



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA GEOTÉCNICA DE PILHAS DE ESTÉRIL
DE MINERAÇÃO DE FERRO**

Paola Pepino Tarabini

MONOGRAFIA nº 469

Ouro Preto, março de 2023

**AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA GEOTÉCNICA DE PILHAS
DE ESTÉRIL DE MINERAÇÃO DE FERRO**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Claudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Geraldo Magela Santos Sampaio

MONOGRAFIA

Nº 469

AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA GEOTÉCNICA DE PILHAS DE ESTÉRIL DE MINERAÇÃO DE FERRO

Paola Pepino Tarabini

Orientador

Prof. Dr. Lucas Pereira Leão

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2022/2.

OURO PRETO

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T176a Tarabini, Paola Pepino.

Avaliação da segurança geotécnica de pilhas de estéril de mineração de ferro. [manuscrito] / Paola Pepino Tarabini. - 2023.

73 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Pereira Leão.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geotecnia. 2. Minas e mineração - Pilha de estéril. 3. Segurança de minas. I. Leão, Lucas Pereira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13:622.8

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paola Pepino Tarabini

Avaliação da segurança geotécnica de pilhas de estéril de mineração de ferro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Geóloga

Aprovada em 21 de março de 2023

Membros da banca

Dr. Lucas Pereira Leão - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Flávio Afonso Ferreira Filho - Universidade Federal de Ouro Preto
Ms. Luiz Henrique Cardoso - Universidade Federal de Ouro Preto

Lucas Pereira Leão, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Pereira Leão, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/03/2023, às 17:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0500741** e o código CRC **000175B7**.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, aos Orixás e a toda equipe do Terreiro de Umbanda Fé, Amor e Caridade, por me guiarem. Aos meus pais, André e Marileusa, por sempre acreditarem em mim e me proporcionarem tanto. Às minhas irmãs, Pietra e Pâmily, por serem meu apoio e refúgio.

Ao professor Lucas Leão pela orientação, ensinamentos, ideias e paciência.

Aos professores do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, por e propiciarem um ensino gratuito e de qualidade, e que cederam parte de suas vidas para transformar a minha.

À Fugro, pelo apoio técnico e por permitir que esse trabalho fosse realizado da melhor forma possível.

À equipe de Investigação Geotécnica, pela colaboração, aprendizado e convivência, que contribuíram com discussões e suporte, e acima de tudo, confiaram em mim durante o período de estágio.

Aos amigos de Ouro Preto, que me apoiaram durante essa trajetória, em especial à Geologia 18.1 e “La Panelita”, que tornaram essa caminhada mais fácil.

À República Minas Novas e todas suas moradoras, homenageados e ex-alunas, pelo amparo e carinho.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e fizeram desta uma experiência enriquecedora, muito obrigada! Foi um imenso prazer dividir um planeta e uma época com todos vocês.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xvii
INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 JUSTIFICATIVA	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	3
1.5.1 Revisão bibliográfica	3
1.5.2 Levantamento de banco de dados	4
1.5.3 Análise qualitativa e desenvolvimento de classificação	7
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	8
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO.....	8
2.2 CONTEXTO ESTRATIGRÁFICO	9
2.3 EVOLUÇÃO E ARCAPOUÇO ESTRUTURAL	11
3 PILHAS DE ESTÉRIL NO BRASIL - HISTÓRICO E CONSTRUÇÃO.....	14
3.1 Fase de planejamento	14
3.2 Métodos Construtivos.....	15
3.3 Classificação de Pilhas de Estéril	20
3.4 Sistema de Classificação	22
ANÁLISE DE ENQUADRAMENTO DAS PILHAS ESTUDADAS	34
CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapa simplificado de localização das pilhas. Adaptado de Google Earth, 2022.	2
Figura 2.1. - Mapa simplificado do Quadrilátero Ferrífero (Farina et al. 2006).	8
Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero segundo Marshak & Alkmim (1989).	10
Figura 2.3 - Mapa esquemático da atuação do sistema de nappes do Quadrilátero Ferrífero segundo Endo et al. (2020).	13
Figura 3.1 - Dreno de Fundo. Adaptado de Freitas, 2004.	16
Figura 3.2 - Construção de pilha por meio do método ascendente. Adaptado de Freitas, 2004.	17
Figura 3.3 - Construção de pilha de estéril por meio do método descendente. Adaptada de Freitas, 2004.	18
Figura 3.4 - Construção de pilha de estéril por terracamento e wrap-arounds. Adaptado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991.	19
Figura 3.5 - Tipos de pilhas de estéril. Adaptado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991.	21
Figura 4.1 - Sondagem mista realizada na Pilha A, com descrição do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz argilo-arenosa) e da fundação (saprólito e mica-quartzo xisto). Nos detalhes, há informações sobre o adensamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz argilo-arenosa) e da fundação (saprólito e mica-quartzo xisto). Nos detalhes, há informações sobre o adensamento do material conforme a profundidade. Em A, até 5,00 m, indicado pelo quadrado vermelho, nota-se que há um menor índice de resistência à penetração do que observado em B e C, indicados pelos quadrados laranja e verde, em maiores profundidades (cerca de 40,00 m e 50,00 m).	36
Figura 4.2 - - Sondagem mista realizada na Pilha A, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz argilo-arenosa) e da fundação (saprólito e filito). Neste ensaio, também se nota o aumento da resistência com a profundidade,	

evidenciado pelo índice N, em A, indicado pelo quadrado vermelho, em torno dos 5,00 m de profundidade, são observados valores inferiores aos vistos em B, indicado pelo quadrado laranja, em torno de 50,00 m de profundidade, indicando que o material mais superficial é menos denso e menos resistivo à penetração pelo ferramental. 38

Figura 4.3 - Ensaio de penetração de cone com medida de poropressão (CPTu) realizado na Pilha A. Após o pré-furo, nota-se aumento progressivo na resistência de ponta e atrito lateral (primeira e terceira coluna, respectivamente. 41

Figura 4.4 - Dissipação de poropressão (DPP) realizada na Pilha A..... 42

Figura 4.5 - Sondagem rotativa realizada na Pilha B, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz silto-arenosa) e da fundação (solo saprolítico). Bem como o comportamento destes em relação à permeabilidade e resistência. Nota-se que nas profundidades iniciais, indicadas pelo quadrado vermelho, há menor resistência à penetração. 46

Figura 4.6 - Sondagem rotativa realizada na Pilha B, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz silto-arenosa) e da fundação (xisto milonítico). 47

Figura 4.7- Sondagem rotativa realizada na Pilha C, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz silto-argilosa) e da fundação (saprólito e filito). Bem como o comportamento destes em relação à permeabilidade e resistência. 50

Figura 4.8 - Sondagem rotativa realizada na Pilha C, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz silto-argilosa) e da fundação (saprólito e quartzo xisto). Bem como o comportamento destes em relação à permeabilidade e resistência. 51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coerência e Grau de alteração.	4
Tabela 2. 2 - Grau de alteração.	5
Tabela 2.3 - Descontinuidade.	5
Tabela 2.4 - Preenchimento.	5
Tabela 2.5 - Rugosidade.	6
Tabela 3.1 - Tabela de pontuação da estabilidade de pilhas de estéril (modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991, in Aragão, 2008).	23
Tabela 3.2 - Tabela de classificação da estabilidade da pilha e nível de esforço recomendado (modificado de (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991, in Aragão, 2008).	28
Tabela 3.3 - Tabela de monitoramento da pilha (modificado de (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991, in Aragão, 2008).	31
Tabela 4.4.1 - Tabela de pontuação da Pilha A, utilizando da metodologia apresentada neste trabalho.	43
Tabela 4.2- Tabela de pontuação da Pilha B, utilizando da metodologia apresentada neste trabalho.	48
Tabela 4.3 - Tabela de pontuação da Pilha C, utilizando da metodologia apresentada neste trabalho.	52

RESUMO

Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração, ou lavra, do minério de uma mina. Não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas. Essas pilhas são construídas de acordo com às necessidades da empresa de mineração, devendo atender aos requisitos básicos definidos pelas normas de proteção e segurança ambiental, ABNT NBR 13029 (2017). Recentemente tem-se verificado o aumento da incidência de acidentes geotécnicos relacionados às essas pilhas, sendo muitas vezes necessário obras de readequação de pilhas já construídas, a fim de elevar o fator de segurança das mesmas. Algumas pilhas apresentam teores significativos de minério, sendo em alguns casos, viável economicamente a sua mineração. Apesar da existência da normatização construtiva, são poucas exigências no processo de investigação e projeto; aliado a uma certa carência por ferramentas que auxiliem os profissionais a avaliarem o nível adequado de detalhamento, tanto na etapa de investigação, quanto de projeto de uma pilha, sobretudo quanto à segurança geotécnica da estrutura. No presente trabalho, foram avaliadas as condições de segurança geotécnica de três pilhas de estéril. A Pilha A foi classificada na Classe III, apresentando potencial de ruptura moderada, grande porte, confinamento moderado e material de qualidade fraca. A Pilha B foi também classificada na Classe III, sendo caracterizada por seu grande porte, grau de confinamento moderado e material da fundação intermediário. A Pilha C classificada na Classe III, também apresenta moderado potencial de ruptura, pequeno porte e grau moderado de confinamento. A aplicação do sistema de classificação adotado às pilhas escolhidas, permitiu afirmar que se trata de um instrumento útil para a avaliação de todas as fases da vida de uma pilha, em especial no seu planejamento, visto que auxilia a escolha dos possíveis locais de disposição do estéril, ao estimar o nível de esforço para cada uma das classes encontradas. Quando utilizada em pilhas em atividade, a verificação das variáveis permite avaliar o nível do potencial de ruptura associado à classe, bem como os níveis de esforços necessários para a manutenção das mesmas.

Palavras-chave: acidentes geotécnicos, pilha de estéril, segurança.

ABSTRACT

The waste are the excavated materials, generated by the extraction activities, or mining, of the ore of a mine. They have no economic value and are usually arranged in piles. These piles are built according to the needs of the mining company and must meet the basic requirements defined by the environmental protection and safety standards, ABNT NBR 13029 (2017). Recently, there has been an increase in the incidence of geotechnical accidents related to these piles, and it is often necessary to readjust the already built piles to increase their safety factor. Some piles have significant levels of ore, and in some cases, their mining is economically viable. Despite the existence of constructive norms, there are few requirements in the research and design process; combined with a certain lack of tools that help professionals to assess the appropriate level of detail, both in the investigation stage and in the design of a pile, especially regarding the geotechnical safety of the structure. In the present work, the geotechnical safety conditions of three waste dumps were evaluated. Pile A was classified in Class III, with moderate rupture potential, large size, moderate confinement and poor-quality material. Pile B was also classified in Class III, being characterized by its large size, moderate degree of confinement and intermediate foundation material. Pile C, classified in Class III, also has a moderate potential for rupture, small size, and a moderate degree of confinement. The application of the adopted classification system to the chosen piles, allowed to affirm that it is a useful instrument for the evaluation of all phases of the life of a pile, especially in its planning, since it helps the choice of the possible disposal sites of the pile. sterile, when estimating the level of effort for each of the classes found. When used in active piles, checking the variables makes it possible to assess the level of potential rupture associated with the class, as well as the levels of effort required to maintain them.

Key words: geotechnical accidents, waste dumps, safety.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O estéril é o produto minerado, não processado, sendo disposto em pilhas de estéril (Robertson *et al.* 1985 – Não está nas referências). São depositados em condição natural e de modo contínuo durante toda a etapa de extração do minério, priorizando-se as áreas próximas, disponíveis, ao empreendimento.

No passado, os projetos e construções de pilhas de estéril receberam pouca consideração (McCarter, 1985;1990). O material removido da frente de lavra era apenas basculado em locais denominados “bota-fora”, sendo estes aterros, nas encostas ou terrenos próximos às minas, formando pilhas desordenadas, com estabilidade precária. Tal prática resultou em remanejamentos do material, acarretando gastos financeiros elevados, problemas ecológicos, perda de equipamentos e fatalidades.

Apenas a partir da década de 1970, como apontado por Robertson *et al.* 1985, Vandre. 1985 e McCarter. 1990, iniciou-se a disposição controlada, com a qual os novos depósitos de estéril passaram a ser planejados, e os depósitos inconformes foram recompostos, visando a recuperação ambiental das áreas degradadas.

Tal evolução, no entendimento das pilhas de estéril, culminou em estruturas que devem atender aos requisitos básicos definidos pelas normas de proteção e segurança ambiental, em especial no Brasil à ABNT NBR 13029 (2017), e as Normas Reguladoras da Mineração – NRM - Portaria DNPM nº 237 de 18/10/2001.

Algumas pilhas apresentam teores significativos de minério, sendo em alguns casos, viável economicamente a sua mineração.

Apesar da existência da normatização construtiva, são poucas exigências no processo de investigação e projeto das pilhas, aliado a certa carência por ferramentas que auxiliem os profissionais a avaliarem o nível adequado de detalhamento de uma pilha, sobretudo quanto à segurança geotécnica da estrutura (McCarter, 1990).

Assim, neste trabalho, será apresentada a aplicação de um sistema de classificação de pilha de estéril de mineração de ferro, envolvendo os fatores que afetam a estabilidade física de

uma pilha, por meio da metodologia canadense adaptada por Aragão & Oliveira Filho. 2008 às características regionais do Quadrilátero Ferrífero.

1.2 LOCALIZAÇÃO

O presente trabalho analisou três pilhas de estéril de mineração de ferro, intituladas “Pilha A”, “Pilha B” e “Pilha C”. As duas primeiras (A e B) estão localizadas em Nova Lima – MG, enquanto a terceira (C), situa-se na cidade de Congonhas – MG.

