

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO DE UM MACIÇO EM SOLO RESIDUAL DE  
FILITO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

**THIAGO BRIENNE GONÇALVES GOMES**

**ORIENTADOR: RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**BRASÍLIA-DF**  
**SETEMBRO/2021**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO DE UM MACIÇO EM SOLO RESIDUAL DE  
FILITO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

**THIAGO BRIENNE GONÇALVES GOMES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

**APROVADA POR:**

---

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**TALES MOREIRA DE OLIVEIRA, DSc (UFSJ)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 01 DE SETEMBRO DE 2021

## FICHA CATALOGRÁFICA

GOMES, THIAGO BRIENNE GONÇALVES

Comportamento de um maciço em solo residual de filito no Quadrilátero Ferrífero / Thiago Brienne Gonçalves Gomes; orientador: Rafael Cerqueira Silva. -- Brasília, 2021.

xvi 88 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2021)

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, 2021.

1. Quadrilátero Ferrífero
2. Filito
3. Cavidade
4. Rebaixamento do nível de água.

I. ENC/FT/UnB      II. Título (Série)

## REFERÊNCIA

Gomes, T. B. G. (2021). Comportamento de um maciço em solo residual de filito no Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-356/2021, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Thiago Brienne Gonçalves Gomes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Comportamento de um maciço em solo residual de filito no Quadrilátero Ferrífero. GRAU / ANO: Mestre / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Thiago Brienne Gonçalves Gomes  
Brasília/DF – Brasil

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico essa realização aos meus pais, José Claret e Elizabete, e à minha esposa*

*Graciane*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus, Pai todo poderoso, pela minha vida, minha saúde e pela vida das pessoas que amo. Obrigado pela Sua proteção e pelo Seu infinito amor.

Agradeço aos meus pais, José Claret e Elizabete, instrumentos de Deus para a minha existência, que me deram todo o suporte e me encorajaram a buscar meus sonhos.

Obrigado Graciane, meu amor. Obrigado por ser uma esposa maravilhosa, por me apoiar em absolutamente tudo, ser uma grande parceira e por dividir comigo, para sempre, o maior dom divino, a Família.

Obrigado Laura e Carol por todo o apoio, pelas conversas sinceras e por estarem sempre juntas comigo, dividindo todos os momentos da vida.

Agradeço muito e dedico essa vitória à minha avó Dona Fiinha, um exemplo de força e vitalidade, uma mãe, uma das pessoas que mais desejou ver esse sonho realizado. Agradeço aos meus avós, não mais presentes, Ziquita, Maria Ramos e Jose Marcelino, que comemoram do céu essa conquista e, em nome deles, às famílias Gonçalves e Gomes.

Agradeço ao Sr. Manoel Queiroz (*in memorian*) e D. Luzia, Emanuel, Ábia e Emanuela, muito obrigado pelo apoio e por todos os ensinamentos.

Agradeço aos grandes amigos Gustavo, Peu, Higor, Marcos e Pedro que me acompanham desde a graduação e pelos quais tenho grande admiração.

Ao meu orientador, professor Rafael, pelo apoio, paciência e pelas valiosas contribuições nessa caminhada, muito obrigado. Estendo este agradecimento a todos os professores da Geotecnia, que prestam uma enorme contribuição para a engenharia geotécnica no mundo.

Aos colegas de mestrado Thiago Freitas, Weber, Márcio, Joaquim, Matheus, Nathália, Erick, Casagrande e Fernando, obrigado pela amizade e pela colaboração nesse período.

À Concessionária Via040 pelo fornecimento de dados e apoio na elaboração dos estudos, em parceria com a Enggeotech, viabilizados através do Recurso de Desenvolvimento Tecnológico (RDT), disponibilizados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT).

Agradeço ao INFRAGEO-UFSJ pelo suporte prestado nesse trabalho.

Agradeço também ao apoio financeiro do CNPq.

# **COMPORTAMENTO DE UM MACIÇO EM SOLO RESIDUAL DE FILITO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

## **RESUMO**

Foi avaliado o comportamento de uma movimentação de massa em local de geologia complexa, formada a partir de intensa ação tectônica, situada no Quadrilátero Ferrífero. Destaca-se a ocorrência de materiais com foliação bem marcada, predominando o filito. As investigações geotécnicas consistiram de sondagens, levantamento geofísico, ensaios laboratoriais e monitoração inclinométrica e do lençol freático. Neste arcabouço geológico ocorrem escavações de grande porte, que alteram o estado de tensões e regime da água subterrânea do maciço. A redistribuição de tensões também possui relação com as características estruturais dos geomateriais, cujos eventos deformacionais, que marcaram a evolução geológica, contribuíram com a formação de dobras. Em função de tais ocorrências, a consequente alteração da direção das tensões principais pode potencializar os efeitos da descompressão. As trincas, muito persistentes, profundas e abertas, apresentam relação com as descontinuidades e foliações existentes nas rochas e solos. Entretanto, não se observa relação entre as direções das trincas e dos deslocamentos, havendo paralelismo e perpendicularismo entre estes. A velocidade dos deslocamentos é constante e extremamente lenta, sendo direcionados para o lado de montante, onde ocorrem as intervenções. A inclinometria não evidencia uma zona de deslizamento. Com indicativos de que antes das escavações os cursos d'água afloravam no terreno, o lençol freático muito profundo sugere a ocorrência de rebaixamento e inversão do fluxo de água subterrânea. A presença de cavidade aflorando na base do maciço e outras possíveis, como sugerido pela geofísica, associada ao rebaixamento do lençol freático, poderia ser uma condição para a ocorrência dos abatimentos pronunciados. A presença de dobras também pode influenciar no fluxo de água subterrânea. As trincas e estruturas planares dos materiais tendem a evoluir pelos abalos sísmicos causados por detonações. Pode-se concluir que a movimentação é afetada tanto pelos agentes predisponentes, quanto pelos efetivos, em diferentes graus de importância, difíceis de mensurar.

## **BEHAVIOR OF A PHYLLITE RESIDUAL SOIL MASS IN THE QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

### **ABSTRACT**

The behavior of a mass movement in a place of complex geology, formed from intense tectonic action situated in the Cuadrilátero Ferrífero, was evaluated. The occurrence of materials with well-marked foliation, predominantly phyllite, is highlighted. The geotechnical investigations consisted of boreholes, geophysical surveys, laboratory tests, inclinometer, and water table monitoring. Extensive excavations occur in this geological framework, which changes the massif's stress state and groundwater regime. The stress redistribution is also related to the structural characteristics of the geomaterials, whose deformational events, which marked the geological evolution, contributed to the formation of folds. The consequent change in the direction of the principal stresses can potentiate the effects of decompression. The very persistent, deep, and open cracks are related to the discontinuities and foliations existing in rocks and soils. However, no relationship is observed between the directions of cracks and displacements, with parallelism and perpendicularism between them. The speed of the displacements is constant and extremely slow, being directed towards the upstream side, where the interventions occur. The inclinometer does not show a sliding zone. With indications that prior to the excavations, watercourses were outcropping on the terrain, the very deep water table suggests the occurrence of lowering and reversal of groundwater flow. The presence of cavities outcropping at the base of the massif and other possible ones, as indicated by geophysics, associated with the lowering of the water table, could be a condition for the occurrence of the pronounced subsidence. The presence of folds can also influence groundwater flow. Cracks and planar structures of the materials tend to evolve by seismic shaking caused by detonations. It can be concluded that the movement is affected by both predisposing and effective agents, in different degrees of importance, difficult to measure.

## SUMÁRIO

---

CAPÍTULO 1 .....	1
1 -INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Motivação da Pesquisa .....	2
1.2 - Objetivos.....	2
1.3 - Estrutura da Dissertação .....	3
CAPÍTULO 2 .....	4
2 -REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1 - Geologia do Quadrilátero Ferrífero .....	4
2.2 - Aspectos Geológicos Regionais .....	9
2.3 - Aspectos Geotécnicos Locais .....	10
2.4 - Águas Subterrâneas .....	14
2.5 - Redistribuição de Tensões .....	15
2.6 - Presença de Cavidades.....	18
2.7 - Efeitos de Explosivos em Maciços de Solo e Rocha.....	21
2.8 - Movimentos de Massa .....	23
CAPÍTULO 3 .....	25
3 -ÁREA DE ESTUDO .....	25
CAPÍTULO 4 .....	30
4 -METODOLOGIA.....	30
4.1 - Investigação Geológico-Geotécnica .....	32
4.2 - Instrumentação.....	33
4.2.1 - Inclinômetros .....	33
4.2.2 - Piezômetro de Tubo Aberto (Casagrande).....	35
4.2.3 - Medidor de Nível de Água.....	36
4.2.4 - Dados Pluviométricos .....	39



4.3 -	Ensaio de Laboratório .....	39
4.3.1 -	Caracterização Geotécnica .....	40
4.3.2 -	Ensaio de Permeabilidade .....	40
4.3.3 -	Ensaio de Cisalhamento Direto.....	41
4.3.4 -	Ensaio de Compressão Triaxial.....	44
CAPÍTULO 5 .....		49
5 -	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
5.1 -	Ensaio de Laboratório .....	49
5.1.1 -	Caracterização Geotécnica .....	49
5.1.2 -	Permeabilidade à Carga Variável.....	51
5.1.3 -	Cisalhamento Direto .....	52
5.1.4 -	Ensaio de Compressão Triaxial.....	61
5.2 -	Modelo geológico .....	65
5.3 -	Instrumentação e Investigações de Campo.....	68
CAPÍTULO 6 .....		79
6 -	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	79
6.1	Conclusões.....	79
6.2	Sugestões para pesquisas futuras .....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		83

## **LISTA DE TABELAS**

---

Tabela 5.1. Resultado da análise granulométrica com e sem o uso de defloculante. ....	49
Tabela 5.2. Ensaios de caracterização geotécnica e condutividade hidráulica.....	50
Tabela 5.3. Coeficiente de permeabilidade de acordo com a orientação de fluxo e material.....	51
Tabela 5.4. Consolidação das características iniciais e finais dos corpos de prova. ....	53
Tabela 5.5. Parâmetros obtidos no ensaio de Cisalhamento Direto. ....	60
Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos no ensaio de Compressão Triaxial – CID .....	63
Tabela 5.7. Classificação quanto à velocidade do movimento de massa (Varnes, 1978). .....	73

