ruptura foi alterada. No primeiro momento havia indícios de ser um problema de geometria majoritariamente da cava. A utilização dos parâmetros obtidos experimentalmente do solo (exceto aterro) leva à comprovação da hipótese inicial, de que a proximidade das estruturas é um risco de estabilidade.

4.3. Análise considerando o rebaixamento do NA

A análise de estabilidade realizada no tópico 4.2 exige alguma ação para aumento da segurança da interface cava-pilha analisada. Deste modo, foi proposto o rebaixamento do NA em 30 m, uma vez que já existem poços de rebaixamento no local. Os resultados desta análise estão dispostos abaixo (Figura 24):

Figura 24: Análise de estabilidade considerando NA rebaixado.



Fonte: Autor (2021).

Como se pode observar, o rebaixamento do NA em 30 metros culmina no aumento do FS para 1,316. Cotejando com as prerrogativas da NBR 11682 (ABNT, 2009), afirma-se que o resultado é suficiente para o cenário atual da estrutura. No entanto, este mesmo resultado seria insatisfatório em um cenário onde o risco material não seja baixo (em caso de retorno da operação, por exemplo).

Em relação a NBR 13029 (ABNT, 2017) referente a pilhas de estéril, este fator de segurança só seria válido caso o cenário de NA rebaixado em 30 metros fosse considerado crítico, sendo que a possibilidade de rebaixamento do NA depende da quantidade e da capacidade dos poços. Os documentos internos da Mina A relatam como aceitável o FS mínimo de 1,3 para taludes operacionais e de 1,5 para taludes não operacionais. Como a cava B não se encontra em sua forma geométrica final (*final pit*), ou seja, considera-se a cava operante (mesmo que esteja interdita), o FS obtido na Figura 24 é aceitável.

No entanto, como apresentado nos tópicos 3.1.1 e 3.1.2, recomenda-se que seja feito um cuidadoso retaludamento da estrutura, bem como correção da drenagem superficial da estrutura, para evitar a reincidência das erosões observadas na cava. Foi observado nas análises realizadas que a presença da pilha pode reduzir o FS global da estrutura, uma vez que a seção crítica passa pelo aterro.

É importante ressaltar que os materiais do aterro da pilha não foram ensaiados, logo se mantiveram os mesmos em todas as análises realizadas neste trabalho. Visto que a PDE C é a maior fonte de incertezas de toda a estrutura, recomendam-se maiores investigações geotécnicas nesta estrutura.

5. CONCLUSÕES

No contexto da mineração, a engenharia geotécnica assume um papel cada vez mais importante nas operações e planejamento de mina, principalmente no que se refere a análise de estabilidade das estruturas geotécnicas, sendo de responsabilidade do engenheiro geotécnico assegurar que o acesso aos locais somente seja feito caso haja segurança suficiente para todos os envolvidos no empreendimento. Para que o profissional responsável seja capaz de analisar a segurança das estruturas de maneira eficiente, é fundamental que sejam conhecidas as condições do subsolo local.

As principais conclusões deste trabalho são:

- a investigação geotécnica é de suma importância e reflete diretamente na determinação do fator de segurança das estruturas, comprometendo as tomadas de decisão.
- as ferramentas computacionais são de grande ajuda no desenvolvimento de projetos geotécnicos de grande precisão. Como exemplo, tem-se a determinação da topografia das estruturas (aerofotogrametria), a determinação do nível de água da cava (interpolação de medições históricas) e a realização da análise de estabilidade (método de equilíbrio limite rigoroso).
- o desconhecimento dos parâmetros do solo, bem como a escassez de instrumentos para determinação do NA, prejudicam a determinação do FS. A partir do momento que foram realizadas análises com os parâmetros ensaiados, ficou evidente a contribuição da carga de solo extra promovida pela proximidade da pilha de estéril da cava, com a redução de 24,04% no FS encontrado.
- o rebaixamento do NA proposto aumentou em 32,60% o FS, caracterizando a estabilidade do talude como aceitável.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se que as análises de estabilidade sejam refeitas com parâmetros do solo da pilha ensaiados, bem como com dados mais assertivos em relação aos instrumentos de aferição de NA. Recomenda-se também que sejam adotados métodos de análise de estabilidade mais refinados, utilizando a metodologia de tensão-deformação.