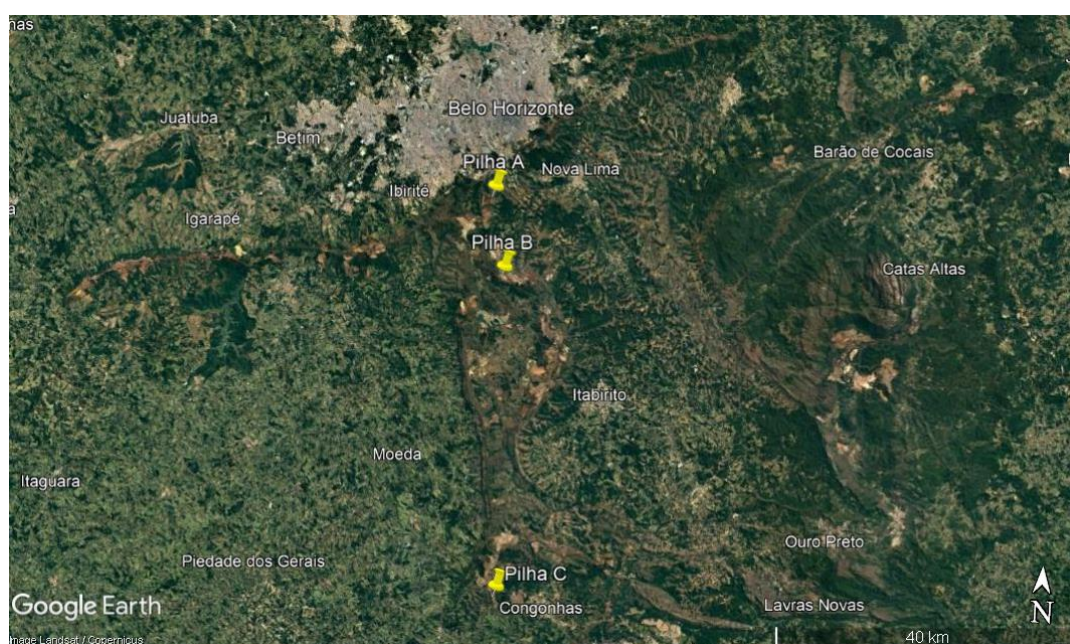


Figura 1.1 – Mapa simplificado de localização das pilhas. Adaptado de Google Earth, 2022.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar um sistema de classificação de segurança de pilhas de estéril, com vistas a sua utilização em gerenciamento de riscos, planejamento de mina, projetos, construção e monitoramento dessas estruturas.

Como objetivos específicos têm-se a identificação das propriedades geotécnicas e métodos investigativos, da pilha e da fundação, mais relevantes para classificação da segurança de uma pilha de estéril em áreas de mineração de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero.

1.4 JUSTIFICATIVA

O planejamento, construção e operação em pilhas de estéril são atividades corriqueiras e cotidianas de empresas de mineração. Considerando a dependência da atividade minerária da remoção do estéril, acompanhar a construção de uma pilha consiste em uma medida importante para evitar problemas geotécnicos e econômicos no empreendimento como um todo (Couzens,1985).

A preocupação crescente com a questão ambiental, aumento da incidência de acidentes e a necessidade de readequação de pilhas já construídas faz com que haja um detalhamento, tanto na etapa de investigação, quanto de projeto, bem como de operação. O desenvolvimento de tecnologias de projeto e construção de pilhas tem sido também limitado pela falta de registros acurados, análises e subsequente avaliação do comportamento da pilha e de suas rupturas.

Para tanto, é necessária a avaliação de um sistema de classificação de pilhas de estéril, diante da realidade do Brasil e da mineração de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero, com vistas à sua utilização em projetos, construção, operação e monitoramento dessas estruturas.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O alcance dos objetivos propostos foi condicionado à uma sequência de métodos que será descrita, em detalhe, a seguir.

1.5.1 Revisão bibliográfica

A principal base de consulta bibliográfica foi a dissertação de mestrado “Classificação de Pilhas de Estéril na Mineração de Ferro (Aragão, 2008)”, por ser base de pesquisa do presente trabalho, e o projeto Quadrilátero Ferrífero: Avanços no conhecimento nos últimos 50 anos (Endo *et al.*, 2020) por possuir os estudos mais recentes da geologia regional da região, bem como uma compilação dos trabalhos pretéritos. Visando ainda o entendimento dos métodos a serem aplicados durante a realização da pesquisa, realizou-se a leitura de textos e artigos com temas relacionados a caracterização geológica-geotécnica de pilhas de estéril e rejeito no Brasil, estudo dos sistemas de classificação existentes, com foco para o sistema

canadense intitulado “*Mined Rock and Overburden Piles*” (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991).

1.5.2 Levantamento de banco de dados

Utilizou-se, neste trabalho, o banco de dados fornecido pela empresa Fugro *in Situ* Geotecnia LTDA. A mesma disponibilizou resultados dos parâmetros necessários para a classificação das pilhas. Para tal, foram utilizados dados referentes a configuração da pilha, como: altura, volume e inclinação do talude, características da fundação, com informações sobre a inclinação da mesma, compactidade e consistência, em especial dados obtidos por ensaios SCPTu (*Seismic Cone Penetration Testing*) e SPT (*Standard Penetration Test*), além da qualidade do material da fundação. Os ensaios de SCPTu forneceram informações sobre a resposta do material à sismicidade. Também foram utilizados dados de sondagens rotativas, para conhecimento do material da pilha e de seu comportamento mecânico.

A sondagem mista é o método de sondagem que conjuga os procedimentos da sondagem a percussão, quando em trechos de solo, e da sondagem rotativa, quando há presença de rochas ou matacões no solo. É realizada com um tubo, denominado barrilete, dotado de uma peça cortante, feita com material de alta dureza em sua ponta, que perfura o terreno através de um movimento de rotação. Os parâmetros utilizados para classificação de sondagens seguem as diretrizes da classificação de maciços rochosos da ABGE (1998), indicados nas tabelas abaixo.

Tabela 2.1 - Coerência e Grau de alteração.

Coerência	
C1	Rocha coerente
C2	Rocha medianamente coerente
C3	Rocha pouco coerente
C4	Rocha incoerente

Tabela 2. 2 - Grau de alteração.

Grau de alteração	
A1 (W1/RS)	Rocha sã ou praticamente sã
A2 (W2/RAD)	Rocha medianamente alterada
A3 (W3/RAM)	Rocha muito alterada
A4 (W4/REA)	Rocha extremamente alterada

Tabela 2.3 - Descontinuidade.

Descontinuidade (espaçamento – cm)	
E1	Muito afastadas (>200)
E2	Afastadas (60 a 200)
E3	Medianamente afastado (20 a 60)
E4	Próximos (6 a 20)
E5	Muito próximos (<6)

Tabela 2.4 - Preenchimento.

Preenchimento	
D1	Contato litológico, paredes sãs
D2	Venulações e veios (calcita/sílica)
D3	Paredes com alteração insipiente
D4	Paredes alteradas, preenchimento ausente
D5	Paredes alteradas, com preenchimento

Tabela 2.5 - Rugosidade.

Rugosidade	
Recortada	I - Rugosa
	II - Lisa
	III - Polida
Ondulada	IV - Rugosa
	V - Lisa
	VI - Polida
Plana	VII - Rugosa
	VIII - Lisa
	IX - Polida

Além dos dados referentes às discontinuidades citados acima, como preenchimento e a rugosidade, o fraturamento é considerado, sendo expresso pela quantidade de discontinuidades que intercepta os testemunhos, e quantificado de 0 a 20.

Os resultados do ensaio SPT são expressos pela soma do número de golpes necessários à cravação dos primeiros e dos últimos 30 cm. O índice de resistência à penetração (N) consiste no somatório correspondente aos 30 cm finais do amostrador. Nos casos em que não ocorre a penetração dos 45 cm, os resultados são apresentados sob a forma de frações ordinárias (Citar referência).

Os ensaios de penetração de cone, com medida de poropressão, (SCPTu e CPTu - *Cone Penetration Testing*) são utilizados para determinação estratigráfica de perfis de solos, determinação de propriedades dos materiais prospectados, particularmente em depósitos de

argilas moles, e previsão da capacidade de carga de fundações, fornecendo dados de resistência de ponta, atrito lateral e poropressão. O ensaio de dissipação de poropressão (DPP) tem por objetivo medir o tempo para dissipar a poropressão gerada pela penetração do cone. Este ensaio possibilita inferir informações sobre permeabilidade e coeficiente de adensamento.

1.5.3 Análise qualitativa e desenvolvimento de classificação

A partir do banco de dados fornecido, foram analisados dos fatores que afetam a estabilidade física de uma pilha, por meio da metodologia canadense intitulada “*Mined Rock and Overburden Piles*”, adaptada por Aragão & Oliveira Filho (2011) às características regionais do Quadrilátero Ferrífero. Será realizada uma classificação que define o nível de esforço recomendado para cada estrutura no que diz respeito a investigação, projeto, construção e operação.

O sistema de classificação da pilha de estéril considera a configuração da pilha, inclinação do talude de fundação e grau de confinamento, tipo de fundação, qualidade do material da pilha, método de construção, condições piezométricas e climáticas, taxa de disposição e sismicidade (Aragão & Oliveira Filho, 2011), e será mais bem abordado no item 3.3.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

O Quadrilátero Ferrífero está localizado na porção sul-sudeste do Quadrilátero Ferrífero (Almeida, 1997), tem uma área de cerca de 7.000 km² e geometria aproximadamente retangular, em virtude dos segmentos demarcados por quartzitos e formações ferríferas bandadas. Trata-se de uma das mais importantes províncias metalogenéticas do território nacional, abrigando grandes depósitos auríferos e de ferro (Lobato *et al.*2001).

Alkmim & Martins-Neto (2012) incluem a porção do Quadrilátero Ferrífero a oeste do Complexo do Baçõ inserida no Cráton do São Francisco e sua porção leste inserida na Faixa de dobramentos Araçuaí, tendo as estruturas mais antigas, também classificadas como estruturas pré Supergrupo Minas (Dorr, 1969), parcialmente obliteradas pela deformação brasileira (Figura 2.1).

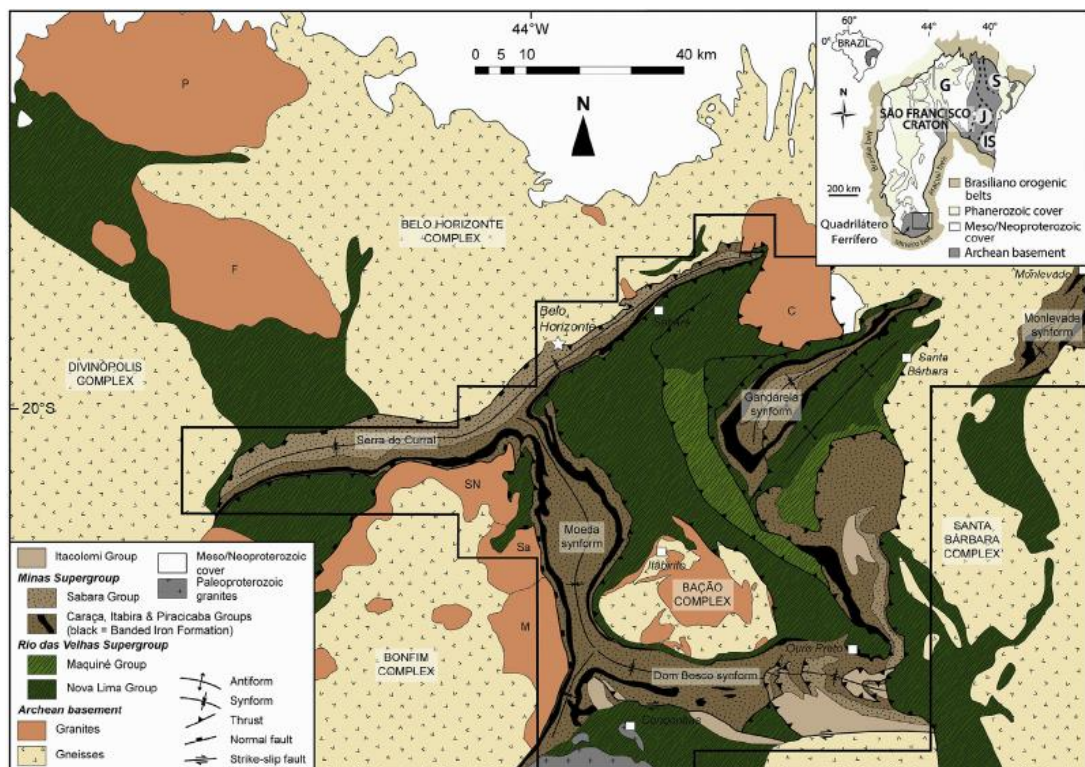


Figura 2.1. - Mapa simplificado do Quadrilátero Ferrífero (Farina et al. 2006).

A área em questão está situada na zona de influência tectônica do Cinturão Mineiro e da Faixa Araçuaí. O Cinturão Mineiro corresponde a um segmento orogênico, de direção ENE,

localizado na porção sul do Cráton São Francisco. O mesmo sofreu influência das atividades plutônicas, metamórficas e de deformação durante o evento Transamazônico (Teixeira & Figueiredo, 1991).

Pedrosa-Soares *et al* (2001) define o orógeno Araçuaí como a parte brasileira do sistema orogênico Neoproterozóico. Tal zona dividiu-se durante a abertura do Atlântico, abrangendo a área compreendida entre o cráton do São Francisco e a margem continental leste brasileira. É limitado a sul pela faixa Ribeira, onde seus traços estruturais rotacionam-se de NNE-SSW para NESW (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos 2000).

2.2 CONTEXTO ESTRATIGRÁFICO

Inicialmente estabelecida pelos trabalhos de mapeamento realizados pelo United States Geological Survey (USGS) e Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), desenvolvidos entre 1946 a 1962, e posteriormente, compilados por Dorr (1969), a atual conformação estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero é formada por três grande domínio tectono-estratigráficos, sendo: complexos ígneos metamórficos, Supergrupo Rio das Velhas (sequência Greenstone belt), ambos arqueanos, e o Supergrupo Minas (sequência supracrustal de rochas sedimentares químicas e clásticas), proterozóico. O metamorfismo regional é da fácies xisto verde predominantemente, a anfibolito, com o aumento do grau metamórfico de oeste para leste (Dorr, 1969; Marshak & Alkmim 1989). Endo *et al.* (2020) redefinem a posição estratigráfica do Grupo Sabará e o inserem, juntamente com o Grupo Itacolomi, na unidade de topo do QF, denominada Supergrupo Estrada Real. Independentemente das denominações e posições estratigráficas, os grupos Sabará e Itacolomi representam uma sucessão do tipo flysch e molassa sinorogênicos.

A coluna estratigráfica para o Quadrilátero Ferrífero, segundo Marshak & Alkmim (1989), é representada na Figura 2.2, abaixo.

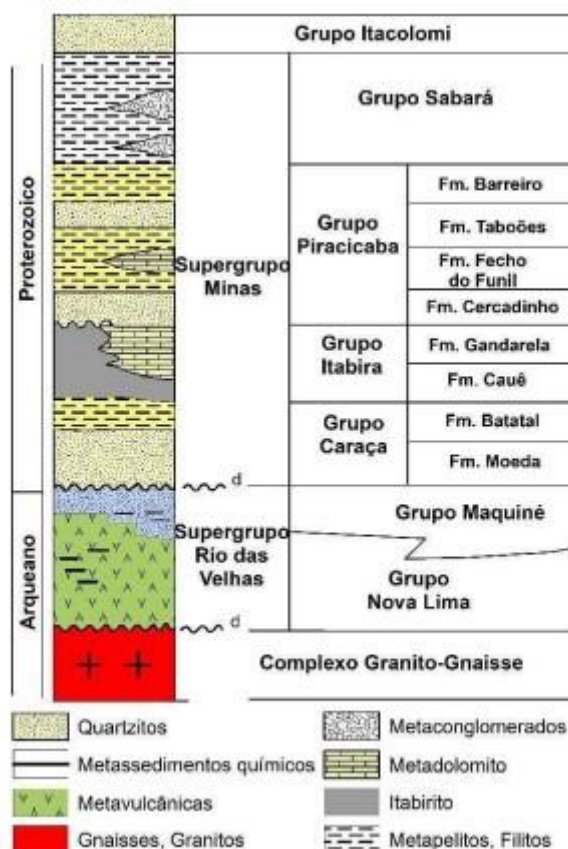


Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero segundo Marshak & Alkmim (1989).