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1. Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> , 2019) .....	4
Figura 2.2 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> , 2019).....	6
Figura 2.3. Feições estruturais do Quadrilátero Ferrífero (Baltazar e Zuchetti, 2007 modificado de Chemale Jr. <i>et al.</i> , 1994).....	7
Figura 2.4. Seção geológica próxima à área de estudo (Modificado de Endo, 2019)....	8
Figura 2.5. Mapa geológico do local de estudo (modificado – Endo, 2019); .....	9
Figura 2.6. Filito encontrado no local de estudo com planos de foliação bem definidos. .....	11
Figura 2.7. Processos erosivos na face do talude sul.....	13
Figura 2.8. Mapa esquemático de articulação do sistema de <i>nappes</i> do Quadrilátero Ferrífero e as principais falhas/zonas de cisalhamento (Castro <i>et al</i> , 2020).....	17
Figura 2.9. Dobras anticlinais e sinclinais na face do talude sul.....	18
Figura 2.10. Distribuição de cavernas no Quadrilátero Ferrífero (Castro <i>et al</i> , 2020). 19	
Figura 2.11. Perfil de cavidade em contato canga / minério formado por erosão em cabeceira de drenagem (Dutra, 2013).....	20
Figura 2.12. Tipos de ondas sísmicas (Modificado de Sciencelearn, 2021) .....	21
Figura 2.13. Diagrama de distribuição de detonação (Iramina, 2002). .....	22
Figura 2.14 - Mapas de isovelocidades de propagação (Silveira, 2017).....	23
Figura 3.1. Imagem aérea do traçado original da Rodovia BR 040 na área de estudo (Google Earth, 2021).....	25
Figura 3.2. Imagem aérea do traçado atual da Rodovia BR 040 na área de estudo (Google Earth, 2021).....	26
Figura 3.3. Vistas dos taludes norte e sul do corte pleno. a) Talude Norte; b) Talude Sul. .....	26
Figura 3.4. Trincas verificadas no trecho do talude de corte norte. ....	27
Figura 3.5. Trincas no talude de corte norte e no pavimento. ....	28
Figura 3.6. Avanço da cava em direção ao talude de corte. ....	29
Figura 4.1. Traçados das linhas geoeletricas para investigação geofísica.....	31
Figura 4.2. Ponto de coleta de Bloco Indeformado para realização de ensaios. ....	31
Figura 4.3. Locação dos furos de sondagens executadas na área de estudo.....	33
Figura 4.4. Princípios de operação do inclinômetro (adaptado de Dunnicliff, 1988)..	34

Figura 4.5. Materiais e equipamentos utilizados para instalação e aquisição de dados. .....	35
Figura 4.6. Perfil genérico de instalação de um piezômetro de tubo aberto.....	36
Figura 4.7. Perfil genérico de instalação de um medidor de nível d'água. ....	37
Figura 4.8. Perfil genérico da instalação conjunta de piezômetro de tubo aberto e medidor de nível d'água.....	38
Figura 4.9. Instrumentação instalada na área de estudo. ....	39
Figura 4.10. Localização dos pontos de amostragem para realização de ensaios de laboratório. ....	40
Figura 4.11. Amostragem para ensaio de cisalhamento direto.....	41
Figura 4.12. Planos preferenciais de ruptura observados na amostragem do solo. ....	42
Figura 4.13. Corpos de prova de solo residual maduro de filito (SRMF) – condição natural.....	42
Figura 4.14. Corpos de prova de solo residual maduro de filito (SRMF) – condição inundada. ....	43
Figura 4.15. Corpos de prova de solo residual jovem de filito (SRJF) – condição natural.....	43
Figura 4.16. Corpos de prova de solo residual jovem de filito (SRJF) – condição inundada. ....	43
Figura 4.17. Retirada de blocos indeformados para a realização de ensaios de laboratório. ....	45
Figura 4.18. Equipamento para ensaio de compressão triaxial. ....	45
Figura 4.19. Corpos de prova – antes do ensaio de compressão triaxial.....	46
Figura 4.20. Componentes de montagem dos corpos de prova. ....	47
Figura 5.1. Curva granulométrica dos materiais ensaiados.....	50
Figura 5.2. Carta de plasticidade dos materiais.....	51
Figura 5.3. Curva de deformação horizontal por tensão de cisalhamento – SRMF(2018) em Condição Natural.....	54
Figura 5.4. Envoltória de resistência – SRMF(2018) em Condição Natural.....	54
Figura 5.5. Curva de deformação horizontal por tensão de cisalhamento – SRMF(2018) em Condição Inundada.....	55
Figura 5.6 – Envoltória de resistência – SRMF(2018) em Condição Inundada.....	56
Figura 5.7. Curva de deformação horizontal por tensão de cisalhamento – SRJF(2018) em Condição Natural.....	57

Figura 5.8. Envoltória de resistência – SRJF(2018) em Condição Natural.....	57
Figura 5.9. Curva de deformação horizontal por tensão de cisalhamento – SRJF(2018) em Condição Inundada.....	59
Figura 5.10. Envoltória de resistência – SRJF(2018) em Condição Inundada.....	59
Figura 5.11 – Trajetória de tensões efetivas do ensaio de compressão triaxial.....	61
Figura 5.12 – Relação deformação axial versus tensão de desvio no carregamento....	62
Figura 5.13 – Envoltória e parâmetros de resistência obtidos no ensaio de compressão triaxial.....	62
Figura 5.14 – Corpos de prova após ruptura no ensaio de compressão triaxial. ....	64
Figura 5.15 – Superfície de ruptura do corpo de prova. ....	64
Figura 5.16. Mapa estrutural simplificado e seções geológico-estruturais da região Centro-Sul da Sinclinal da Moeda, com indicação (em vermelho) do local de estudo (adaptado – Gomes, 2015). ....	65
Figura 5.17. Imagem aérea sobre topografia e hidrografia para auxiliar na definição do lençol freático.....	66
Figura 5.18. Modelo geológico interpretado a partir da campanha investigação geotécnica. (os taludes rodoviários da direita e da esquerda são, respectivamente, os taludes norte e sul).....	67
Figura 5.19. Disposição dos instrumentos em planta com vetores de deslocamento horizontal dos inclinômetros. ....	68
Figura 5.20. Verticais inclinométricas dos instrumentos I-1 e I-3. ....	69
Figura 5.21. Verticais inclinométricas dos instrumentos I-2 e I-4. ....	70
Figura 5.22. Análise de estabilidade do maciço homogêneo. ....	71
Figura 5.23. Evolução dos deslocamentos horizontais máximos verificados nos inclinômetros.....	72
Figura 5.24. Seção geofísica L-2 com as verticais inclinométricas e sondagens. ....	73
Figura 5.25. Relação entre instrumentação, investigações geofísicas e as trincas observadas na rodovia. ....	74
Figura 5.26. Cavidade verificada no afloramento rochoso do talude norte.....	75
Figura 5.27. Detalhe do interior da cavidade. ....	75
Figura 5.28. Intervalo aproximado de valores de resistividade encontrados em rochas, canga e cavidades em rocha. (Cardoso, 2016). ....	76
Figura 5.29. Variação do nível d'água medida no instrumento MNA-1 e pluviometria correspondente no período de monitoramento. ....	77

Figura 5.30. Deformações trincas no pavimento na direção do afloramento rochoso com presença de cavidade..... 78

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

AASHTO .....	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT.....	Associação Brasileira de Norma Técnicas
ASTM.....	America Society of Testing Materials
$c'$ .....	Intercepto coesivo
$d_f$ .....	Estimativa de deslocamento lateral relativo para a ruptura
$e$ .....	Índice de vazios
$e_0$ .....	Índice de vazios inicial
FS.....	Fator de Segurança
FFB.....	Formações Ferríferas Bandadas
$G_s$ .....	Massa específica dos sólidos
IP.....	Índice de Plasticidade
$L$ .....	Altura da amostra
LL.....	Limite de Liquidez
LP.....	Limite de Plasticidade
$m$ .....	Metro(s)
NBR.....	Norma Brasileira
$R_d$ .....	Taxa de deslocamento durante o cisalhamento
$S_0$ .....	Grau de saturação inicial
$S_f$ .....	Grau de saturação final
$t_{90}$ .....	Tempo necessário para se atingir 90% do grau de adensamento
$t_{100}$ .....	Tempo necessário para se atingir 100% do grau de adensamento

$t_f$ .....	Tempo estimado até a ruptura do CP
UnB .....	Universidade de Brasília
$W_{nat}$ .....	Teor de umidade natural
$w_i$ .....	Teor de umidade inicial
$w_f$ .....	Teor de umidade final
$\Delta\varepsilon$ .....	Taxa de deformação na fase de compressão axial
$\Delta h$ .....	Deslocamento vertical máximo
$\delta$ .....	Massa específica dos grãos
$\varepsilon_a$ .....	Deformação axial específica
$\varepsilon_h$ .....	Deformação horizontal específica
$\Omega$ .....	Ohm
$\sigma_n$ .....	Tensão normal
$\sigma_d$ .....	Tensão desviadora ou desvio
$\sigma_1$ .....	Tensão normal vertical
$\sigma_3$ .....	Tensão de confinamento ou Tensão normal horizontal
$\gamma_{nat}$ .....	Massa específica aparente natural
$\tau$ .....	Tensão cisalhante
$\phi'$ .....	Ângulo de atrito efetivo



## 1 - INTRODUÇÃO

A rodovia BR-040 é uma das mais importantes vias da malha rodoviária brasileira, uma vez que liga Brasília (DF) ao Rio de Janeiro (RJ), passando por Belo Horizonte (MG), e escoar a produção de diversos setores do mercado, tais como agricultura, siderurgia, mineração, indústria automotiva, dentre outros.

O Subtrecho da BR-040, localizado entre os municípios mineiros de Belo Horizonte e Congonhas, possui importância regional, pois recebe grande tráfego produzido pela atividade siderúrgica e minerária praticada na região da Serra da Moeda. A região está inserida no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, que mostra concentrações econômicas de ferro e ouro, dentre outros bens minerais. Esse complexo geológico, cujo nome remete a uma área de forma retangular em mapa, é dividido em três unidades geológicas principais que possuem rochas de características comuns. A região em estudo, especificamente, compõe o Supergrupo Minas, a unidade geológica que compreende as principais serras do Quadrilátero Ferrífero (Hasui, 2012).

O atual eixo da rodovia, em seu km 578+500, se encontra entre dois taludes de corte, denominados talude norte (adjacente à pista sentido Brasília) e talude sul (adjacente à pista sentido Rio de Janeiro) nesse trabalho, onde são observadas trincas muito persistentes e abertas. Tais trincas se estendem ao pavimento provocando o abatimento do mesmo e sinalizam uma movimentação contínua do talude norte em direção ao talude sul, que é adjacente a uma cava de mineração em operação.

No contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, o local de estudo pertence, em sua maior parte, à formação Gandarela, unidade geológica de topo do Grupo Itabira. Entretanto, a região específica de estudo onde as movimentações são observadas compreende o encontro de três unidades geológicas: Formação Gandarela, Formação Cauê e uma unidade denominada Canga, composta por um capeamento limonítico contendo, principalmente, matacões de formação ferrífera e hematita cimentada (Bezerra, 2014). A interface entre as três unidades traz uma complexidade na caracterização dos materiais, especialmente o solo residual de filito, e nas análises do comportamento do maciço realizadas por meio de ensaios de campo e laboratoriais, bem como monitoração de instrumentação geotécnica.