REFERENCIAS

ABRAMSON, Lee W. et al. **Slope Stability and Stabilization Methods**. 2ª ed. Estados Unidos da América, 2001.

ABRÃO, P. C.; OLIVEIRA, S. L. **Mineração**. São Paulo, ABGE. p. 431-438, 1998.

ADONES, R. **Curso de Especialização em Lavra de Minas a Céu Aberto** – Métodos de Lavra a Céu Aberto. Programa de Pós-graduação – Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará, 2019.

DE AGUIAR, M. F. P. **Estudos Geotécnicos** | Investigação, Instrumentação e Monitoramento Geotécnico. INBEC Pos-Graduação, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: **Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: **Mineração** – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13029: **Mineração** – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro, 2017.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, v.2. p. 721-733, 1992.

BORCHARDT, N. **Análise da estabilidade de taludes por retroanálise do rio Paute**: Aplicação nos estudos construtivos da usina hidroelétrica Mazar – Equador. Dissertação de Doutorado – Universidade Federal do Paraná, 2012.

COELHO, L.; BRITO, J. **Fotogrametria digital**. 2. ed. Rio de Janeiro: EDUERJ, 196 p, 2007.

CURI, A. **Lavra de Minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

CURI, A. **Minas a céu aberto**: planejamento de lavra. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

DA CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras**: casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo: Oficina de textos, 1996.

DE CAMPOS, T. M. P. **Análise de Estabilidade: Métodos, Parâmetros e Pressões Neutras**”. Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Civil, PUC/RJ, Rio de Janeiro, 1985.

DE CARVALHO, R. F. **Análise da Eficiência da Sondagem Rotopercussiva na Jazida de Ferro de Serra Sul, Serra dos Carajás – Pará**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

FABRÍCIO, J. V. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções**. Dissertação de Mestrado – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.

FREU, P. H. A. **Estudo para Projeto de Estabilização de uma Encosta do Morro da Glória II, Angra dos Reis – RJ**. Projeto de graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica, 2012.

GEM4D. Software for Geotechs. Versão 1.8.4.4. Disponível em <<https://www.basrock.net/gem4d>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2021.

GEOSLOPE. The modeling software for geo-engineers and earth scientists. Versão 2018 R2. Disponível em: <<https://www.geoslope.com/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2021.

GERSCOVICH D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de textos p. 15 – 34, 2016.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Blucher, 1983.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The Landside handbook – A guide to understanding landsides**. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129p, 2008.

HUALLANCA, R. E. Z. **Mecanismos de Ruptura em Taludes Altos de Mineração a Céu Aberto**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

LOPES, E. **Entenda como a evolução dos drones influenciou a fotogrametria na área de Geociências**. 2019. Disponível em: <<https://blog.ipog.edu.br/engenharia-e-arquitetura/fotogrametria/>>. Acesso em: 05 abr. 2021.

McCARTER, M. K. **Design and Operating Considerations for Mine Waste Embankments**. Source: Surface Mining, p. 890 – 899, 1990.

MARTINS, D. O. **Monitoramento geodésico de estruturas por meio do método multipolar de aproximações sucessivas e de redes topográficas espaciais**. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes da EESC-USP – Escola de Engenharia de São Carlos – São Paulo, 2019.

MORGENSTERN, N R.; PRICE, V. E. **The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces**. Technical Notes, pp. 79-93, 1965.

PACHECO, P. G. M. **Análise Numérica do Fluxo e da Estabilidade de uma Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre**. Dissertação de Mestrado – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

PARRA, Andrés. et al. **Open pit mine planning considering geomechanical fundamentals**. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2017.

Quantum GIS. Equipe de Desenvolvimento QGIS (2021). Sistema de Informações Geográficas QGIS. Projeto da Fundação Geoespacial de Código Aberto. Versão 3.0.3 Girona. Disponível em: <https://qgis.org/pt_BR/site/>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2021.

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. Rudney C. Queiroz. --São Paulo: Blucher, 2016.

REIS, R. C. **Estudo de Estabilidade de Taludes da Mina de Tapira-MG**. Dissertação de Mestrado – Programa de pós-graduação em geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

SAGA CONSTRUTORA. **Sondagem na Mineração: Métodos e Equipamentos**. Disponível em: <https://sagaconsultoria.com/sondagem-na-mineracao-metodos-e-equipamentos/>. Acesso em 06 de abril de 2021.