O embasamento cristalino possui composição trondhjemitito-tonalito-granodiorito (TTG), tendo origem arqueana e sendo expostos principalmente como domos (Teixeira *et al.* 2000).

O Supergrupo Rio das Velhas é formado por rochas vulcânicas, com predominância de basaltos, e rochas sedimentares. Parte destas apresentam evidências de vulcanismo submarino, marcado por estrutura do tipo pillow-lavas observadas na formação Quebra Ossos, na base do Grupo Nova Lima (Zucchetti *et al.* 1998). O pacote vulcanossedimentar foi retrabalhado por processos orogenéticos, culminando na transformação dos basaltos e sedimentos em xistos de diversas composições. É subdividido em dois grupos: Nova Lima e Maquiné.

O Grupo Nova Lima, situado na base do Supergrupo Rio das Velhas, é composto por uma associação de rochas vulcânicas e sedimentares, com baixo grau de metamorfismo. Há destaque para rochas ultrabásicas, básicas, metapelitos, formação ferrífera bandada, sedimentos

químicos sílicocarbonáticos (denominados genericamente de “lapa-seca”) e quartzitos (Lobato *et al.* 2001).

O Grupo Maquiné é composto por duas formações: Palmital (base) e Casa Forte (topo). A Formação Palmital é de origem marinha, sendo composta por metarenitos e metaturbiditos. Já a Formação Casa Forte tem metarenitos e metaconglomerados em um ambiente de bacia foreland (Baltazar & Zucchetti 2007).

As coberturas sedimentares são paleoproterozóicas, abrangendo o Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi. O Supergrupo Minas apresenta sedimentos continentais e marinhos, cuja estratigrafia é representada por metaconglomerados e metarenitos, gradando para os metapelitos do Grupo Caraça, formação ferrífera bandada do tipo Lago Superior e metacarbonatos do Grupo Itabira, sedimentos deltaicos e de água rasa do Grupo Piracicaba e por metapelitos, metarenitos e metaconglomerados do Grupo Sabará (Alkmim & Marshak 1998, Baltazar & Zucchetti 2007, Alkmim & Martins- Neto 2012).

O Grupo Itacolomi é composto por uma sucessão de metarenitos, metaconglomerados e metapelitos, que recobrem o Supergrupo Minas (Dorr II 1969, Alkmim & Martins-Neto 2012).

2.3 EVOLUÇÃO E ARCABOUÇO ESTRUTURAL

O Quadrilátero Ferrífero apresenta padrão estrutural complexo, composto por uma série de ciclos deformacionais, sendo cada um deles responsável pela geração de determinados padrões e conjuntos de estruturas.

Baltazar & Zuchetti (2007) propõem a evolução estrutural do Greenstone belt Rio das Velhas, baseado em três eventos deformacionais, que resultaram em quatro gerações de estruturas (D1, D2, D3 e D4). A primeira geração (D1) é datada do Arqueano (2749-2670 Ma), consiste em evento de regime compressivo e transporte tectônico de N para S. A segunda geração (D2) também é relacionada a um evento arqueano (~2700 Ma), com regime compressivo e transporte de NE para SW. A geração D3, é resultado do evento Transamazônico (extensivo), do Paleoproterozóico (2100 a 1900 Ma). Foi responsável pela deposição do Supergrupo Minas, com soerguimento do embasamento granito-gnáissico e nucleação dos sinclinais regionais. A quarta geração (D4) é relacionada ao evento Brasileiro, neoproterozóico (650-500 Ma) e transporte tectônico de E para W.

Chemale Jr. *et al.* (1994) sugerem um modelo tectônico com superposição de dois eventos de deformação regional. O primeiro, transamazônico, de caráter extensional e orientação NW-SE, foi responsável pela formação de estruturas NE-SW, como o Sinclinal Gandarela. O segundo evento, compressivo, apresenta três fases de deformação progressivas, associadas ao evento Brasileiro, apresentando um campo de encurtamento EW, formando um cinturão de dobramentos e empurrões (fold and thrust belt).

Alkmim & Marshak (1998) apresentam a estruturação do Quadrilátero Ferrífero como resultado de quatro eventos distintos. O primeiro (D1), é compressivo e está relacionado ao evento de orogenia Transamazônica, com a formação de cinturões de dobras e empurrões com vergência NW, gerando zonas de cisalhamento e dobras regionais. O evento DC está relacionado ao colapso deste orógeno, promovendo a subida de domos e geração das quilhas. O evento DE está relacionado ao rifte Espinhaço. O evento D2 relaciona-se ao ciclo Brasileiro, com a geração de um cinturão de empurrões com vergência para W, reativando estruturas.

Por fim, Endo *et al.* 2020, caracteriza o arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero como formado por dobras de várias gerações e estilos, associadas a diferentes fases e eventos tectônicos que atuaram na região. As dobras de escala regional são: Nappe Curral, com vergência para N-NE, Sistema de Nappes Ouro Preto, com vergência para S-SE e dobras de terceira geração, sendo estas resultantes de amplificações ou redobramento. O sistema de nappes do Quadrilátero Ferrífero, embora apresente vergências opostas, possui planos de simetria similares (Turner & Weiss 1963, Díaz-Azpiroza *et al.* 2019).

A nappe Curral é caracterizada por um arranjo geométrico e cinemático de uma tectônica epidérmica (thin-skin), envolvendo as unidades do greenstone do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas sobre a superfície de descolamento basal Moeda-Bonfim, seguida de uma tectônica do embasamento de antepaís (thick-skin) com o envolvimento dos complexos metamórficos Bonfim e Bação. Essa ascensão de blocos provocou a inversão do movimento de cavalgamento da Zona de Cisalhamento Moeda-Bonfim com topo dirigido para NNE por outro de movimento de cinemática normal com lapa dirigida para N. O protossinclinal Moeda foi amplificado posteriormente, seguido da inversão do flanco leste, durante o encurtamento E-W, referente à orogenia Brasileira.

A fase tardi-tectônica da ascensão de blocos do embasamento cristalino foi acompanhada pela intrusão de vários pequenos corpos de granitoides.

O Sistema de Nappes Ouro Preto caracteriza-se por constituir um arranjo geométrico e cinemático de uma tectônica epidérmica (thin-skin), envolvendo as unidades do greenstone do Supergrupo Rio das Velhas, supergrupos Minas e Estrada Real sobre a superfície de descolamento basal São Vicente, seguida de uma tectônica do embasamento de pós-país (thick-skin) com o envolvimento dos complexos metamórficos Santa Bárbara e Guanhões.

O sistema de nappes do Quadrilátero Ferrífero sofreu os efeitos da deformação de idade brasileira em duas fases, uma com campo de esforços dirigidos de E para W e, outra, em seguida, de S para N. A primeira fase corresponde o reflexo da manifestação tectônica do orógeno Araçuai (Pedrosa-Soares et al. 2007) no interior da placa Sanfranciscana (Gomes 2018). Já a segunda fase está relacionada à reativação de discontinuidades pretéritas, com a geração de foliação nas rochas máficas e a geração de sinclinais pelo mecanismo de flanking folds.

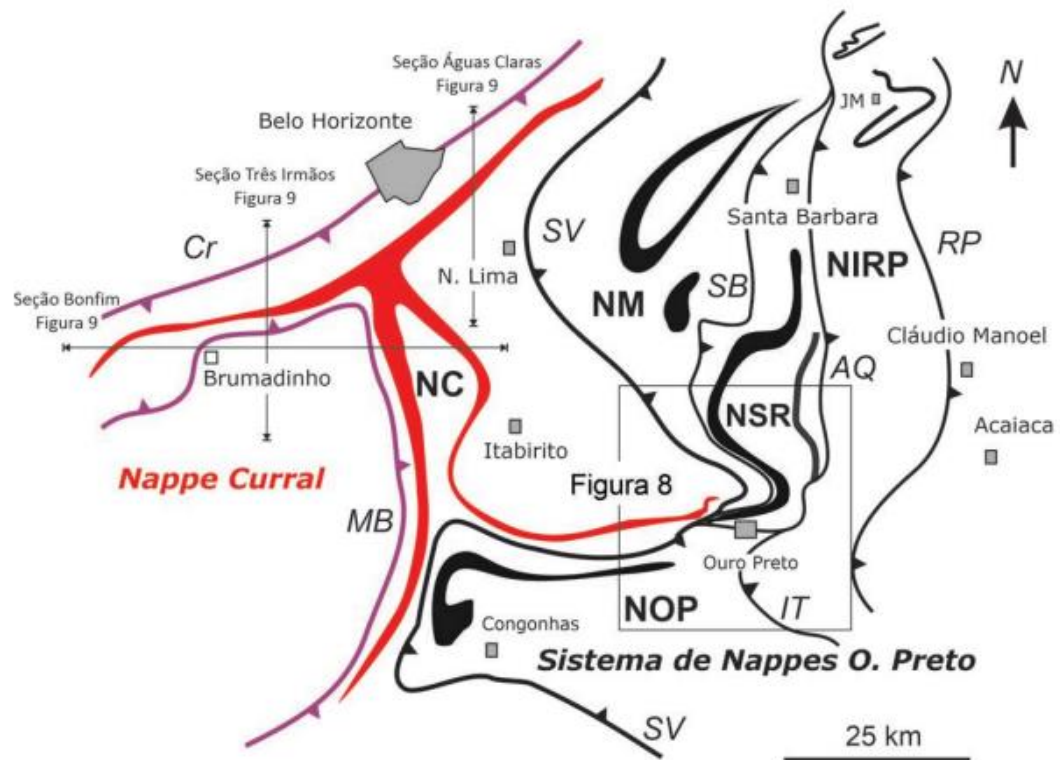


Figura 2.3 - Mapa esquemático da atuação do sistema de nappes do Quadrilátero Ferrífero segundo Endo et al. (2020).

CAPÍTULO 3

PILHAS DE ESTÉRIL NO BRASIL - HISTÓRICO E CONSTRUÇÃO

Até a década de 1970, o material removido da frente de lavra era apenas basculado em locais denominados “bota fora” (McCarter, 1990). Apenas a partir de tal década, como apontado por Robertson *et al.* (1985), Vandre (1985) e McCarter (1990), deu-se início aos processos de disposição controladas, com a qual os novos depósitos de estéril passaram a ser planejados e os depósitos inconformes foram recompostos, visando a recuperação ambiental das áreas degradadas, em especial no que diz respeito aos requisitos determinados pela ABNT NBE 13029 (2006).

Cada projeto de disposição de estéril é único, atendendo as condições específicas de cada local. Tais condições são norteadoras de investigações geológico-geotécnicas durante o projeto. De modo geral, as investigações específicas não são realizadas na fase inicial de exploração, mas informações básicas coletadas nesta, como topografia e geologia, são utilizadas na fase de planejamentos das pilhas (Eaton *et al.* 2005).

3.1 Fase de planejamento

A fase de planejamento é dividida em etapas, sendo elas: fase de exploração, fase de pré-viabilidade, fase de viabilidade e projeto preliminar.

A fase de exploração é a etapa em que a maioria das informações são coletadas, nesta, geralmente são obtidos os dados utilizados para o planejamento de uma pilha (Eaton *et al.* 2005).

A fase de pré-viabilidade compreende a etapa de obtenção das informações específicas sobre os locais de provável disposição do estéril, visando obter um reconhecimento preliminar das áreas pré-selecionadas (Welsh, 1985). Também são determinados os dados sobre a disposição do estéril, como tipo de material, origem do mesmo, quantidade e métodos propostos para disposição e manejo do mesmo.

Em uma análise ambiental, vale a pena salientar a necessidade de um estudo prévio para a deposição do estéril, sendo necessário conhecer os locais pré-selecionados e confirmar se eles são destinados a reservas ecológicas, sítios arqueológicos ou históricos, ou se compreendem área de nascentes. Tais locais precisam da liberação de órgãos competentes, precisando ser identificados. Além disso, é necessária a realização da descrição e classificação dos possíveis impactos ambientais causados. O local escolhido deverá ser aquele em que estes sejam menores.

Classificações como a realizada por Aragão (2008) são ferramentas de planejamento importantes para a fase de pré-viabilidade, permitindo que sejam realizadas comparações entre os locais quanto ao potencial de instabilidade, determinando os níveis de projeto, investigação e monitoramento da estrutura, de acordo com a classe.

A fase de viabilidade é responsável pela condução de estudos para o projeto preliminar. São realizadas investigações de campo para melhor compreensão das condições do local e sua adequabilidade, além de se determinar as características dos materiais que vão compor a pilha e da fundação, como composição química e resistência ao cisalhamento (Eaton *et al.* 2005).

Já o projeto preliminar, última fase, deve apresentar informações mais detalhadas, como planos para a disposição do estéril, avaliações ambientais, com estudo dos impactos e estratégias para a redução dos mesmos, além dos parâmetros necessários para que o projeto possa ser submetido à avaliação dos órgãos competentes. Ao ser finalizado, deve ser enviado para o órgão ambiental, a fim de obter a licença necessária.

Depois de todas as etapas descritas, inicia-se a fase de desenvolvimento do projeto, em que são definidas as características da pilha, tanto geométricas, quanto construtivas, como dimensionamento e drenagens interna, incluindo o acabamento paisagístico (ABNT,2006).

3.2 Métodos Construtivos

Encerradas as etapas de elaboração, inicia-se a fase de construção. De modo geral, tal etapa compreende os seguintes passos: preparação da fundação, controle de água superficial, método construtivo, operação e interação entre projeto e construção.

a) Preparação da Fundação

A preparação da fundação consiste na limpeza da superfície onde a pilha será alocada. Caso esta seja construída em área de mata densa ou floresta, a ~~limpeza-remoção~~ da cobertura vegetal deve ser realizada (ABNT,2006). De acordo com Eaton *et al.* (2005), os depósitos espessos de solos orgânicos devem ser removidos, visto que podem atuar como uma superfície desfavorável entre o material da pilha e o terreno da fundação, mais resistente. A remoção destes, portanto, favorece a estabilidade.

Nos casos de depósitos de solos moles, a remoção é a opção mais viável, contudo, análises devem ser realizadas para verificar se a deposição do estéril implicará no deslocamento ou adensamento do material.