De acordo com Guidicini e Nieble (1984), os aspectos naturais que dão condições para que um movimento de massa ocorra (conjunto de condições geológicas, geométricas e ambientais) recebem a denominação de agentes predisponentes. Já os elementos diretamente

responsáveis por desencadear um movimento de massa, tal qual a ação humana, são designados agentes efetivos. As estruturas reliquias e foliações presentes nos filitos, falhamentos e dobramentos causados por intensa ação tectônica, ocorrência de cavidades e aspectos relacionados ao clima e regime de águas subterrâneas podem ser compreendidas como agentes predisponentes, no âmbito do complexo geológico, complexo morfológico e complexo climático-hidrologico, respectivamente, que podem atuar a favor da movimentação. Nesse contexto, a ação de agentes efetivos, em especial as intervenções antrópicas, pode potencializar processos geomecânicos e atuar diretamente na deflagração dos movimentos observados.

As escavações de uma cava de mineração, a exposição dos materiais à ação intempérica, o rebaixamento do lençol freático, a ocorrência de detonações, a existência de cavidades e todo o conjunto de características dos âmbitos geológico e geotécnico, próprias dos materiais encontrados na área de estudos, compõem os principais agentes e causas das movimentações verificadas.

Essa pesquisa visa, portanto, estudar aspectos geológicos e geotécnicos dos geomateriais encontrados na área de estudo, bem como contribuir para o entendimento da atuação do conjunto de agentes predisponentes e efetivos que podem influenciar nas movimentações observadas. O comportamento do maciço é analisado por meio dos resultados de sondagens, ensaios, monitoração e dados da literatura.

## **1.1 - Motivação da Pesquisa**

As características dos solos e rochas do Quadrilátero Ferrífero são objeto de estudo e publicações não só pelo contexto de gestão de estruturas geotécnicas inseridas nas rodovias, mas também pelas mineradoras presentes nessa região.

Desse modo, a avaliação do comportamento do solo residual de filito e dos fenômenos observados na área de estudo tende a contribuir para o entendimento do comportamento desse material e auxiliar nas intervenções de engenharia. A compreensão dos mecanismos analisados também pode se consolidar como fonte de referência para elaboração de projetos com materiais e condições de contorno semelhantes.

## **1.2 - Objetivos**

Este estudo tem por objetivo avaliar o comportamento de um maciço de geologia complexa, interceptado por uma rodovia e adjacente à uma cava de exploração minerária, contribuindo assim com o entendimento das características físicas e do desempenho hidromecânico de geomateriais típicos do Quadrilátero Ferrífero.

São objetivos específicos dessa pesquisa:

- Analisar resultados de investigações geotécnicas compostas por monitoramento das movimentações, das precipitações e variações do lençol freático (níveis d'água e piezométrico), bem como sondagens rotativa e geofísica, ensaios laboratoriais e topografia;
- Relacionar a atuação dos agentes predisponentes e efetivos com o comportamento observado, à luz do modelo de engenharia idealizado, a fim de identificar os processos geomecânicos atuantes;
- Identificar possíveis modos de ruptura atuantes;

### **1.3 - Estrutura da Dissertação**

A dissertação está estruturada em seis Capítulos. No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução e contextualização da área de estudo e das características geológicas e geotécnicas dos materiais que ali ocorrem. Também são apontados a motivação e os objetivos pelos quais o presente trabalho foi realizado.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema a fim de contextualizar o leitor com o tema proposto e o conhecimento técnico utilizado para desenvolvê-lo. Dentre os assuntos abordados neste Capítulo destacam-se: a geologia do Quadrilátero Ferrífero, aspectos geotécnicos dos materiais encontrados na área de estudo, uma breve revisão sobre movimentos de massa e modos de ruptura. No Capítulo 3, é apresentado um detalhamento da área de estudo, partindo do histórico de intervenção, passando pelas ocorrências verificadas na área e as intervenções realizadas.

O Capítulo 4 apresenta as ferramentas utilizadas para a compreensão das movimentações bem como aspectos de amostragem e ensaios realizados como cumprimento das investigações de campo e laboratório realizadas.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nas investigações de campo, instrumentações e nos ensaios de laboratório contendo discussões dos resultados e relações com trabalhos apresentados na literatura que contribuem para análises realizadas. O Capítulo 6 encerra o trabalho com as conclusões obtidas e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

### 2 - REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 - Geologia do Quadrilátero Ferrífero

Derby (1906) formulou a primeira nomeação formal para as rochas metassedimentares pré-cambrianas do Quadrilátero Ferrífero, denominando-as Série Minas. Desde então, houve uma busca contínua por aperfeiçoar a ordem de sucessão e esclarecer as complexidades estruturais e estratigráficas das rochas da região (Bezerra, 2014).

O Quadrilátero Ferrífero abrange uma área de 7.000 km<sup>2</sup> localizada na porção central do estado de Minas Gerais, no limite sudeste do Cráton do São Francisco e compreende unidades geológicas formadas em diferentes períodos que se aproximaram ou sofreram superposição geográfica (Dorr, 1969). Nesse contexto, regiões que apresentavam rochas de características semelhantes foram nomeadas, dando origem a três unidades geológicas principais: Complexo Granito-Gnáissico, que ocorre nas faces externas do Quadrilátero Ferrífero e inclui o (Complexo Bação), Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas, como mostra a Figura 2.1, que apresenta um mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.

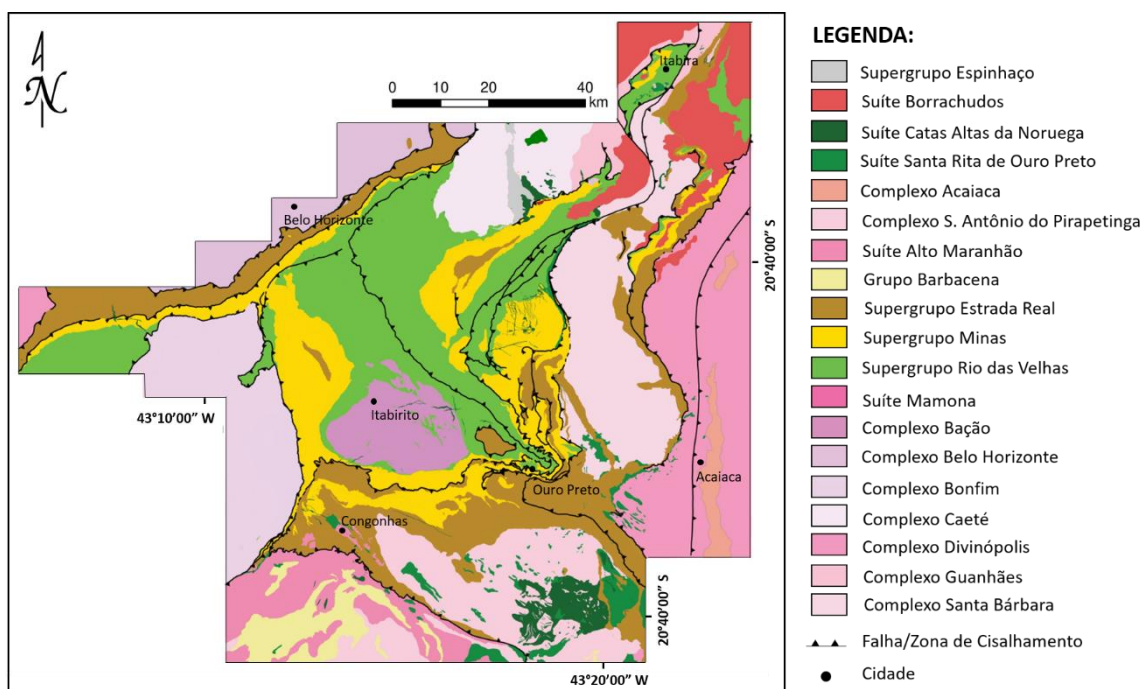


Figura 2.1. Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.*, 2019)

A região central desse complexo geológico é formada por rochas do Complexo Granito-Gnáissico e Supergrupo Rio das Velhas, enquanto o Supergrupo Minas constitui as principais

serras, com rochas mais resistentes à erosão, como os quartzitos e formações ferríferas (Hasui, 2012).

De acordo com Schorscher (1979), o Supergrupo Rio das Velhas compreende um clássico terreno tipo granito-greenstone, arqueano, a priori constituído por uma sequência metavulcanossedimentar. Consiste em rochas vulcânicas ultramáficas sobrepostas por rochas metassedimentares químicas e clásticas, tais como quartzitos, filitos cloríticos, metaconglomerados.

Dorr (1969) dividiu o Supergrupo Minas em quatro grupos, sendo dois grupos de base (Tamanduá e Caraça), separados por uma discordância como produto de provável erosão, seguido de uma sobreposição gradual para o grupo intermediário (Itabira) e um grupo de topo (Piracicaba). Alguns autores consideram a base Supergrupo Minas apenas como Grupo Caraça, que compreende os Grupos Tamanduá e Caraça. A sequência sobrejacente composta pelo Grupo Sabará, foi interpretada como um depósito de leques submarinos.

O Grupo Tamanduá foi dividido por Simmons e Maxwell (1961) em uma unidade nomeada Cambota e uma unidade sem denominação. A unidade Cambota é composta por quartzitos, xistos e filitos (Costa, 2009), enquanto a unidade não nomeada acomoda quartzitos, xistos, filitos e é mapeada apenas em áreas restritas (Dorr, 1969).

O Grupo Caraça foi estabelecido por Dorr *et al* (1957) para incluir as rochas clásticas localizadas acima da discordância que o separa do Grupo Tamanduá e abaixo dos sedimentos químicos do Grupo Itabira (Dorr, 1969). O Grupo Caraça apresenta as formações Moeda, inferior, e Batatal, superior. A formação Moeda é constituída por quartzitos finos a grosseiros com níveis conglomeráticos, filitos quartzosos e quartzitos sericíticos, com lentes de filitos arenosos (Wallace, 1958), e na formação Batatal, predominam filitos sericíticos, por vezes carbonosos ou ferruginosos (Costa, 2009).

O Grupo Itabira é formado por uma sequência de metassedimentos químicos do Supergrupo Minas, sobrepostos em contato abrupto ou gradacional ao Grupo Caraça. Em 1958 o grupo Itabira foi dividido em duas unidades intergradacionais: A formação Cauê, constituída basicamente de formação ferrífera e lentes de quartzitos ferruginosos, e a formação Gandarela, formada, em grande parte, por rochas carbonáticas de vários tipos (Dorr 1969). Essa formação encontra-se em contato erosivo e discordante com o Grupo Piracicaba, que compõe o topo do Supergrupo Minas (Costa, 2009).

O Grupo Piracicaba, apresenta duas formações principais: Cercadinho e Fecho do Funil. A formação Cercadinho caracteriza-se pela alternância de quartzitos e filitos, frequentemente ferruginosos. A formação Fecho do Funil é constituída por filitos quartzosos, filitos dolomíticos

e lentes de dolomito. As formações Taboões, constituída de ortoquartzitos, e Barreiro, caracterizada pela presença de filitos grafitosos, são de ocorrência restrita (Hasui, 2012). Endo (2019) apresenta, na Figura 2.2, uma coluna estratigráfica detalhada do Quadrilátero Ferrífero contendo as ocorrências minerais.