SILVA, M. J. F. **Análise de Estabilidade de Taludes Pelo Método de Equilíbrio Limite Geral**. Mestrado integrado em Engenharia Civil – 2012/2013 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2013.

SOUSA, Rafaela. **Mineração**; Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/mineracao.htm>>. Acesso em 04 de abril de 2021.

TERZAGHI, K. **Mechanisms of Landslides**. The Geological Society of America – Engineering Geology (Berkey), pp. 83-123, 1950.

THÁ, P. C. Estudo das Condições de Fluxo pela Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu. Dissertação de Mestrado – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC, 1978.

APÊNDICE

Tabela 5: Instrumentação disponível da Cava B e Barragem de sedimentos da PDE C

Instrumento	Tipo	Local de instalação	Data de instalação	Cota mínima histórica (m)	Cota máxima histórica (m)	Cota máxima no período (m)	Cota Média Histórica(m)
INA 01	Indicador de nível d'água	Cava	01/09/16	987,13	1005,96	1005,96	993,65
INA 02	Indicador de nível d'água	Cava	07/09/17	1011,74	1013,90	1013,90	1012,83
INA 03	Indicador de nível d'água	Cava	12/03/12	1054,05	1070,11	1070,11	1065,23
PZ 01	Piezômetro	Cava	24/03/05	1046,71	1051,70	1049,85	1049,48
PZ 02	Piezômetro	Cava	24/03/05	1046,51	1056,40	1055,31	1054,20
PZ 03	Piezômetro	Cava	30/06/10	1036,17	1065,90	1036,17	1054,02
PZ 04	Piezômetro	Cava	01/06/11	1060,65	1063,25	1063,25	1061,76
PZ 05	Piezômetro	Cava	01/06/11	1048,86	1063,76	1063,76	1059,05
PZ 06	Piezômetro	Cava	15/08/11	1018,61	1024,39	1024,39	1020,90
PZ 07	Piezômetro	Cava	15/08/11	1012,23	1024,79	1024,69	1020,33
PZ 08	Piezômetro	Cava	03/08/12	1042,57	1060,31	1054,74	1050,67
PZ 09	Piezômetro	Cava	25/09/14	1060,61	1067,00	1065,60	1064,64
PZ 10	Piezômetro	Cava	13/03/13	1039,03	1048,30	1039,86	1040,43
PZ 11	Piezômetro	Cava	20/03/13	1038,00	1043,91	1042,99	1041,17
PZ 12	Piezômetro	Cava	08/04/13	1037,58	1041,12	1041,12	1038,85
PZ 13	Piezômetro	Cava	19/04/13	1038,25	1058,86	1058,86	1049,55
PTP 01	Poço Tubular Profundo	Cava	10/04/10	961,35	1056,39	1045,04	*2
PTP 02	Poço Tubular Profundo	Cava	01/05/12	869,20	1000,45	1000,45	*2
PTP 03	Poço Tubular Profundo	Cava	26/07/13	884,79	998,34	998,34	*2
PTP 04	Poço Tubular Profundo	Cava	06/09/13	894,07	994,73	994,73	*2
PZ 14	Piezômetro	Barragem	01/06/12	SECO	SECO	SECO ¹	SECO
PZ 15	Piezômetro	Barragem	01/06/12	SECO	SECO	SECO ¹	SECO
PZ 16	Piezômetro	Barragem	01/06/12	SECO	SECO	SECO ¹	SECO
PZ 17	Piezômetro	Barragem	01/06/12	1052,97	1057,50	1057,25	1055,35
PZ 18	Piezômetro	Barragem	30/05/12	1052,23	1056,31	1056,29	1055,08
PZ 19	Piezômetro	Barragem	03/10/06	1047,33	1050,96	1050,89	1049,52
PZ 20	Piezômetro	Barragem	28/09/06	1051,25	1056,15	1056,15	1053,93
Régua 01	Régua linimétrica	Barragem	04/12/13	1063,27	1064,69	1064,69	1063,48

Fonte: Autor (2021)

NOTA 1: Para determinação do mapa potenciométrico, foi utilizado o valor da cota de fundo do instrumento

NOTA 2: Não é possível determinar a cota média dos poços tubulares profundos, pois o nível de água depende da condição ligado ou desligado (NA dinâmico ou NA estático)