Além disso, deverão ser realizados serviços de drenagem e desvios de cursos de água existentes. Onde se espera grandes vazões, tubos perfurados podem ser instalados para garantir a maior vazão (Eaton *et al.* 2005). Em áreas de surgência ou solos úmidos, drenos de areia podem ser instalados a fim de direcionar a água para valas coletoras (Figura 3.2.1).

Em áreas onde a remoção não é viável, a formação de um aterro para adensar o solo da fundação é uma alternativa (Eaton *et al.*2005).

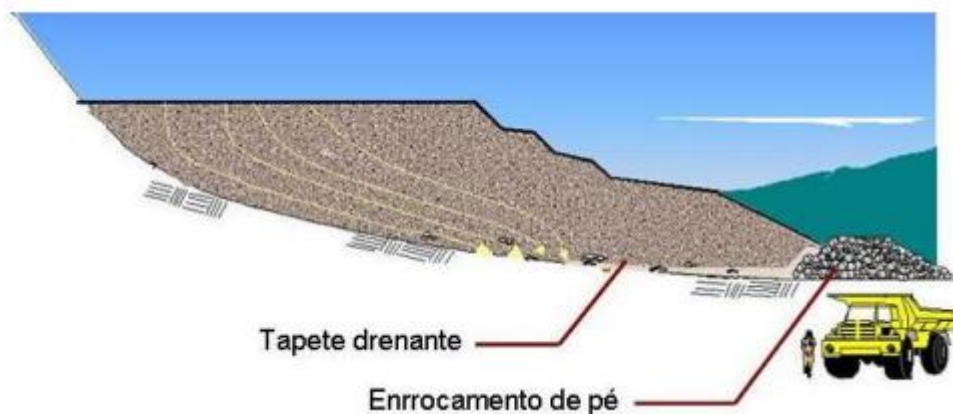


Figura 3.1 - Dreno de Fundo. Adaptado de Freitas, 2004.

b) Controle de água superficial

As águas superficiais, sejam provenientes de precipitação ou não, devem ser coletadas e direcionadas para canais de escoamento ou para a drenagem interna, de forma a impedir a saturação dos taludes expostos, protegendo a estrutura contra o desenvolvimento de superfície

freática dentro da pilha, *piping*, erosões superficiais de desenvolvimento de rupturas devido ao fluxo de água nas superfícies dos taludes (McCarter, 1990).

Assim, desvios de água superficial são viáveis em pilhas localizadas em áreas planas ou encostas, porém não o são em estruturas construídas em vales fechados e aterros que cruzam vales extensos. Drenos de fundo de enrocamento são alternativas mais econômicas em relação a canais de desvio de superfície. (Eaton *et al.* 2005).

c) Método construtivo

O estéril é disposto em camadas espessas, formando uma série de plataformas de lançamento com espaçamento variável, de acordo com o projeto construtivo. Entre elas, deixam-se as bermas, que além de suavizar o talude da pilha, auxiliam na drenagem superficial (Eaton *et al.* 2005).

Uma pilha pode ser construída de forma ascendente ou descendente. A primeira forma é mais utilizada, visto que cada alteamento sucessivo é suportado pelo anterior, cujo comportamento é documentado (Figura 3.2.2). Qualquer ruptura terá que passar pelo banco anterior, sendo que este também atua como apoio para o pé do talude. Além disso, o pé de cada banco é suportado por uma superfície plana (berma superior) (Eaton *et al.* 2005). A construção ascendente pode ser realizada por camadas ou por bancadas.



Figura 3.2 - Construção de pilha por meio do método ascendente. Adaptado de Freitas,2004.

Já na construção descendente (Figura 3.2.3), a camada posterior é suportada no pé do talude anterior, assim, os taludes do terreno natural na região do pé da pilha e as condições da fundação quem controlam a estabilidade, não sendo uma forma de construção recomendada. Contudo, pode ser melhorada com o uso de *wrap-arounds* (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991), alternativa que consiste na expansão do aterro inicial com outro aterro descendente, de menor elevação (equivalente a um banco), servindo de contraforte do aterro anterior (Figura 3.2.4) (Eaton *et al.* 2005).



Figura 3.3 - Construção de pilha de estéril por meio do método descendente. Adaptada de Freitas, 2004.

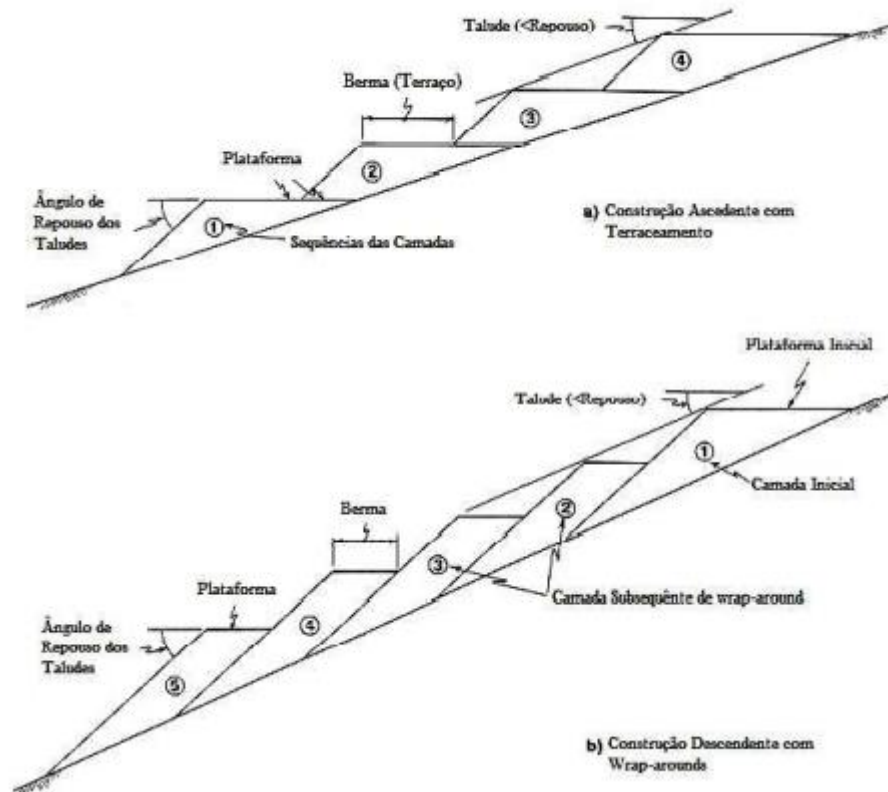


Figura 3.4 - Construção de pilha de estéril por terraceamento e wrap-arounds. Adaptado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991.

d) Operação

A disposição do estéril deve ser realizada de forma a tirar o maior proveito das condições geomorfológicas do local, sendo realizada preferencialmente ao longo da crista, visando torná-la o mais longa possível e, com isso, reduzir a taxa de avanço de elevação do terreno, aumentando a estabilidade da mesma (BC Mine West Rock Pile Research Committee, 1991)

Durante o desenvolvimento de uma pilha, a disposição de estéril deve ser realizada em vários setores, não sobrecarregando um único local. Tal disposição permite a suspensão temporária dos setores com excessiva subsidência, até que as condições favoráveis sejam estabelecidas. O monitoramento é um fator crítico para que se estabeleça uma taxa adequada de alteamento da pilha (BC Mine West Rock Pile Research Committee, 1991). Quando ocorrer alguma subsidência anormal, e esta atingir o limite especificado em projeto, deve ser realizada suspensão, redução da taxa de disposição ou o uso de material grosso selecionado (Eaton *et al.* 2005).

Materiais grossos e duráveis são colocados em ravinas, no leito de cursos d'água e diretamente sobre terrenos íngremes, aumentando a resistência ao cisalhamento de contato e drenagem de fundo. Materiais friáveis e finos são colocados nas porções mais elevadas da pilha, fora de zonas de escoamento superficial, ou em células de uma maneira organizada, evitando a formação de zonas de ruptura (BC Mine West Rock Pile Research Committee, 1991).

Além disso, a pilha deve ser projetada de modo a considerar os objetivos de longo prazo exigidos pela reabilitação da área (Eaton *et al.* 2005).

e) Interação entre projeto e construção

O projeto de uma pilha é interativo. A construção desta estrutura deve ser monitorada e seu projeto revisado, conforme a performance observada em campo. Pilhas de grandes dimensões e/ou mais complexas devem receber inspeções periódicas.

A interação entre projeto e construção visa obter informações referentes às taxas de movimentação da pilha, de erosão dos taludes, de subida de crista, qualidade do material e condições piezométricas, que são de difícil obtenção nas fases anteriores a construção.

3.3 Classificação de Pilhas de Estéril

Os sistemas de classificação, de modo geral, proporcionam descrições básicas das pilhas, trazendo informações que fornecem uma previsão sobre o comportamento interno da estrutura, como nível de água e poropressões, e permitem a prevenção de áreas suscetíveis a rupturas, visando a correção dos potenciais perigos.

Na literatura, observa-se que muitos esquemas propostos realizam a classificação das pilhas quanto aos seus tipos, tendo como referência a configuração das mesmas e aspectos de suas fundações, como visto em Taylor & Greenwood, 1981; Wahler, 1979 e BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991. Os tipos de pilhas classificados podem ser vistos na Figura 3.5.

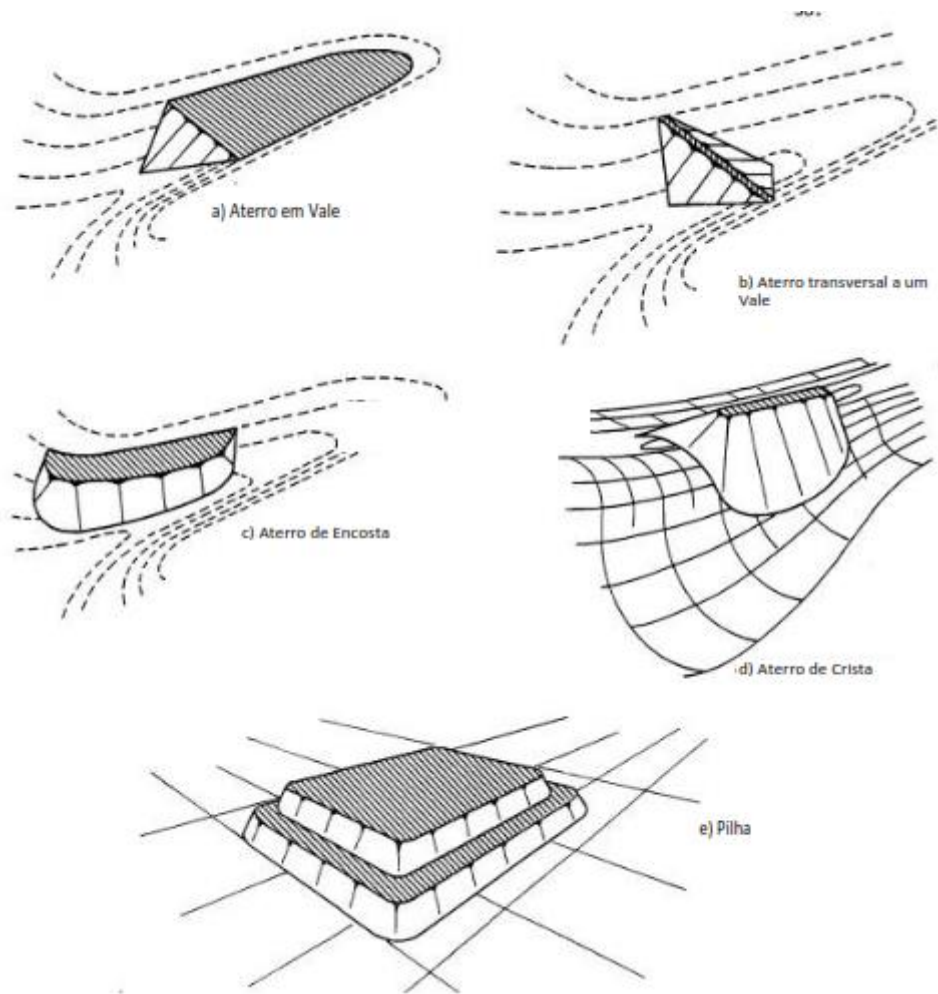


Figura 3.5 - Tipos de pilhas de estéril. Adaptado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991.

O Sistema de classificação adotado nesta pesquisa, adaptado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991), avalia as pilhas de acordo com seu potencial de estabilidade. São considerados: configuração da pilha, inclinação do talude de fundação, grau de confinamento, tipo de fundação, qualidade do material da pilha, método construtivo, condições piezométricas e climáticas, taxa de disposição e sismicidade.

A configuração e dimensão das pilhas estão relacionadas à estabilidade, visto que a carga que será exercida sobre determinada porção da fundação depende do volume da pilha, isto é, das variáveis geométricas consideradas: altura, volume e inclinação geral do talude.

Em relação à inclinação do terreno da fundação e grau de confinamento, a situação mais favorável seria uma forma côncava dos taludes, já a menos favorável seria uma formação

convexa, como observado na figura 3.5. (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991).

As fundações são classificadas em competente (igual ou mais resistente do que o aterro), intermediária (com resistência entre competente e fraca) e fraca (capacidade de suporte limitada). As condições da mesma são fatores chave para a estabilidade geral das pilhas (Aragão, 2008).

As características do material que compõe o aterro, em especial resistência ao cisalhamento e durabilidade, estão relacionadas à estabilidade da pilha. Materiais de granulometria grossa, composto por rocha dura, com poucos finos, são mais favoráveis, visto que apresentam maior resistência. Materiais de capeamento ou rocha friável, com grande volume de finos, são pouco recomendados (Aragão, 2008).

O método construtivo, como mais bem abordado no item 3.2, também contribui para a estabilidade da pilha, sendo que a construção que ocorre de modo ascendente, com a expansão da pilha em direção das curvas de nível sendo mais estável do que perpendicular a elas (Eaton *et al.* 2005).

As condições piezométricas e climáticas estão relacionadas ao estudo da água no aterro, seja por meio de infiltração direta ou percolação subterrânea, de modo a evitar o desenvolvimento de zona freática na estrutura, ou de problemas relacionados à erosão superficial, *piping* e galgamentos (Aragão, 2008).

Por fim, a sismicidade natural costuma ser baixa, contudo, vibrações causadas por desmonte de rochas são consideradas no estudo de estabilidade, visto suas implicações no adensamento do material (Aragão, 2008).