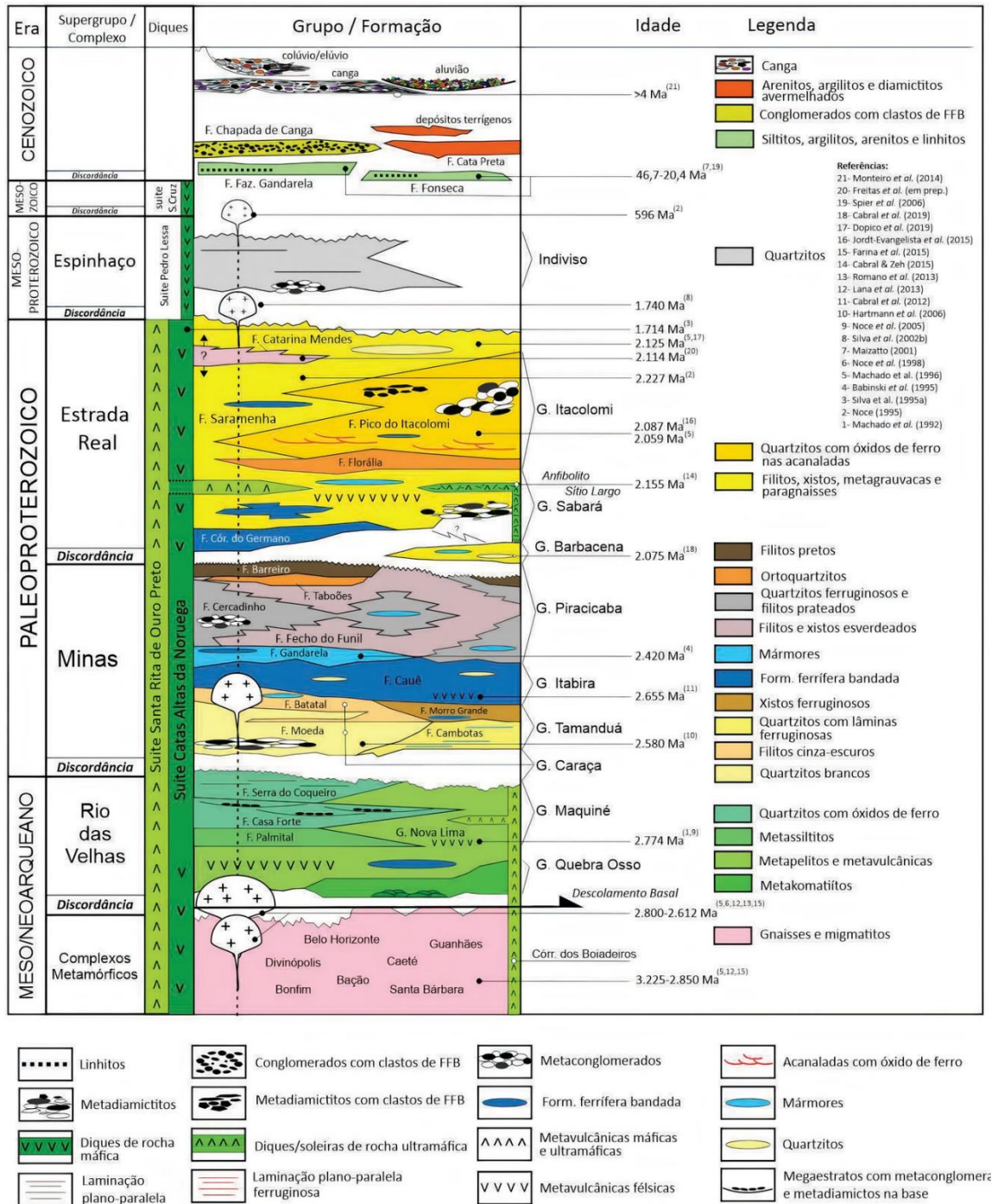
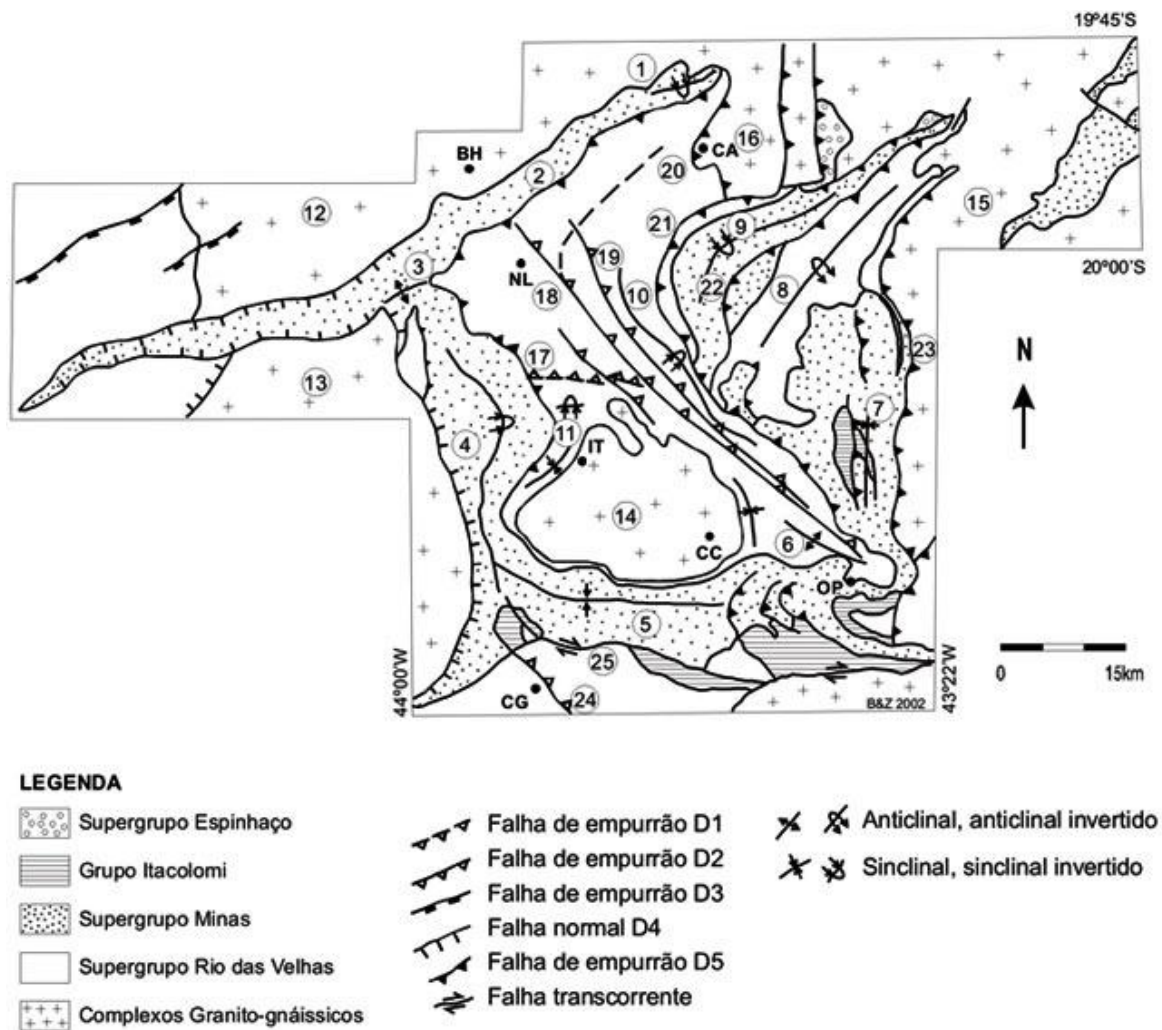


Figura 2.2 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.*, 2019)

A formação de grandes dobras, como a Sinclinal Moeda, ocorreu pelo desenvolvimento de uma província do tipo domos-e-quilhas de formação relacionada às rochas de idade

Arqueana. A Figura 2.3 apresenta as principais feições estruturais do Quadrilátero Ferrífero, inclusive a Sinclinal Moeda.



Dobras: 1 - Sinclinal Piedade, 2 - Homoclinal Serra do Curral, 3 - Anticlinal da Serra do Curral, 4 - Sinclinal Moeda, 5 - Sinclinal Dom Bosco, 6 - Anticlinal de Mariana, 7 - Sinclinal Santa Rita, 8 - Anticlinal Conceição, 9 - Sinclinal Gandarela, 10 - Sinclinal Vargem do Lima, 11 - Sinclinal dos Andaimos. Complexos granito-gnáissicos: 12 - Belo Horizonte, 13 - Bonfim, 14 - Bação, 15 - Santa Bárbara, 16 - Caeté. Falhas: 17 - Bem-Te-Vi, 18 - São Vicente, 19 - Raposos, 20 - Caeté, 21 - Cambotas, 22 - Fundão, 23 - Água Quente, 24 - Congonhas, 25 - Engenho. Cidades: BH - Belo Horizonte, CC - Cachoeira do Campo, IT - Itabirito, NL - Nova Lima, CA - Caeté, CG - Congonhas, OP - Ouro Preto.

Figura 2.3. Feições estruturais do Quadrilátero Ferrífero (Baltazar e Zuchetti, 2007 modificado de Chemale Jr. *et al.*, 1994).

A Sinclinal Moeda, como é denominada a megaestrutura que compõe a formação Moeda (Dorr, 1969), possui cerca de 40 km de extensão na direção Norte-Sul, ligando-se à Serra do Curral, a norte, e à Sinclinal Dom Bosco, a sul. De acordo com Costa (2009), a Sinclinal Moeda pode ser dividida em:

- Flanco oeste: muito expressivo e regular, com mergulhos entre 40° e 55° para leste, pela direção N-S, apresentando inflexões para S-W e uma série de falhas normais ao bandamento;
- Flanco leste: mais complexo, seccionado por várias falhas e arqueado por várias dobras, com mergulhos de alto ângulo e invertidos para oeste. Os eixos orientam-se para as direções NE e NW;

A partir de um levantamento estrutural, qualitativo e quantitativo da região Centro-Sul da Sinclinal da Moeda, Silva (1999) propôs três eventos deformacionais como uma evolução para a área. Primeiro, um evento distensivo onde a megaestrutura foi formada a partir da acomodação de rochas metamorfizadas sobre um sistema de falhas. Ressalta-se que no centro e na borda leste da Sinclinal Moeda ocorrem zonas de cisalhamento normais esporádicas. O segundo evento, deformacional e de natureza compressiva, teria gerado dobras com vergência para o norte. O terceiro evento, também compressivo, é associado à inversão brasileira e teria causado a formação das principais estruturas da região (Gomes, 2005).

Endo (2019) apresenta um mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero e seções geológicas, dentre as quais a seção H-F, conforme mostra a Figura 2.4, que se aproxima da área de estudo da presente dissertação.