3.4 Sistema de Classificação

O método adotado neste trabalho foi apresentado na publicação do governo canadense denominada “*Mined Rock and Overburden Piles*” (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991), e será referenciado neste como sistema de classificação. É dividido em três partes principais, sendo estas: avaliação da estabilidade da pilha, classes de estabilidade da pilha e verificação de enquadramento de classe.

a) Avaliação de Estabilidade da Pilha

Trata-se de uma metodologia que visa avaliar o potencial relativo em terreno de estabilidade da pilha proposto segundo a Tabela 3.1 (Aragão, 2008). A avaliação é realizada de modo semiquantitativo, ponderando parâmetros chave, descritos no item 3.3. Para cada fator é atribuída uma pontuação e, com a soma das avaliações individuais para cada um deles, é calculada a avaliação global da estabilidade da pilha. A pontuação máxima a ser obtida é de 1800 e quanto maior o total de pontos, maior o potencial de instabilidade (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991).

Tabela 3.1 - Tabela de pontuação da estabilidade de pilhas de estéril (modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991, in Aragão, 2008).

Fatores-Chave que Afetam a Estabilidade		Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	<50m		0
		50m – 100m		50
		100m – 200m		100
		>200m		200
	Volume da Pilha	Pequeno	< 1x 10*6 m*3/banco	0
		Médio	1-50 x 10*6 m*3/banco	50
		Grande	>50 10*6 m*3/banco	100
	Inclinação do Talude (que talude? Banco?)	Suave	<26°	0
		Moderada	26° - 35°	50
		Íngreme	>35°	100
Inclinação de Fundação		Suave	10°	0

Fatores-Chave que Afetam a Estabilidade	Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação
	Moderada	10° - 25°	50
	Íngreme	25° - 32°	100
	Extrema	>32°	200
Grau de Confinamento	Confinado	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Talude côncavo em planta ou seção; ➤ Aterros em vale ou transversais a um vale, pé de talude em contato com a parede oposta ao vale; ➤ Ravinas em forma de dente de serra que podem ser usadas para limitar a inclinação da fundação. 	0
	Moderadamente Confinado	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bancos ou terraços naturais nos taludes; ➤ Taludes com inclinação uniforme, limitados por topografia natural diversificada; ➤ Empilhamento de estéreis em encostas, em vales abertos, ou transversais a vales. 	50
	Sem Confinamento	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Talude convexo em planta ou seção; ➤ Aterros de encosta ou aterros de crista sem confinamento na base; ➤ Sem ravinas ou buracos para auxiliar a construção. 	100
Tipo de Fundação	Competente	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Materiais de fundação tão ou mais resistentes que os da pilha; ➤ Não sujeita a efeitos adversos da poropressão; ➤ Sem estruturas geológicas desfavoráveis. 	0

Fatores-Chave que Afetam a Estabilidade	Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação
	Intermediária	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Intermediária entre competente e fraca; ➤ Ganho de resistência do solo com adensamento; ➤ Dissipação do excesso de poropressão com o controle da taxa de carregamento. 	100
	Fraca	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Capacidade de suporte limitada, solos moles; ➤ Sujeito a excesso de poropressão devido ao carregamento; ➤ Condições adversas de água subterrânea, surgências ou infiltrações; ➤ Baixa resistência ao cisalhamento, com alto potencial de liquefação. 	200
Qualidade do Material da Pilha	Alta	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Resistente, durável; ➤ Menos que 10% de finos. 	0
	Moderada	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Moderadamente resistente, durabilidade variável; ➤ 10 a 25% de finos. 	100
	Pobre	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Predominância de rochas fracas, de baixa durabilidade; ➤ Mais que 25% de finos, material de cobertura (capeamento). 	200
Método de Construção	Favorável	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bancos ou camadas não muito espessos (< 25 m de espessura), plataformas largas; ➤ Disposição ao longo das curvas de nível; ➤ Construção ascendente; ➤ “Wrap-arounds” ou terraços. 	0

Fatores-Chave que Afetam a Estabilidade	Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação
	Misto	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bancos ou bancadas moderadamente espessas (25 m – 50 m); ➤ Métodos mistos de construção. 	100
	Desfavorável	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bancos ou camadas muito espessas (> 50 m), plataforma estreita (aterro na forma de pontões); ➤ Disposição abaixo da linha de queda do talude; ➤ Construção descentende. 	200
Condições Piezométricas e Climáticas	Favorável	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Baixas pressões piezométricas, nenhuma surgência na fundação; ➤ Improvável desenvolvimento de superfície freática no interior da pilha; ➤ Precipitação limitada; ➤ Infiltração mínima na pilha. 	0
	Intermediária	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pressões piezométricas moderadas, algumas infiltrações na fundação; ➤ Desenvolvimento limitado da superfície freática na pilha; ➤ Precipitação moderada; ➤ Alta infiltração no interior da pilha. 	100
	Desfavorável	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Altas pressões piezométricas, surgências na fundação; ➤ Alta precipitação; ➤ Moderada precipitação; ➤ Significativo potencial de desenvolvimento de superfície freática ou lençol suspenso no interior da pilha. 	200

Fatores-Chave que Afetam a Estabilidade	Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação
Taxa de Disposição	Baixa	<ul style="list-style-type: none"> ➤ < 25m³/ banco por metro linear de crista por dia; ➤ Taxa de avanço da crista < 0,1 m por dia. 	0
	Moderada	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 25 – 200 m³/ banco por metro linear de crista por dia; ➤ Taxa de avanço de crista de 0,1 m – 1,0 m por dia. 	100
	Alta	<ul style="list-style-type: none"> ➤ > 200 m³/ banco por metro linear de crista por dia; ➤ Taxa de avanço de crista > 1,0 m por dia. 	200
Sismicidade	Baixa	Zona de risco sísmico 0 e 1 (Escala Richter).	0
	Moderada	Zona de risco sísmico 2 e 3 (Escala Richter).	100
	Alta	Zona de risco sísmico 4 ou maior (Escala Richter).	200
Pontuação máxima possível de Estabilidade da Pilha: 1800.			

b) Classes de Estabilidade da Pilha

O Mined Rock and Overburden Piles ((BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991) apresenta quatro classes de classificação baseadas nos fatores apresentados na Tabela 3.1. Na Tabela 3.2, há a definição do nível de esforço recomendado para a construção da pilha, já a Tabela 3.3. informa sobre o monitoramento necessário a cada classe.

Defina o que é nível de esforço!

Tabela 3.2 - Tabela de classificação da estabilidade da pilha e nível de esforço recomendado (modificado de (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991, in Aragão, 2008).

Classificação da Estabilidade da Pilha	Potencial de Ruptura	Nível de Esforço recomendado para Investigação, Projeto e Construção	Faixa de Pontuação da Pilha
I	Desprezível	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reconhecimento básico do local, documentação de referência; ➤ Programa mínimo de ensaios de laboratório; ➤ Rotina de checagem de estabilidade; ➤ Restrições mínimas de construção; ➤ Monitoramento visual. 	<300
II	Baixo	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Investigação completa do local; ➤ Poços de inspeção, amostragem pode ser obrigatória; ➤ Programa limitado de ensaios de laboratório; ➤ Estabilidade pode ou não influenciar o projeto; ➤ Análises básicas de estabilidade obrigatórias; ➤ Certas restrições na construção; ➤ Monitoramento visual e de instrumentos de rotina. 	300-600
III	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Investigação detalhada do local, em etapas; ➤ Poços de inspeção obrigatórios, ou outras investigações de subsuperfície podem ser obrigatórias; ➤ Amostragem indeformada pode ser obrigatória; ➤ Programa detalhado de ensaios de laboratório, incluindo propriedades-índice, resistência ao cisalhamento e durabilidade provavelmente obrigatórios; 	600-1200

Classificação da Estabilidade da Pilha	Potencial de Ruptura	Nível de Esforço recomendado para Investigação, Projeto e Construção	Faixa de Pontuação da Pilha
		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Estabilidade influencia e pode controlar o projeto; ➤ Análises de estabilidade detalhadas, possivelmente estudos paramétricos obrigatórios; ➤ Projeto básico pode ser obrigatório para aprovação/missão; ➤ Restrições moderadas na construção (ex.: taxa de carregamento limitada, espessuras das camadas, qualidade do material, drenagem superficial adequada etc.); <ul style="list-style-type: none"> ➤ Monitoramento detalhado de instrumentação para confirmar projeto, documentar performance e estabelecer limites de carregamentos. 	
IV	Alto	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Investigação detalhada do local em etapas; ➤ Poços de inspeção e possíveis trincheiras, obrigatórios; ➤ Sondagens e outras possíveis investigações subsuperficiais provavelmente obrigatória; ➤ Amostragem indeformada provavelmente obrigatória; ➤ Programa detalhado de ensaios, incluindo propriedades-índice, resistência ao cisalhamento e durabilidade provavelmente obrigatórios; <ul style="list-style-type: none"> ➤ Considerações sobre estabilidade essenciais; ➤ Análises de estabilidade detalhadas, possivelmente incluindo estudos paramétricos e avaliações completas de alternativas provavelmente obrigatórias; ➤ Projeto básico possivelmente obrigatório para aprovação/missão; 	>1200

Classificação da Estabilidade da Pilha	Potencial de Ruptura	Nível de Esforço recomendado para Investigação, Projeto e Construção	Faixa de Pontuação da Pilha
		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Restrições severas na construção (ex.: taxas limite de carregamento, espessuras das camadas, qualidade do material, drenagem superficial etc.); ➤ Monitoramento detalhado de instrumentação para confirmar projeto e documentar performance e estabelecer limites de carregamento. 	

c) Verificação de Enquadramento de Classe

Etapa na qual é verificado se o nível de esforço utilizado na fase atual da pilha, seja ela de projeto, construção, operação ou desativação, é compatível com a classe na qual ela se enquadra, de acordo com o observado na Tabela 3.2., apresentada anteriormente (Aragão, 2008)

Tabela 3.3 - Tabela de monitoramento da pilha (modificado de (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991, in Aragão, 2008).

Classes da Pilha	Pontuação da Pilha	Monitoramento Instrumental	Descrição	Frequência	Relatórios
I	<300	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inspeção visual, a menos que sejam observadas movimentações não esperadas; ➤ Piezômetros onde aplicável. 	Encarregado de turno faz a inspeção.	4 horas	Relatórios diários.
			Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro.	Anual	Relatório interno anual.
II	300-600	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Instrumentação necessária se movimentações outras, visto que as devido ao adensamento são observadas; ➤ Piezômetros onde aplicável. 	Encarregado de turno faz a inspeção.	4 horas	Relatório diário.
			Inspeção e interpretação dos resultados de instrumentação feita pelo engenheiro.	Diário	
			Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro.	Quadrimestral Anual	Relatório de inspeção quadrimestral e Relatório interno anual.

Classes da Pilha	Pontuação da Pilha	Monitoramento Instrumental	Descrição	Frequência	Relatórios
III	600-1200	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Instrumentação para monitoramento de movimentações necessárias como especificado pelo projetista; ➤ Piezômetros onde aplicável. 	Encarregado de turno faz a inspeção.	4 horas	Relatório diário.
			Inspeção e interpretação dos resultados da instrumentação feita pelo engenheiro.	Diário	
			Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro.	Mensal	Relatório interno de inspeção quadrimestral.
			Inspeção por um auditor independente.	Anual	Relatório anual feito por auditor independente.
IV	>1200	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Programa de inspeção detalhada a ser especificada pelo projetista; ➤ Piezômetros onde aplicável; ➤ Piezômetros em fundações provavelmente necessários se solos finos estiverem presentes. 	Encarregado de turno faz inspeção.	4 horas	Relatórios diários.
			Inspeção e interpretação dos resultados da instrumentação feita pelo engenheiro.	Diário	
			Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro.	Mensal	Relatório interno de inspeção quadrimestral.

Classes da Pilha	Pontuação da Pilha	Monitoramento Instrumental	Descrição	Frequência	Relatórios
			Inspeção por um auditor independente.	Anual (Mínimo)	Relatório anual feito por auditor independente, ou com maior frequência se exigido pela fiscalização.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE ENQUADRAMENTO DAS PILHAS ESTUDADAS

Conforme o Mined Rock and Overburden Piles (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991), há questões-chave que devem ser realizadas durante a concepção dos projetos de pilhas de estéril, sendo estas: qual o nível de esforço recomendado? Quais recursos devem ser dedicados na etapa de investigação? E de projetos?

Tais questões precisam ser respondidas pelos projetistas da pilha. Assim, o sistema de classificação, adotado neste trabalho, apresenta um método simples para a avaliação dos esforços apropriados. Ao recomendar os mesmos, também estabelece possíveis condições e possíveis níveis de restrições operacionais e de monitoramento.

Em geral, uma pilha classificada como um baixo potencial (Classe I) exige relativamente poucos esforços em termos de investigação e projeto, enquanto pilhas com alto potencial (Classe IV) requerem investigações detalhadas e projetos mais cuidadosos. Assim, quanto maior for a classe, maior será o grau de esforço necessário (Aragão, 2008).

A fim de obter os parâmetros utilizados para a classificação, foram realizadas campanhas de investigação e de instrumentação nas três estruturas analisadas. Estas consistiram na realização de sondagens mistas, penetração de cone com medida de poropressão (SCPTu), ensaios de dissipação de poropressão (DPP), instalação de instrumentos como piezômetros e indicadores de nível de água (diferencie esses dois instrumentos no tópico materiais e métodos) e coletas deformadas e indeformadas, além da posterior descrição e classificação geológica dos testemunhos obtidos.

a) Pilha A

A Pilha A está localizada na cidade de Nova Lima – MG, como pode ser observado na Figura 1.1. Trata-se de uma pilha de estéril desativada, considerada de grande porte, atingindo cerca de 240 m de altura. Apresenta em torno de 3.600.000 m³ de material por banco e um ângulo de talude de 22,8.

Possui grau de confinamento moderado, sendo desenvolvida em vale aberto. O tipo de fundação é intermediário, havendo dissipação do excesso de poropressão com o controle da taxa de carregamento, e sendo constituída de material semelhante a conforme observado nos testemunhos das sondagens mistas das figuras 4.1 e 4.2.

Na estrutura de interesse, foram realizadas treze sondagens mistas, além de campanha de instrumentação e projeto de investigação geológico-geotécnicas. As sondagens variaram entre 21,00 m e 143,00 m de profundidade.

De acordo com a descrição das sondagens representadas nas figuras 4.1 e 4.2, o material da pilha apresenta, de modo geral, qualidade fraca, sendo constituído por solo residual de filitos e quartzitos, além de cerca de 70% de finos nas porções mais antigas. Observando os testemunhos obtidos, nota-se que a pilha é majoritariamente constituída por blocos de litologias distintas, como filito, quartzito e itabirito friável, em meio a matriz argilo-arenosa. As rochas que compõe a fundação apresentam-se alteradas a medianamente alteradas, sendo pertencentes ao Grupo Nova Lima.

Estima-se que os materiais venham ganhando resistência ao longo do tempo, devido ao adensamento, conforme observado pelo aumento do valor do índice de resistência à penetração (N), apresentado nas figuras 4.1 e 4.2, ensaios de CPTu, figura 4.4, e no ensaio de dissipação de poropressão (DPP) na figura 4. 5.

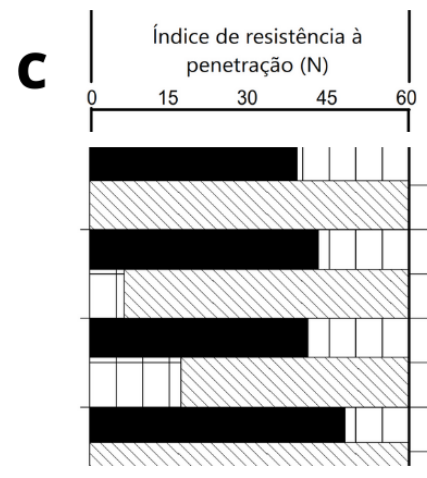
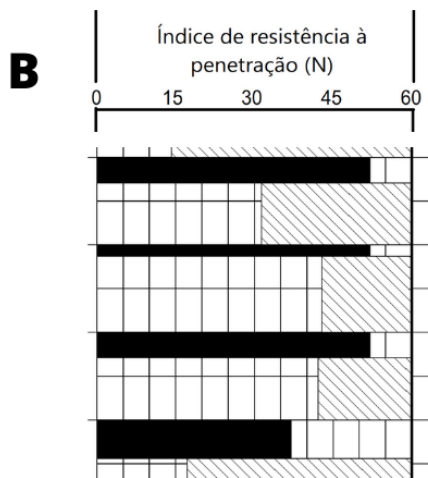
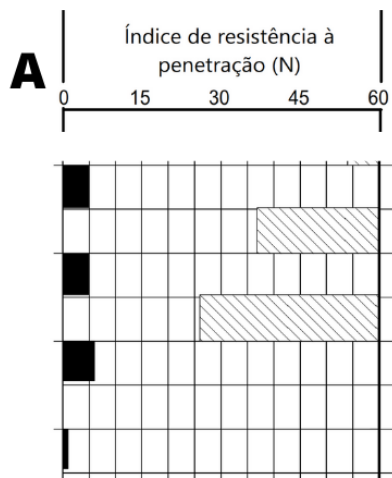
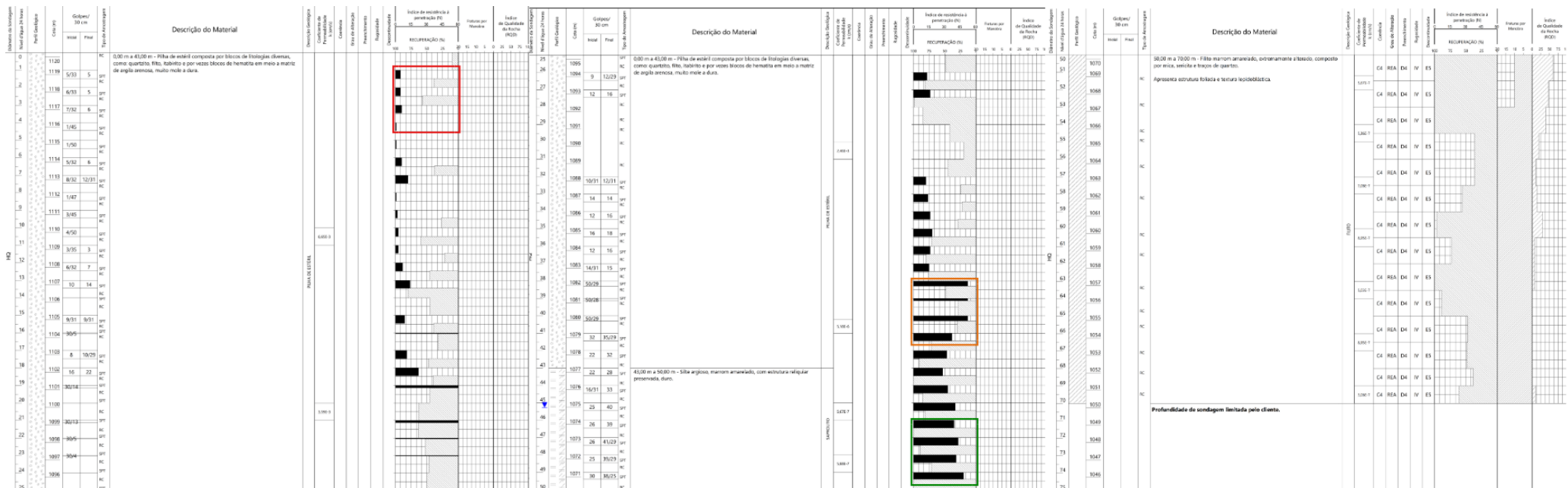


Figura 4.1 - Sondagem mista realizada na Pilha A, com descrição do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz argilo-arenosa) e da fundação (saprólito e mica-quartzo xisto). Nos detalhes, há informações sobre o adensamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em

meio a matriz argilo-arenosa) e da fundação (saprólito e mica-quartzo xisto). Nos detalhes, há informações sobre o adensamento do material conforme a profundidade. Em A, até 5,00 m, indicado pelo quadrado vermelho, nota-se que há um menor índice de resistência à penetração do que observado em B e C, indicados pelos quadrados laranja e verde, em maiores profundidades (cerca de 40,00 m e 50,00 m).

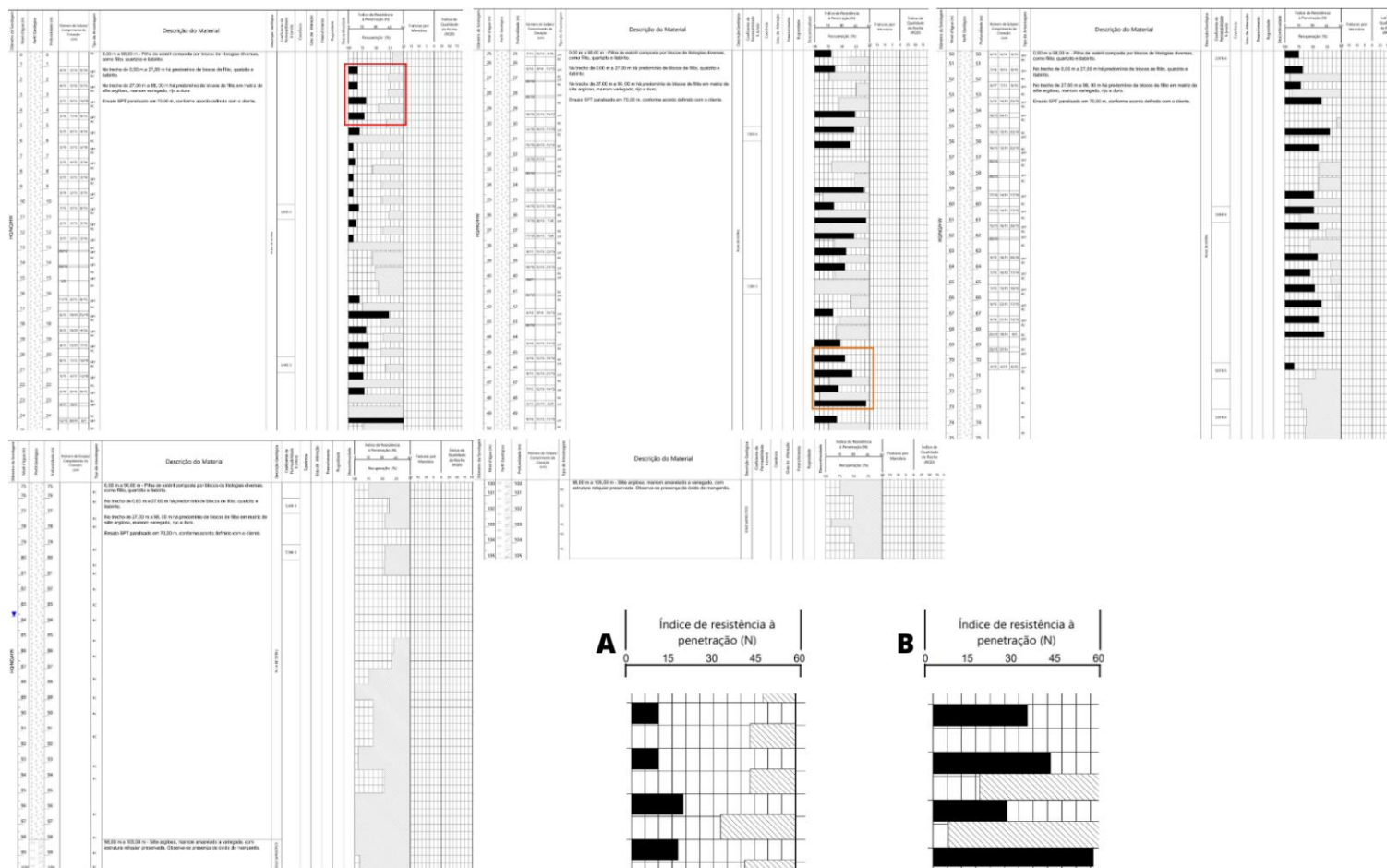


Figura 4.2 - - Sondagem mista realizada na Pilha A, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz argilo-arenosa) e da fundação (saprólito e filito). Neste ensaio, também se nota o aumento da resistência com a profundidade, evidenciado pelo índice N, em A, indicado pelo

quadrado vermelho, em torno dos 5,00 m de profundidade, são observados valores inferiores aos vistos em B, indicado pelo quadrado laranja, em torno de 50,00 m de profundidade, indicando que o material mais superficial é menos denso e menos resistivo à penetração pelo ferramental.

A construção foi realizada de forma ascendente por bancada, contribuindo para o desenvolvimento da pilha ao longo das curvas de nível.

Devido à presença de água nos bancos do terraço médio da pilha, observadas nos ensaios de penetração de cone com medida de poropressão, as condições piezométricas e climáticas foram consideradas desfavoráveis.

Tal presença, possivelmente, se deve a surgências no aterro ou deficiências na drenagem superficial, assim, o desenvolvimento de superfície freática deve ser considerado, não podendo classificar a pilha como auto-drenante

A taxa de disposição foi baixa, não apresentando problemas com excesso de poropressões, como observado nos ensaios de DPP, representados na figura 4.4. A sismicidade é baixa, de acordo com o observado nos boletins sísmicos publicados pelo Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo (USP), sendo este resultado da reanálise do catálogo de eventos do centro e consiste em um conjunto de informação tabulada para coordenadas, hora de origem e magnitude dos terremotos ocorridos, bem como pela Rede Sismográfica do Quadrilátero Ferrífero (RSQF), não sendo esperado nenhum evento anormal.

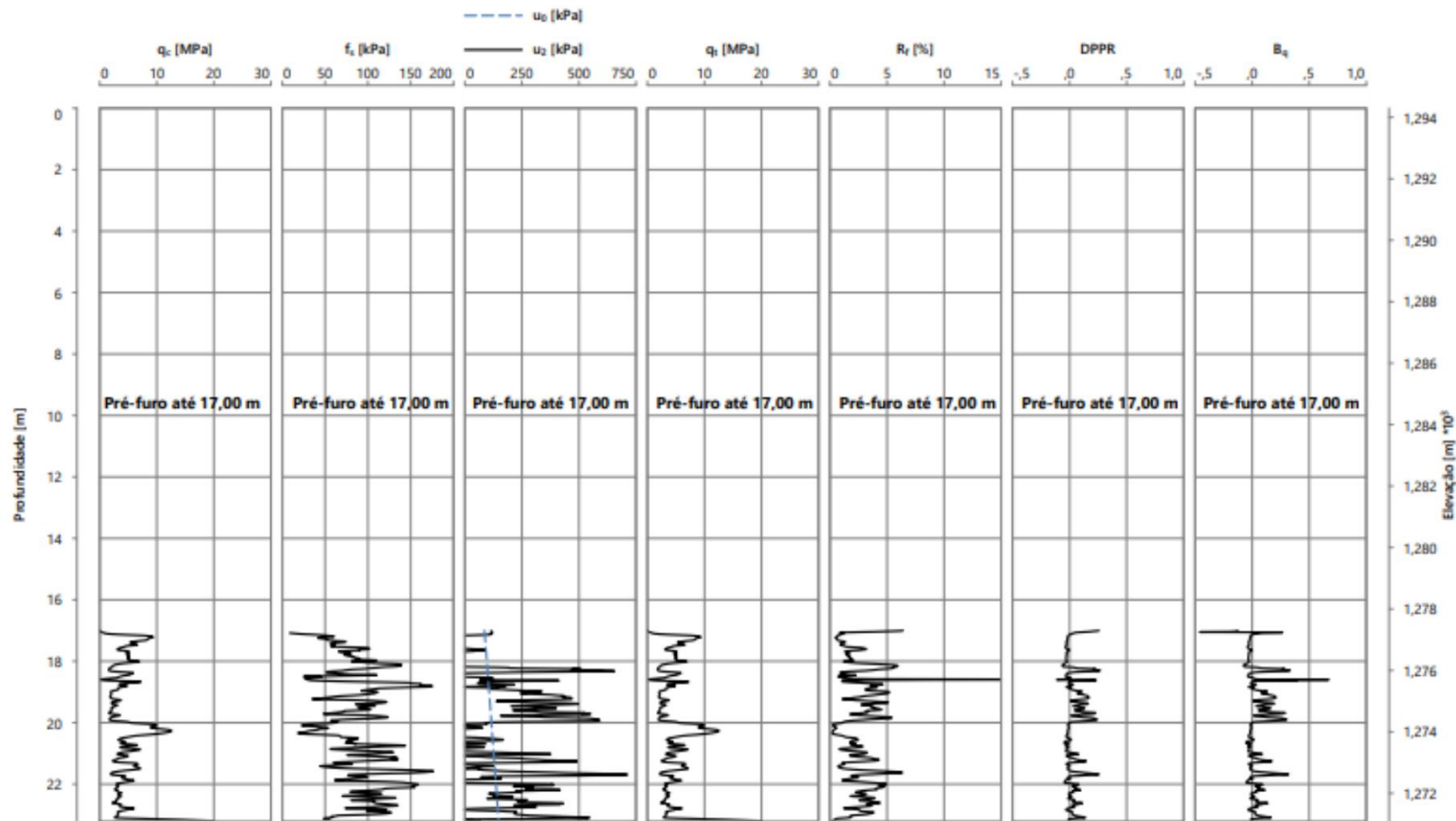


Figura 4.3 - Ensaio de penetração de cone com medida de poropressão (CPTu) realizado na Pilha A. Após o pré-furo, nota-se aumento progressivo na resistência de ponta e atrito lateral (primeira e terceira coluna, respectivamente).