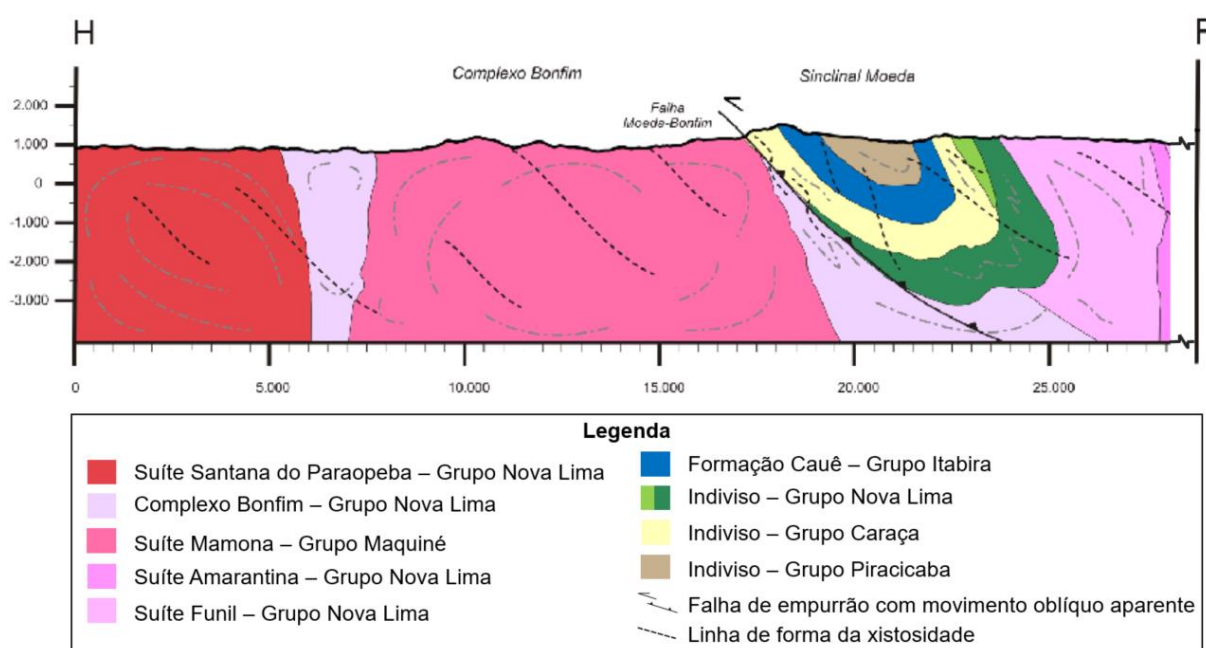


Figura 2.4. Seção geológica próxima à área de estudo (Modificado de Endo, 2019)



## 2.2 - Aspectos Geológicos Regionais

O local de estudo compreende o km 578+500 da rodovia BR-040, pertencente ao município de Itabirito-MG. O maciço estudado encontra-se na porção sul e ao lado leste da Serra da Moeda, especificamente no flanco oeste da Sinclinal da Moeda.

No contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero o local pertence, em sua maior parte, à formação Gandarela, unidade de topo do Grupo Itabira. No entanto, a região onde as movimentações são observadas compreende o encontro de três unidades geológicas: Formação Gandarela, Formação Cauê e uma unidade denominada Canga, composta por um capeamento limonítico contendo, principalmente, matacões de formação ferrífera e hematita cimentada (Bezerra, 2014). A interface entre as três unidades supracitadas pode ser observada na Figura 2.5.

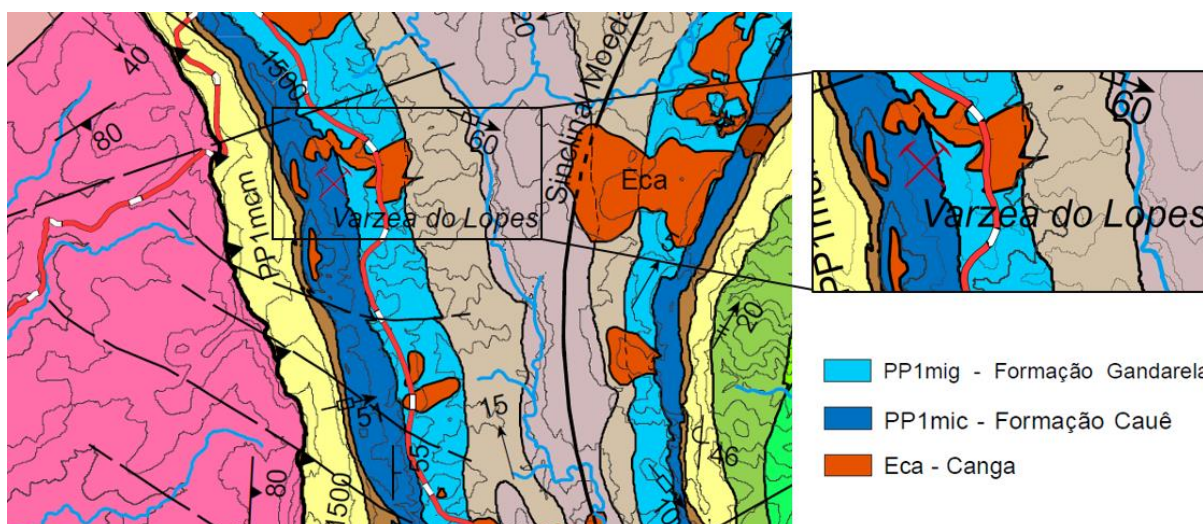


Figura 2.5. Mapa geológico do local de estudo (modificado – Endo, 2019);

Dorr (1958) afirma que o contato da Formação Gandarela com a Formação Cauê se faz de forma gradual ao longo de alguns metros a dezenas de metros. Silva (2006) afirma que, no entorno das minas, a transição da Formação Cauê para a Formação Gandarela no perfil intemperizado é caracterizada pelo afinamento do minério, presente na Formação Cauê, e aumento gradual nos teores de hidróxido de ferro e manganês.

O Grupo Itabira é o mais importante da região, do ponto de vista econômico, pois contém reservas de minério de ferro de alta qualidade de origem metassomática. O intemperismo da Formação Cauê produziu enormes reservas de minério de ferro de qualidade inferior, mas ainda assim, potencialmente econômicas. A Formação Gandarela, por sua vez, acumula bauxita, rochas ornamentais, dolomita para fins metalúrgicos e refratários, dentre outros recursos minerais (Dorr, 1969).

De acordo com Costa (2009), a Formação Gandarela é composta predominantemente por dolomitos e, secundariamente, por filitos dolomíticos, itabiritos e filitos, enquanto a Formação Cauê compõe-se predominantemente de formação ferrífera tipo lago superior e, secundariamente, por lentes de quartzitos ferruginosos e níveis conglomeráticos.

Dorr (1969) afirma que a Formação Gandarela consiste, em grande parte, de dolomitos e estratos calcíticos. A rocha mais visível é o mármore (dolomítico). Em outras partes da formação, filitos dolomíticos, formações-ferríferas dolomíticas e filito podem ser as rochas dominantes.

A Formação Cauê é composta por itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfibolítico com pequenas lentes de filito e mármore, segundo Dorr (1969). Silva (2006) acrescenta que essa formação se compõe de FFB (Formações Ferríferas Bandadas) metamorfizadas em baixo grau e Baltasar (2005) acrescenta a ocorrência de dolomitos.

### **2.3 - Aspectos Geotécnicos Locais**

A partir da compartimentação geológica regional, do entendimento das rochas que ocorrem em cada formação e de investigações geológico-geotécnicas no local, observou-se a predominância dos filitos, dolomitos e da canga, essa última correspondendo pela área de mineração.

Os filitos são rochas de baixo grau metamórfico que apresentam uma feição textural do tipo foliação, característica de rochas que sofreram metamorfismo regional. A foliação é um conjunto de superfícies paralelas, planas ou onduladas, produzidas pela deformação da rocha e sua principal causa é a presença de minerais placoides que se alinham em uma orientação preferencial (Press, 2006). Em termos físicos, em geral, os filitos encontrados no Quadrilátero Ferrífero apresentam maior fração de silte, seguido de areia e argila (Santiago, 2008).

A unidade geotécnica filito é constituída, em sua maior parte, por filitos e filitos dolomíticos da Formação Gandarela. As propriedades geotécnicas dos filitos são fortemente influenciadas pela litologia, com significativa dependência de relações estruturais (Pimentel, 2005).

Exatamente pela forte influência da foliação nas propriedades geotécnicas, a capacidade de suporte dos filitos pode ser de baixa, quando a solicitação é paralela à foliação, a alta, quando solicitado perpendicularmente à foliação metamórfica, bem como a escavabilidade varia de fácil a difícil, a depender da posição dos planos de foliação. Por ter, em essência, textura siltosa, o filito possui planos de foliação e descontinuidades lisos. Quando essa característica se alia com aumento no grau de faturamento, grau de alteração e ação intempérica, a susceptibilidade

a movimentos de massa e processos erosivos é alta. Assim, o escoamento de águas superficiais e a posição do nível d'água ditam o ritmo de progressão desses processos (Pimentel, 2005). A Figura 2.6 apresenta uma amostra de solo residual jovem de filito que foi retirada no local de estudo da presente dissertação, onde é possível observar planos de foliação bem definidos e fácil escavabilidade do material.



Figura 2.6. Filito encontrado no local de estudo com planos de foliação bem definidos.

Na retirada do bloco indeformado a escavabilidade trata-se da facilidade em talhar um material desconfinado. Por se tratar de um solo residual jovem com predominância granulométrica de silte, houve uma certa facilidade para conformação do bloco indeformado. Foi percebido, tanto em campo quanto na moldagem dos corpos de prova em laboratório, que existe facilidade de descolamento dos planos de foliação. Tal aspecto exige um cuidadoso manuseio para a moldagem dos corpos de prova, que podem se partir na direção de um plano de foliação sem que haja muito esforço para tal. Essa característica de fragilidade do solo provocou a perda de alguns corpos de prova.

De acordo com a classificação de intemperismo para maciços rochosos proposta pela ISRM (2015), o solo residual se caracteriza quando todo o material rochoso está convertido em solo, não há emissão de som pelo golpe de um martelo de geólogo e a ponta do martelo pode riscar com considerável facilidade e profundidade a superfície do material (Carvalho, 2019).

Santiago (2008), ao estudar filitos sericíticos do Quadrilátero Ferrífero, submetendo-os a ensaios de adensamento oedométrico, compressão triaxial, caracterização física, ensaios de ciclagem, dentre outros, constatou que existe uma correlação explícita entre a perda de resistência e o aumento de absorção e porosidade e redução da massa específica. Quando expostos a agentes intempéricos, o filito sofre aumento da porosidade aparente, diminuição da massa específica aparente seca e saturada, aumento da capacidade de absorção de água e, por consequência, redução de resistência.

Quanto à possibilidade de expansibilidade ou colapso do filito na presença de água, ensaios de adensamento realizados por Santiago (2008) apresentam variação de altura da amostra praticamente imperceptível, mostrando que tais características não ocorreram no material estudado. A verificação dos ensaios pôde ser comprovada por ensaios de difratometria de raios-X e por microscopia eletrônica de varredura, que evidenciam a inexistência de argilominerais expansíveis.

Parizzi (2009), em estudo de avaliação de estabilidade de taludes de Belo Horizonte, verificou os filitos, quando muito alterados, se tornam susceptíveis à erosão, que se desenvolve ao longo de planos de descontinuidade, planos de falha e linha de interseção de cunhas. Dilásccio (2005) argumenta que taludes escavados em filitos são recorrentes na região do Quadrilátero Ferrífero e, em sua grande maioria, verificam-se mecanismo de instabilização não usuais.

Ao avaliar filitos do Quadrilátero Ferrífero sob aspectos físicos e mineralógicos, Leão *et al.* (2017) argumentam que o material possui famílias de fraturas ortogonais e principalmente paralelas às foliações encontradas. Tais descontinuidades evidenciam, conforme a evolução do grau de alteração, há uma redução do espaçamento e aumento da abertura e persistência.

Ainda de acordo com Leão *et al.* (2017), as fraturas podem ser preenchidas por precipitações de óxidos e hidróxidos de ferro e cristalização de quartzo. Diante de tais características, a rocha tende a se deslocar e as fissuras existentes são propagadas pelos planos de foliação.

Os dolomitos são rochas sedimentares calcárias compostas basicamente por calcita e dolomita (Sampaio, 2005). O dolomito altera-se rapidamente na presença de umidade. A água dissolve em grande quantidade os minerais carbonáticos escavando cavernas em formações calcárias (Press, 2006).

Segundo Baltasar (2005) a unidade geotécnica Dolomitos, presente nas Formações Gandarela e Cauê, consiste de dolomitos, itabiritos dolomíticos, filitos dolimíticos e outras ocorrências, como o mármore, em menor expressão. Ocorre ao longo da Serra do Curral, na Sinclinal da Moeda, sendo predominante em relevo serrano, cristas homoclinais, morros de cristas aguçadas e colinas.

O dolomito é altamente vulnerável à ação intempérica e essa característica tem influência direta em aspectos de seu comportamento geotécnico como a capacidade de suporte e escavabilidade, que podem variar de baixa a muito elevada e baixa a muito difícil, respectivamente. No entanto, a suscetibilidade a movimentos de massa é baixa, sendo condicionada às relações estruturais de fraturas e falhas, bem como a suscetibilidade a erosão (Pimentel, 2005).

Parizzi (2010) destaca que rochas como o dolomito e o filito, pouco resistentes à ação intempérica, dão origem a áreas deprimidas ou aplainadas. Segundo Pimentel (2005), os filitos encontrados no sopé de encostas ou nos fundos de vale tendem a ser susceptíveis à erosão e escorregamento e esses processos são controlados pelas estruturas advindas da rocha de origem. A susceptibilidade à erosão do material encontrados na área de estudo da presente pesquisa pode ser exemplificada pela Figura 2.7, que mostra a formação de sulcos no talude sul, dias após escavação para suavização da inclinação do talude.



Figura 2.7. Processos erosivos na face do talude sul.

Ao estudar filitos sericíticos da região do Quadrilátero Ferrífero, por meio de ensaio de ciclagem artificial água-estufa, Santiago (2008) observou que o filito possui vulnerabilidade à ação intempérica, uma vez que suas características físicas e mecânicas se alteraram consideravelmente em ensaios realizados após cada ciclo de molhagem e secagem.

De acordo com Leão (2017), as variações observadas nas propriedades físicas e mecânicas dos filitos marcam a transição entre os graus de alteração, evidenciando como age o intemperismo físico sobre o desenvolvimento de um perfil.

#### **2.4 - Águas Subterrâneas**

Os dolomitos encontrados na Formação Gandarela formam um aquífero cárstico, anisotrópico e muito heterogêneo. As formas cársticas superficiais indicam um fluxo preferencial das águas subterrâneas ao longo das foliações e/ou bandamento presentes (Beato, 2006).

Um inventário produzido pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM na Área de Preservação Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul RMBH), que se estende até os limites do município de Itabirito, mapeou oito sistemas aquíferos e um aquífero, definidos de forma a agrupar unidades litoestratigráficas de características hidráulicas semelhantes. Alguns desses sistemas aquíferos compreendem regiões cujas formações geológicas coincidem com as encontradas no local de estudo desse trabalho.

O Sistema Aquífero Itabirítico é o de maior expressividade do Quadrilátero Ferrífero, se fazendo presente de forma quase contínua e linear nas Sinclinais da Moeda e no segmento sudoeste da Serra do Curral (Mourão, 2007). É formado principalmente nas rochas da formação Cauê, como os itabiritos, as Formações Ferríferas Bandadas (FFB) e as hematitas compactas friáveis e possui zonas aquíferas associadas aos fraturamentos dos dolomitos da Formação Gandarela e quartzitos da Formação Moeda (Dantas, 2017). Formam aquíferos descontínuos, altamente anisotrópicos, heterogêneos, fraturados e/ou granulares sob condições de faturamento e da dissolução química dos carbonatos. São aquíferos livres a confinados pela configuração estratigráfica dobrada e com falhas transcorrentes de empurrão. Avaliações de instrumentos de piezometria da região apresentam níveis variando da surgência à 190 metros. A variação na profundidade do nível d'água se deve à geomorfologia local e aos rebaixamentos causados pela atividade minerária. A principal recarga se faz pelas águas pluviais que se infiltra em espessos horizontes intemperizados. A circulação se dá nas fraturas, pelos planos de estratificação e ao longo de barreiras impermeáveis, tais como diques e base confinante (Beato, 2006).

O sistema aquífero carbonático encontra-se estratigraficamente sobreposto ao sistema itabirítico por um contato gradacional marcado pela diminuição do teor de ferro. Está presente nos dolomitos, mármore e zonas manganésíferas da formação Gandarela. A presença do dolomito não favorece o armazenamento de água subterrânea por importantes estruturas

cársticas. Formam-se aquíferos fraturados e cársticos, altamente anisotrópicos, heterogêneos, descontínuos e livres a confinados por regolitos argilosos. A piezometria aponta níveis d'água relativamente rasos. A recarga ocorre pela infiltração de água pluvial, que se faz nas direções de faturamento e/ou carstificação e pelos planos de estratificação (Beato, 2006).

Beato (2006) afirma que o potencial hídrico subterrâneo da região está associado a estruturas geológicas favoráveis. As maiores reservas geralmente estão associadas às reservas de minério de ferro, próximos a metassedimentos itabiríticos e carbonáticos. Segundo Parizzi (2004), a Formação Gandarela forma um aquífero cárstico com grande potencial hídrico, comprovado por grandes vazões verificadas em poucos poços perfurados em seus dolomitos.

Mourão (2007) apresenta, com base em levantamentos de campo, evidências de que as descargas do aquífero Cauê e aquífero Gandarela, como também é chamado o já descrito aquífero carbonático, estão condicionadas às estruturas de descontinuidade das rochas. Há uma incerteza com relação ao comportamento hidrogeológico da Formação Gandarela, composta por dolomitos, principalmente. Lazarim (1999) verificou condutividades hidráulicas nos dolomitos superiores às encontradas em hematitas friáveis e ressaltou a existência de uma conexão hidráulica entre os aquíferos Cauê e Gandarela.

Um maciço que se encontra abaixo do lençol freático está submetido a pressões intersticiais de água que reduzem a resistência ao cisalhamento em suas descontinuidades reduzindo a resistência ao cisalhamento nessa região. A permeabilidade de uma descontinuidade tem relação com a abertura da junta e com a tensão normal atuante. Deste modo, em regiões de alívio de tensão, pode-se observar um aumento no fluxo de água e a mudança na distribuição de tensões efetivas (Huallanca, 2004).

## **2.5 - Redistribuição de Tensões**

A escavação de túneis, encostas ou fundações em maciços rochosos resulta em uma redistribuição de tensões que permite a relaxação e dilatação do maciço. Nessa situação, o projeto de engenharia deve controlar esta dilatação, e os consequentes deslocamentos, a fim de evitar a ruptura da maciço escavado. Tal controle pode ser feito pela seleção do método de escavação, pela execução de reforços na estrutura, se necessário, e, não menos comum, pela drenagem do maciço (Hoek, 2019).

Gomes *et al.* (1999) apresentam um movimento de massa de grandes proporções em zonas de filito de uma cava de mineração na região do Quadrilátero Ferrífero causado por desconfinamento. O movimento foi caracterizado pela abertura de uma fenda e abatimento do talude a partir de deformações lentas e progressivas, à medida que o desconfinamento

aumentava. Esses movimentos evidenciaram duas formas de degradação do filito: a desagregação superficial, como produto de ação erosiva, e a perda gradual da resistência com a profundidade devida às deformações lentas que ocorrem ao longo de uma superfície potencial de ruptura, mobilizando resistências residuais e deflagrando um mecanismo de ruptura local.

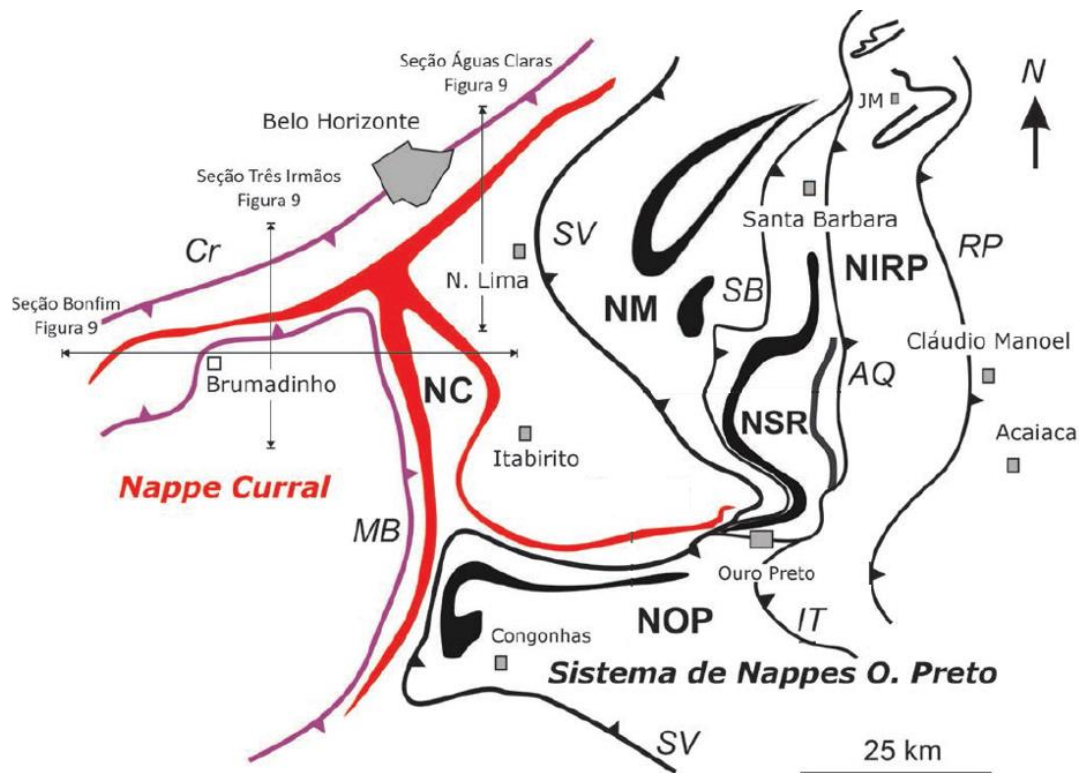
De Brito *et al.* (2011) também apresentam um movimento de massa estudado a partir da observação de trincas persistentes no topo de um talude de cava de mineração escavado em filito alterado no Quadrilátero Ferrífero em que duas hipóteses foram levantadas: alívio de tensões causado no filito que apresenta foliações mergulhando em direção à cava e um processo de ruptura biplanar ao longo de uma zona de fraqueza paralela à xistosidade. A partir de inspeções de campo, sondagens e análises de estabilidade a deformação global do talude foi explicada pela movimentação de planos de cisalhamento conjugados, confirmando a hipótese de ruptura biplanar.