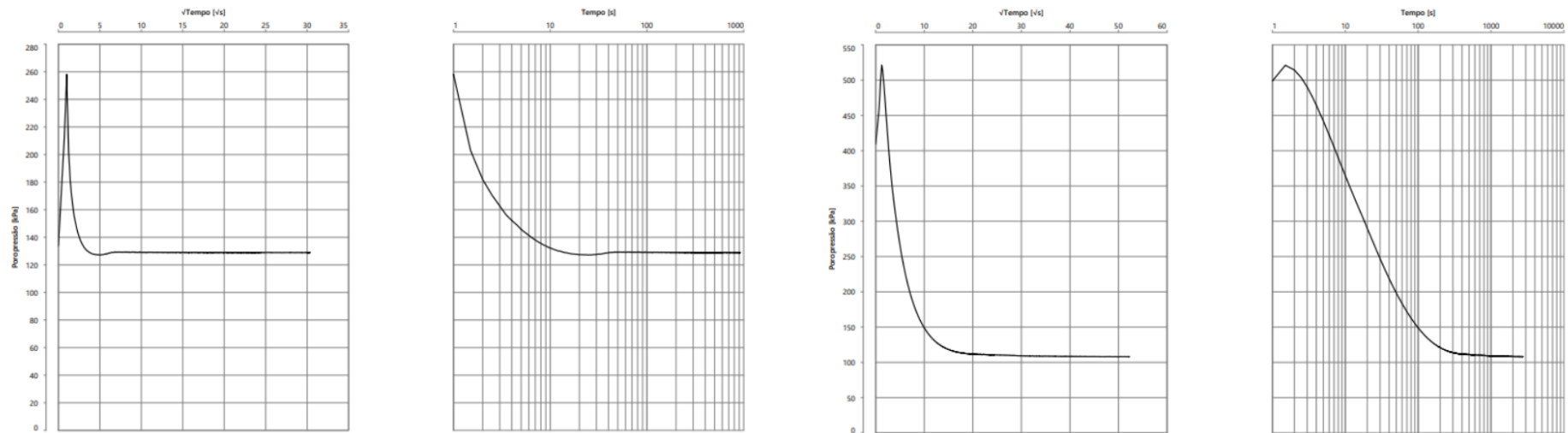


Figura 4.4 - Dissipação de poropressão (DPP) realizada na Pilha A.

A Pilha A teve um total de oitocentos pontos, sendo, portanto, Classe III, apresentando potencial de ruptura moderada. A pontuação pode ser conferida na Tabela 4.1, abaixo.

Tabela 4.4.1 - Tabela de pontuação da Pilha A, utilizando da metodologia apresentada neste trabalho.

Fatores Chave que afetam a estabilidade da pilha.		Faixa de condições/descrições.	Pontuação.
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	240m	200
	Volume da Pilha	Médio	50
	Inclinação do Talude	Suave	0
Inclinação da Fundação		Suave	0
Grau de confinamento		Moderadamente Confinado	50
Tipo de Fundação		Intermediária	100
Qualidade do Material da Pilha		Pobre	200
Método de Construção		Favorável	0
Condições Piezométricas e Climáticas		Desfavorável	200
Taxa de Disposição		Baixa	0
Sismicidade		Baixa	0
Total de Pontos		800	

b) Pilha B

A Pilha B, também no município de Nova Lima, MG (Figura 1.1), encontra-se em atividade, sendo considerada de grande porte, atingindo aproximadamente 200 m de altura. Apresenta cerca de 72×10^6 m³ de material estéril e ângulo de taludes de aproximadamente 21,8°.

Possui grau de confinamento moderado, sendo desenvolvida em vale aberto, tendo seu pé totalmente confinado. O tipo de fundação é intermediário, sendo constituída por saprólitos jovens e maduro), oriundos de xistos e filitos

Nesta estrutura geotécnica, foram realizadas 16 sondagens mistas, cujas profundidades variam de 12,00 m a 125,00 m, além de campanha de investigação geológico-geotécnica e de instrumentação. O material da pilha apresenta, de modo geral, qualidade fraca, sendo constituído por solo residual de filitos e xistos, quartzitos, itabiritos compactos, conforme observados nos testemunhos obtidos nas figuras 4.5 e 4.6. Não há informações sobre a porcentagem de finos, conforme pode ser observado nas figuras 4.5 e 4.6.

A construção foi realizada de forma ascendente por bancada, contribuindo para o desenvolvimento da pilha ao longo das curvas de nível.

As condições piezométricas e climáticas foram consideradas intermediárias, optando-se por uma análise conservadora, mesmo não havendo nada explícito em relação à surgências. Conforme observado, ao analisar os dados de instrumentação geotécnica (piezômetros e inclinômetros), as vazões são constantes o ano inteiro. Não foram realizados ensaios de penetração de cone com medida de poropressão e ensaios de dissipação de poropressão, não sendo possível, portanto, obter informações concretas a respeito do adensamento do material. Este é visualizada apenas a partir do valor de resistência à penetração (N), também apresentado nas figuras 4.5 e 4.6.

A taxa de disposição é moderada, visto que se trata de uma pilha ativa e em processo de expansão. A sismicidade é baixa, não sendo esperado nenhum evento anormal.

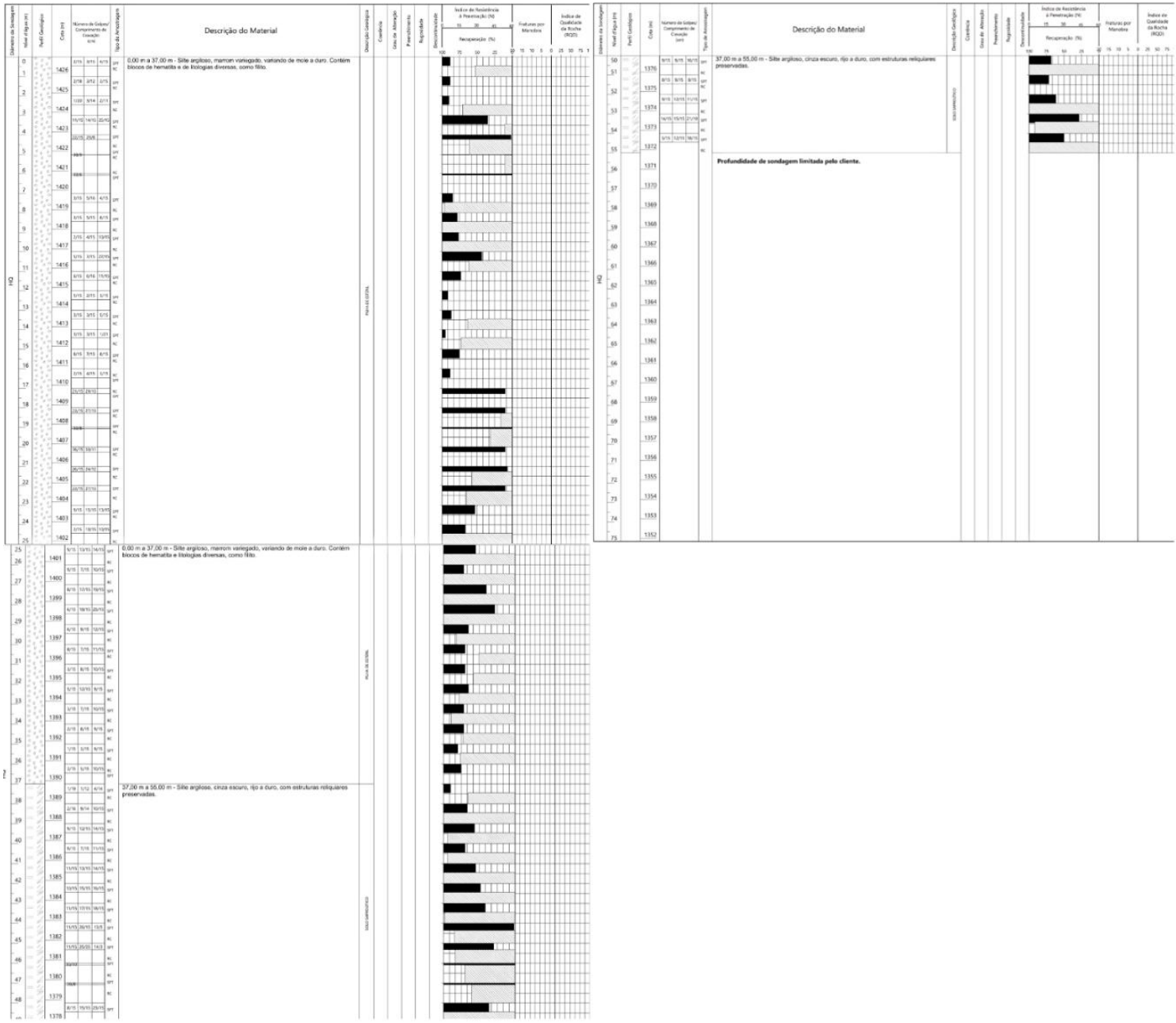


Figura 4.5 - Sondagem rotativa realizada na Pilha B, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz silto-arenosa) e da fundação (solo saprolítico). Bem como o comportamento destes em relação à permeabilidade e resistência. Nota-se que nas profundidades iniciais, indicadas pelo quadrado vermelho, há menor resistência à penetração.

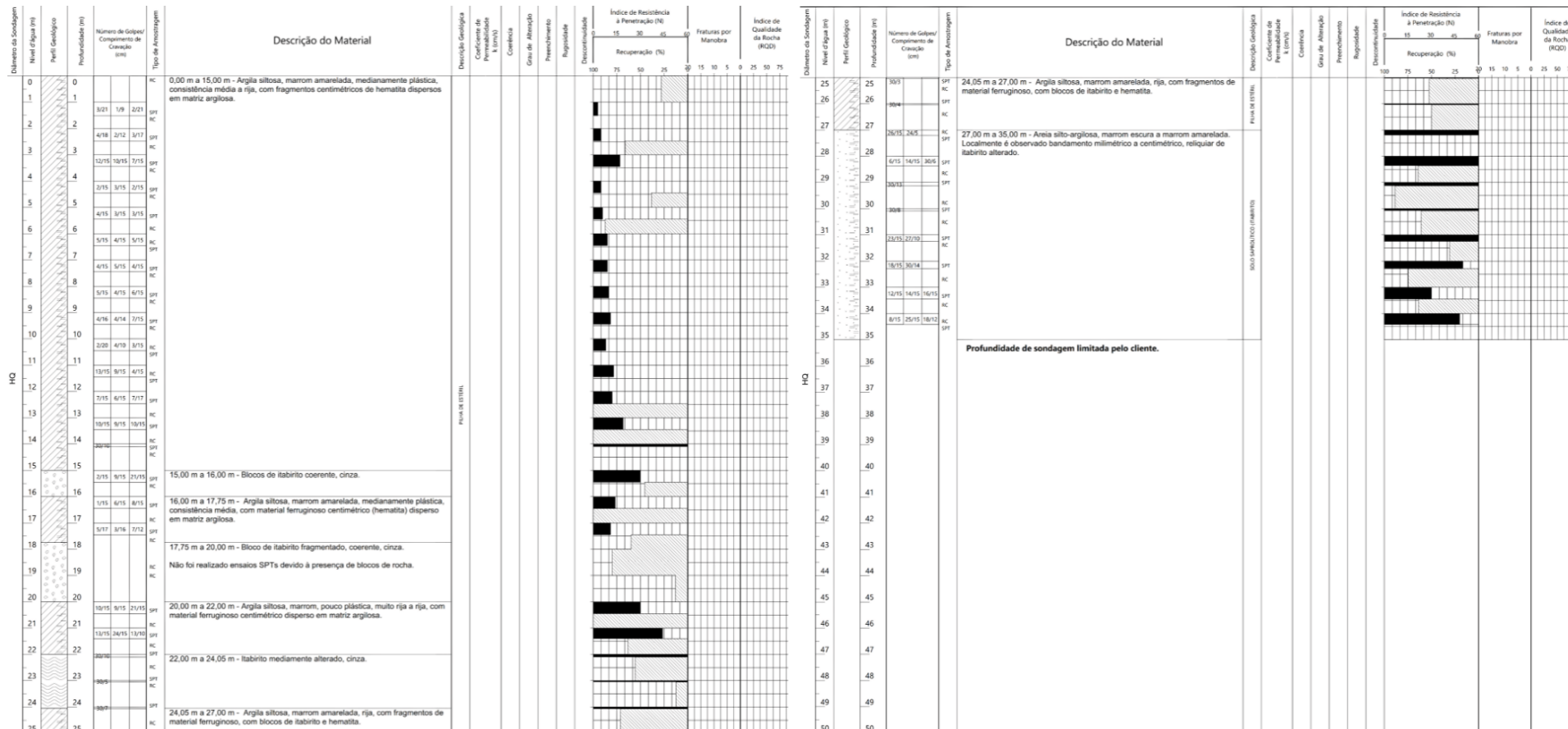


Figura 4.6 - Sondagem rotativa realizada na Pilha B, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz silto-arenosa) e da fundação (xisto milonítico).

A Pilha B obteve um total de 850 pontos, conforme indicado na Tabela 4.2. Dentro do sistema de classificação apresentado, encontra-se na Classe III, apresentando grau de rompimento moderado.

Tabela 4.2- Tabela de pontuação da Pilha B, utilizando da metodologia apresentada neste trabalho.

Fatores Chave que afetam a estabilidade da pilha.		Faixa de condições/descrições.	Pontuação.
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	200m	100
	Volume da Pilha	Grande	100
	Inclinação do Talude	Suave	0
Inclinação da Fundação		Suave	0
Grau de confinamento		Moderadamente Confinado	50
Tipo de Fundação		Intermediária	100
Qualidade do Material da Pilha		Pobre	200
Método de Construção		Favorável	0
Condições Piezométricas e Climáticas		Intermediária	200
Taxa de Disposição		Moderada	100
Sismicidade		Baixa	0
Total de Pontos		850	

c) Pilha C

A Pilha C está localizada no município de Congonhas, MG, indicado na Figura 1.1. Atualmente, está em atividade, com cerca de 150m de altura, sendo considerada de pequeno porte. Apresenta em torno de 1×10^5 m³ de material estéril e ângulo de talude de aproximadamente 37,5°.

Apresenta grau de confinamento moderado, sendo desenvolvida em vale aberto. Sua fundação é classificada como intermediária, sendo composta por xisto e filitos, bastante fraturados, conforme mostram os testemunhos de sondagens 4.7 e 4.8.

Foram realizadas 31 sondagens mistas, com profundidades entre 12,00 m a 90,00 m, além de campanha de investigação geológico-geotécnica e de instrumentação. O material da pilha apresenta, de modo geral, qualidade fraca, sendo constituído por solo residual e porções de itabiritos compactos, conforme observado nas figuras 4.7 e 4.8. Não há informações sobre a porcentagem de finos, conforme observado nas figuras 4.7 e 4.8.