Alívios de tensão gerados por desconfinamento (escavação) podem contribuir para a redução da resistência ao cisalhamento nesses planos de descontinuidade específicos, facilitando a movimentação relativa entre eles.

A redistribuição de tensões em escavações realizadas na região do Quadrilátero Ferrífero também possui relação com as características estruturais dos materiais geológicos da região. Conforme abordado no Item 2.1 -a ocorrência de eventos deformacionais que marcaram a evolução da geologia do Quadrilátero Ferrífero influenciou a formação de elementos estruturais como dobramentos, falhas e zonas de cisalhamento.

O arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero caracteriza-se pela presença de dobras de várias gerações e estilos, associadas a diferentes fases e eventos tectônicos ocorridos na região. Uma das dobras de escala regional cuja abrangência contém a região de estudo, é a *Nappe Curral* (Castro *et al.*, 2020), conforme apresentado na Figura 2.8.





Nappes: NC- Nappe Curral, NM- Nappe Maquiné, NSR- Nappe Santa Rita, NIRP- Nappe Itabira-Rio Piracicaba, NOP- Nappe Ouro Preto. Falhas: SB- São Bento, AQ- Água Quente, RP- Rio Piracicaba, IT- Itacolomi, Cr- Curral. Zonas de cisalhamento: MB- Moeda Bonfim (descolamento basal da Nappe Curral), SV - São Vicente (descolamento basal do Sistema de Nappes Ouro Preto).

Figura 2.8. Mapa esquemático de articulação do sistema de *nappes* do Quadrilátero Ferrífero e as principais falhas/zonas de cisalhamento (Castro *et al*, 2020).

A *Nappe* Curral é caracterizada por dobras de ordens inferiores com geometria e escala variável, perfis abertos a fechados, extensão centimétrica a quilométrica, e com ocorrência, principalmente, em itabiritos, mármore e dolomitos da região, rochas cujas propriedades reológicas favorecem a geração das dobras (Castro *et al*, 2020). Nessas rochas, as dobras tendem a perfis mais apertados (anticlinal e sinclinal) podendo chegar a isoclinal, com menor comprimento de onda e maior amplitude.

As dobras apresentam estilos diversos, variando entre abertas e fechadas dependendo da litologia envolvida na deformação. Nos mármore, dolomitos e itabiritos, por exemplo, há uma tendência destas dobras estarem com perfis mais apertados. Por outro lado, em litologias mais competentes, como em quartzitos, por exemplo, dominam dobras mais abertas (Castro *et al*, 2020).

A Sinclinal Moeda, inserida na *Nappe* Curral, constitui-se de uma grande estrutura sinformal (N-S). Superpostas à Sinclinal desenvolveram-se zonas de cisalhamento associadas a empurrões (N-S), com transporte tectônico de E para W.

De acordo com Woodward (1999), a formação de dobras tem relação com a distribuição de tensões em um maciço, uma vez que deformações ocorridas por dobramento (ou vice-versa) provocam uma mudança na direção das tensões principais atuantes. Outra questão sobre as dobras, refere-se às sinclinais, que também podem ser um caminho condutor preferencial de água subterrânea.

A intensa ação tectônica na região não se refere somente à escala regional. Também pode ser percebida pelas feições expostas quando da realização de adequações no talude sul realizadas em outubro de 2016, onde se observam dobras anticlinais e sinclinais no material escavado, como mostra a Figura 2.9.



Figura 2.9. Dobras anticlinais e sinclinais na face do talude sul.

As estruturas reliquias, associadas aos dobramentos, podem se tornar agentes capazes de concentrar tensões e fluxo de água subterrânea. Ao estudar a estrutura do segmento oeste da Serra do Curral, no Quadrilátero Ferrífero, Sanglard *et al* (2014) argumenta que zonas de cisalhamento que ocorrem ao longo dos contatos podem ser atribuídas ao deslizamento interestratal ou descolamento das diferentes unidades entre si durante a edificação das dobras associadas às falhas de baixo ângulo. No deslizamento flexural, a deformação concentra-se nos flancos, decrescendo em direção à zona de charneira (Ramsay e Huber, 1987).

## 2.6 - Presença de Cavidades

A partir da década de 1990, com a implantação de grandes projetos associados à extração de minério de ferro, houve um aumento expressivo no número de cavernas registradas

na região do Quadrilátero Ferrífero. Estudos desenvolvidos por volta de 2005, como Piló & Auler (2005), mostraram que a maioria das cavidades em litologia ferrífera encontram-se em rupturas e posicionam-se próximo ao contato da canga com outra litologia (formações Batatal, Cauê ou Gandarela) (Castro *et al*, 2020). A Figura 2.10 apresenta a distribuição de cavernas no Quadrilátero Ferrífero, verificada no ano de 2019.

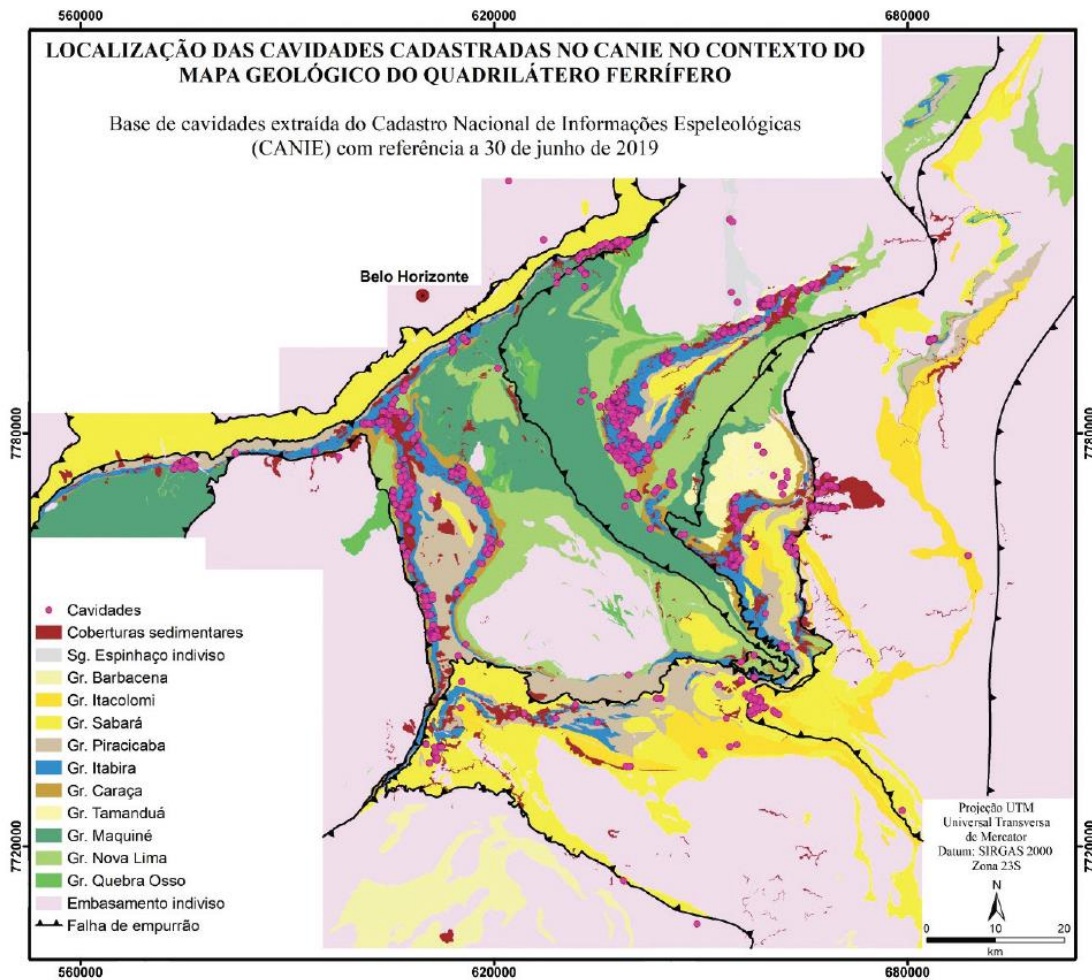


Figura 2.10. Distribuição de cavernas no Quadrilátero Ferrífero (Castro *et al*, 2020)

Castro *et al* (2020) apresenta detalhes sobre o mapeamento e as atividades de preservação de cavidades, grutas e todo o material arqueológico encontrado no Quadrilátero Ferrífero. Dentre os sítios arqueológicos mapeados na região, destaca-se o sítio Várzea do Lopes, localizado na área de estudo.

De acordo com Piló e Auler (2009), o posicionamento das cavernas se dá em três diferentes grupos: nas bordas de lagoas, no topo de platôs; nas bordas de drenagens e cabeceiras; e cavernas inseridas nas bordas inclinadas dos platôs, incluindo ocorrências nas baixas, médias e altas vertentes. Geralmente, localizam-se próximas da base de pequenas escarpas de canga ou formação ferrífera.

No Quadrilátero Ferrífero, as cavidades têm grande ocorrência na Formação Cauê do Grupo Itabira e na canga formada a partir do intemperismo desta formação, e os principais processos envolvidos na formação das cavidades são: erosão, lixiviação, dissolução e biogênese. A erosão no contato canga / rocha subjacente com posterior ampliação dos espaços devido a desmoronamentos é a principal gênese identificada (Dutra, 2013).

De acordo com Dutra (2013), o processo predominante para formação das cavidades parece ser a erosão por drenagem temporária superficial, que ocorre no contato canga / rocha subjacente. A partir do alargamento inicial, as cavidades aparentemente evoluem através de incasões/abatimentos. Também podem ocorrer cavidades associadas à dissolução, principalmente em itabiritos dolomíticos.

Cabeceiras de drenagens com formato de “leques”, em que o escoamento se inicia de modo difuso e posteriormente se concentra em um canal são morfologias favoráveis no processo de formação das cavidades de contato. Erosões sub-superficiais em cabeceira de drenagem, em terrenos muito inclinados (alto gradiente), onde a alta energia da água gera erosão mecânica das rochas, são agentes na formação das cavidades, conforme mostra a Figura 2.11.