As condições piezométricas e climáticas foram consideradas intermediárias, não havendo informações sobre a drenagem de fundo das bacias de contenção de finos que se encontram sobre a pilha.

A taxa de disposição é moderada, porém não há preocupação com adensamento do material e geração de excesso de poropressões, visto que estas estão estabilizadas, como pode ser observado ao analisar os ensaios de penetração de cone com medida de poropressão e ensaios de dissipação de poropressão, representados nas figuras 4.7 e 4.8. Já a sismicidade é baixa, não sendo esperados eventos anormais.

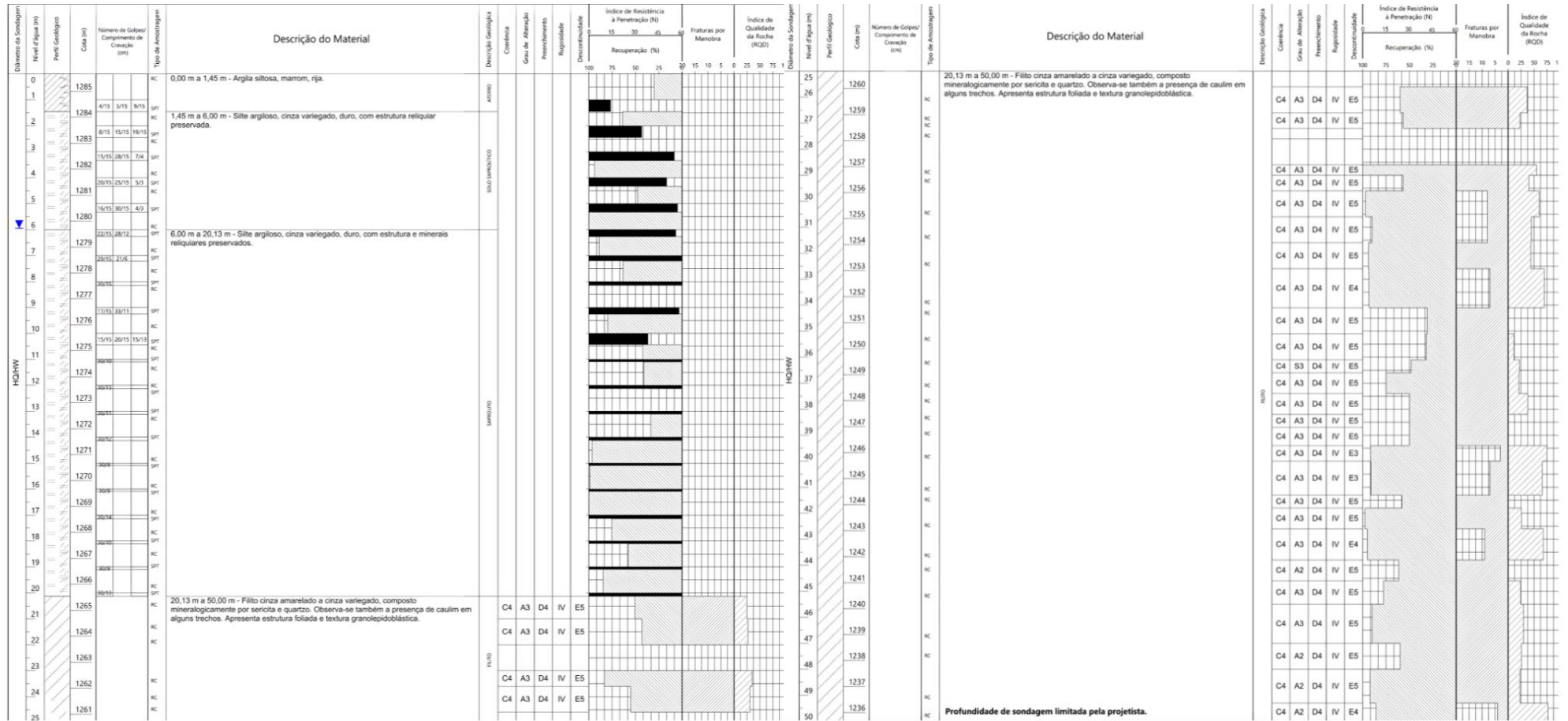


Figura 4.7- Sondagem rotativa realizada na Pilha C, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz silto-argilosa) e da fundação (saprólito e filito). Bem como o comportamento destes em relação à permeabilidade e resistência.

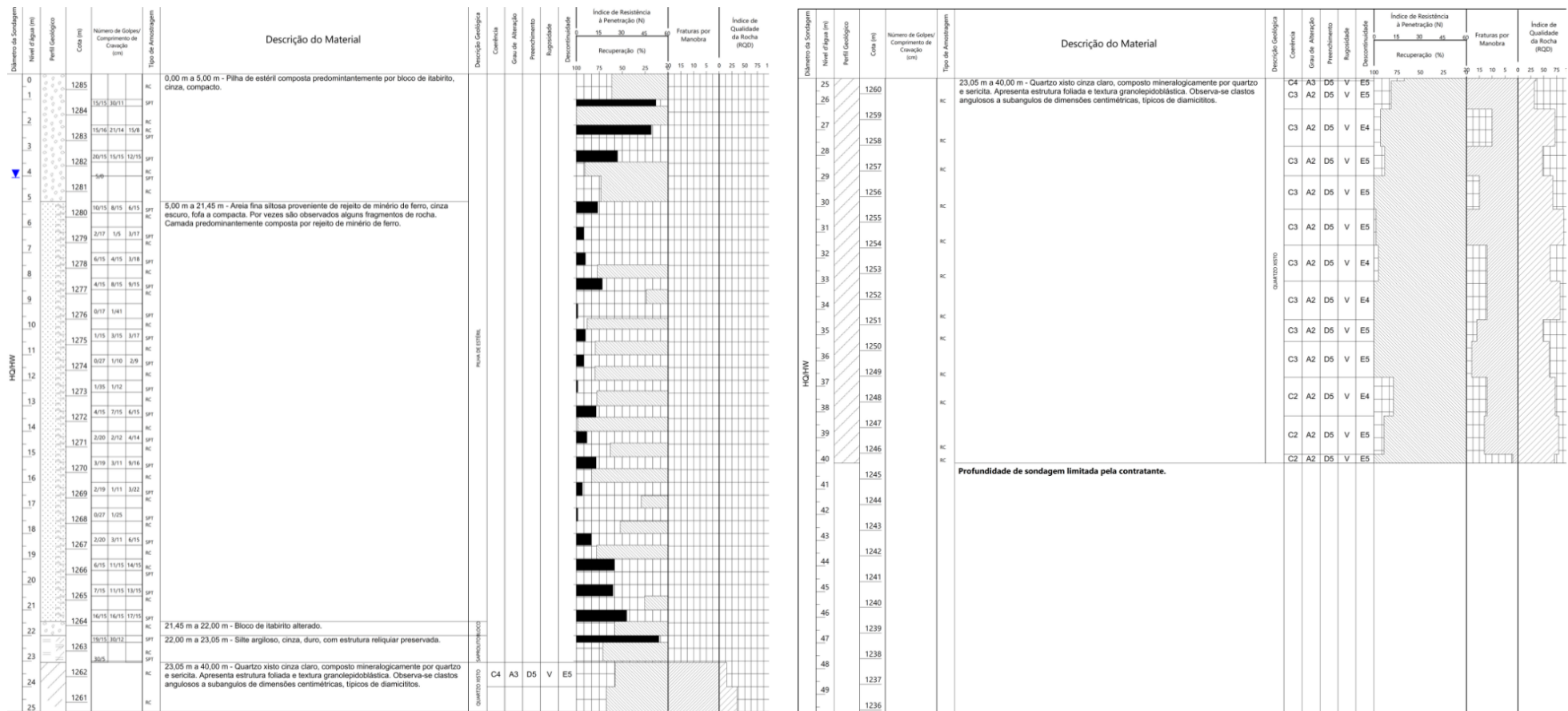


Figura 4.8 - Sondagem rotativa realizada na Pilha C, com detalhamento do material que compõe a pilha (blocos de litologias diversas em meio a matriz silto-argilosa) e da fundação (saprólito e quartzo xisto). Bem como o comportamento destes em relação à permeabilidade e resistência.

A Pilha C totalizou 950 pontos, enquadrando-se na Classe II, e tendo baixo potencial de ruptura, conforme indicado na Tabela 4.3. (O potencial de ruptura não seria maior, devido a nota maior?)

Tabela 4.3 - Tabela de pontuação da Pilha C, utilizando da metodologia apresentada neste trabalho.

Fatores Chave que afetam a estabilidade da pilha.		Faixa de condições/descrições.	Pontuação.
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	150m	100
	Volume da Pilha	Pequeno	0
	Inclinação do Talude	Íngreme	100
Inclinação da Fundação		Moderada	100
Grau de confinamento		Moderadamente Confinado	50
Tipo de Fundação		Intermediária	100
Qualidade do Material da Pilha		Pobre	200
Método de Construção		Favorável	0
Condições Piezométricas e Climáticas		Intermediária	200
Taxa de Disposição		Moderada	100
Sismicidade		Baixa	0
Total de Pontos		950	

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

O método de classificação de pilhas de estéril apresentado fundamenta-se no julgamento de variáveis, como qualidade do material, condições dos materiais e taxas de movimentação. Por meio do sistema apresentado por Aragão, 2008, é possível realizar a classificação variáveis, consideradas críticas para o comportamento das pilhas de estéril, permitindo a intervenção em resultados não satisfatórios e mudanças preventivas e corretivas em qualquer situação indesejável que a pilha se encontrar, em qualquer fase de sua vida útil, bem como após sua inativação. Além disso, a partir da consideração das mesmas, promove-se a ideia de que as pilhas não podem ser consideradas massas homogêneas e isotrópicas, nem perfeitamente drenantes.

É válido salientar que exigências de monitoramento podem ser mensuradas a partir da classificação adotada, visto que a mesma permite identificar o tipo de instrumentação adequado para cada fase em que a estrutura se encontra. Para as classes III e IV, exige-se monitoramento com instrumentos, além do visual, já para pilhas de classe I e II, o monitoramento com instrumentos é exigido apenas se forem detectados movimentos anormais (Aragão, 2008).

As pilhas de estéril analisadas apresentam características semelhantes, sendo planejadas, projetadas e construídas com acompanhamento técnico. Foram construídas de modo ascendente, sendo esta uma boa prática para a estabilidade da estrutura. A disposição do estéril se deu após estudo geológico-geotécnico, a fim de encontrar uma área que comporte o volume necessário e cause menor impacto ambiental. Já o monitoramento acompanha as fases da vida das pilhas, variando de complexidade de acordo com as necessidades das estruturas. Todo esforço deve ser realizado no sentido de adequar as taxas de subida (a fim de evitar o excesso de poropressões e problemas com o adensamento do material), permitir a disposição adequada do material e minimizar a instabilidade.

O sistema de classificação não é uma ferramenta de análise de risco, entendendo-se risco como o produto do perigo pela consequência (Aragão, 2008), visto que avalia o potencial de instabilidade, mas não apresenta medidas de exposição plausível. Também não substitui uma análise de estabilidade clássica, atuando como uma ferramenta complementar a esta.

Deste modo, a aplicação do sistema proposto às pilhas escolhidas permite afirmar que se trata de um instrumento útil para a avaliação de todas as fases da vida de uma pilha, em especial no seu planejamento, visto que auxilia a escolha dos possíveis locais de disposição do estéril ao estimar o nível de esforço para cada uma das classes encontradas. No caso de aplicações em pilhas em atividade, a verificação das variáveis permite avaliar o nível do potencial de ruptura associado à classe, bem como os níveis de esforços a serem aplicados. O mesmo pode ser realizado em pilhas inativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) 2017. NBR13029/2017 - Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha.
- Alkmim F.F & Marshak, S. 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region. Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90 (1-2):29-58.
- Alkmim F.F. & Martins-Neto, M.A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33, 127–139.
- Almeida F. F. M. 1977. O Craton de São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 7 (4): 349- 364.
- Almeida, F. F. M., Amaral, G., Cordani, U., & Kawashita, K. 1973. The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of the Amazon River. In *The South Atlantic* (pp. 411-446). Springer, Boston, MA.
- Aragão, G.A.S. 2008. Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Ávila C.A., Teixeira W., Bongioiolo E.M., Dussin I.A., Vieira T.A.T. 2014. Rhyacian evolution of subvolcanic and metasedimentary rocks of the Southern segment of the Mineiro belt, São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research*, 243:221-251.
- Baltazar O.F. & Zucchetti, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. *Ore Geology. Reviews* 32, 1–2.
- BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991. *Mined Rock and Overburden Piles. Investigation & Design Manual. Interim Guidelines*, 128p.
- Chemale Jr., F., Rosière, C. A. & Endo, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Res.* 65, 25–54.
- Dorr II, J.V.N. 1969. Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper 614 – A, 110 p.

Tarabini. P.P. 2023, Avaliação da Segurança Geotécnica de Pilhas de Estéril de Mineração de Ferro.

Eaton, T. Broughton, S., Berger, K.C., Piteau Associates Engineering Ltd, 2005. *Couse Introduction Design and Operation of Large Waste Dumps*. Under License from British Columbia Ministry of Energy and Mines – Mine Dump Committee.

Endo I., Machado R., Galbiatti H.F., Rossi D.Q., Zapparoli A. de C., Delgado C.E.R., Castro P. de T.A., Oliveira M.M.F. de. 2020. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. (Org. Castro P. de T.A, Endo I., Gandini A.L.) Belo Horizonte: 3i editora, 70-113.

Farina, F., Albert, C., Dopico, C. M., Gil, C. A., Moreira, H., Hippertt, J. P., Lana, C. 2016. The Archean– Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, 68, 4-21.

Freitas, M.A. *Apostila Sobre Formação de Pilhas de Estéril e Rejeito*. Belo Horizonte: Editora Ietec, 2004, p.3-20.

McCarter, M.K., 1990. Design and Operating Considerations for Mine Waste Embankments. In: *Surface Mining*, (Ed.) Barbara A. Kennedy. Society for Mining Metallurgy. p. 890-899.

Robertson, A. MacG. & Shaw, S 2003: “Risk Management for Major Geotechnical Structures on Mines”. In proceedings of Computer Applications in the Mineral Industries (CAMI), Calgary, Alberta, Canadá, p.8-10.

Robertson, A. MacG., Steffen & Kirsten, 1985. “Mine Waste Disposal: An Update on Geotechnical and Geohydrological Aspects,” Vancouver, Canadá, 24p.

Zucchetti M. & Baltazar O.F. (eds.). 1996. *Projeto Rio das Velhas–Texto explicativo do mapa geológico integrado, escala 1:100.000*. 2nd ed. Departamento Nacional da Produção Mineral/CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, Brasil, 122 p.