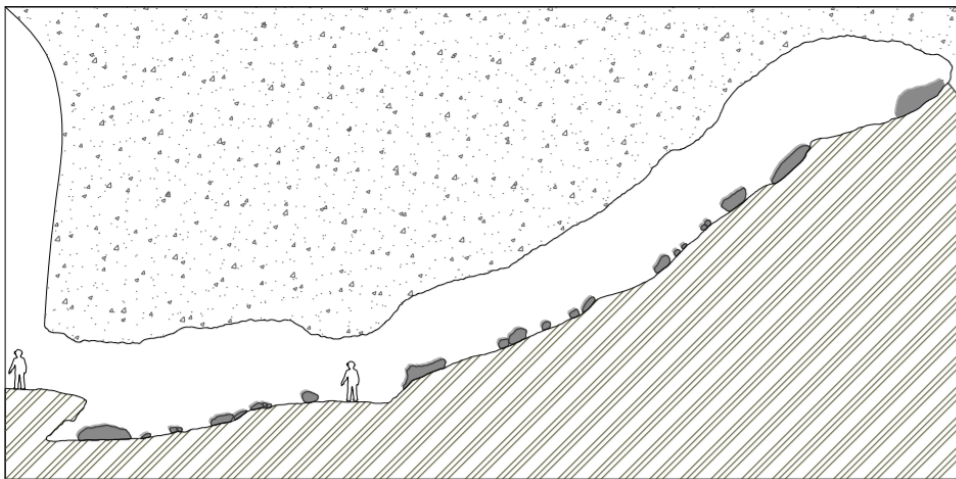


Figura 2.11. Perfil de cavidade em contato canga / minério formado por erosão em cabeceira de drenagem (Dutra, 2013)

Vann (1963) ao estudar a formação de processos erosivos em formações lateríticas no Amapá, aponta que nascentes situadas sob crostas lateríticas contribuem para o desenvolvimento de processos erosivos. Segundo Dutra (2013), há diversos registros de nascentes sazonais no contato canga / rocha no Quadrilátero Ferrífero. As nascentes identificadas possuíam um canal de pequeno diâmetro (<10 cm) a partir do qual a água surge.

Entradas estreitas nas bordas de canga devido a processos erosivos, ou pequenas entradas verticais são características das cavidades ferruginosas. A formação de tais acessos

ocorre, em geral, quando o manto da canga sofre um colapso em um conduto ocluso (Simmons, 1963).

## 2.7 - Efeitos de Explosivos em Maciços de Solo e Rocha

As vibrações geradas em detonações são transmitidas ao maciço rochoso de interesse por meio de ondas sísmicas que se deslocam radialmente partindo do ponto de detonação (Canedo, 2013). De acordo com Silveira (2017), as ondas sísmicas causadoras de vibração podem ser classificadas em dois principais grupos: as volumétricas e as superficiais. As ondas volumétricas propagam-se no interior do maciço (profundas) e são classificadas em ondas P (primárias), longitudinais ou de compressão e em ondas S (secundárias), transversais ou de corte. As ondas superficiais propagam-se em superfície e são classificadas em Rayleigh e Love. Os tipos de ondas sísmicas são apresentados na Figura 2.12.

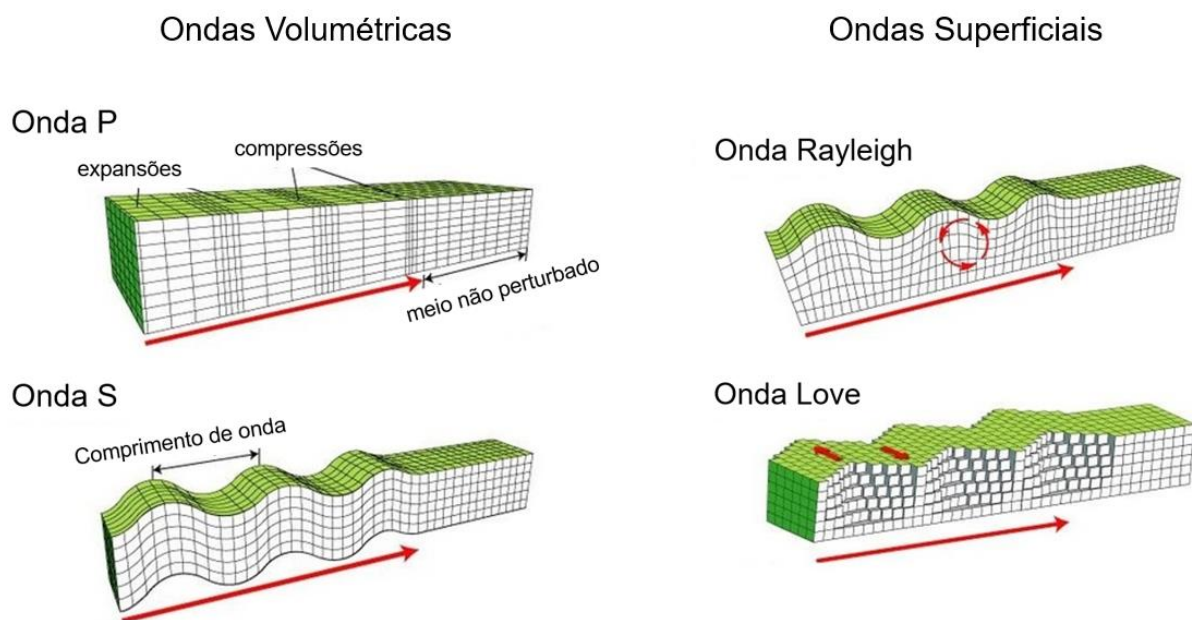


Figura 2.12. Tipos de ondas sísmicas (Modificado de Sciencelearn, 2021)

As vibrações decorrem da resposta do maciço à propagação das ondas sísmicas e podem ser influenciadas, em termos de intensidade, pela energia liberada na fonte, características do meio de propagação, tipo de onda, distância percorrida, frequência, descontinuidades existentes e ângulo de incidência com interfaces entre meios distintos (Tamrock, 1984).

No desmonte de rochas, o fenômeno da detonação ocorre liberando um pico de energia no maciço, causando deformações significativas e fraturamento. Parte da energia gerada provoca efetivamente a fragmentação das rochas e parte é transformada em ondas de vibração

(Silveira, 2017). Iramina (2002) apresenta um diagrama de distribuição de energia de detonação, conforme mostra a Figura 2.13.

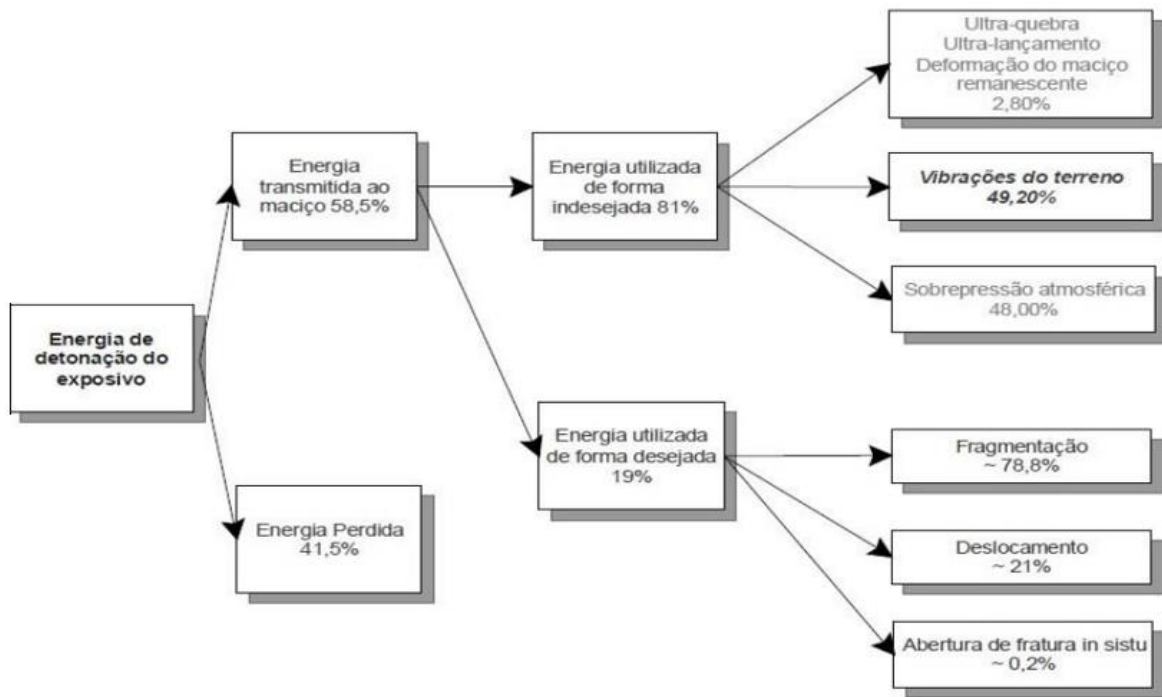


Figura 2.13. Diagrama de distribuição de detonação (Iramina, 2002).

De acordo com Canedo (2013), em maciços rochosos homogêneos e isotrópicos, as vibrações se propagam igualmente em todas as direções. Em estruturas geológicas fraturadas, a propagação pode variar tendo diferentes níveis de atenuação. Quando há um capeamento de solo, a velocidade de propagação das ondas tende a ser menor, a frequência diminui e os deslocamentos tendem a ser maiores na medida em que a espessura do capeamento aumenta, podendo causar danos estruturais. A magnitude das vibrações em região com capeamento de solo diminui rapidamente em longas distâncias. Em pontos próximos da detonação, as vibrações são mais afetadas por características da concepção do plano de fogo.

Outro fator que influencia a magnitude das ondas de vibração é a topografia do local. Em terrenos forma convexa (topos de morro) as ondas de propagação se refletem para o interior do maciço, concentrando a energia na zona superior. Em regiões côncavas (vales) há uma atenuação da magnitude das ondas. Exemplificando a influência da topografia na propagação de ondas sísmicas, Silveira (2017) apresentou um mapa de isovalores de vibração para uma mina localizada na região do Quadrilátero Ferrífero a sudeste de Belo Horizonte (Figura 2.14) O autor observa uma expressiva atenuação da velocidade de vibração das partículas em função da distância. Observa-se também que regiões mais distantes da mina apresentam velocidade de

vibração das partículas maior que algumas regiões mais próximas. Tais variações são atribuídas à litologia e à diminuição de cota apresentada pela topografia, dificultando a propagação das ondas.



Figura 2.14 - Mapas de isovelocidades de propagação (Silveira, 2017).

Terão influência nas vibrações oriundas do processo de desmonte com explosivos, variáveis controláveis, como quantidade de material explosivo e locação dos furos, e variáveis não controláveis, como litologia, topografia e estratigrafia. Para minimizar efeitos indesejáveis, as detonações devem ser planejadas e monitoradas.

## 2.8 - Movimentos de Massa

A deflagração dos movimentos de massa, em geral, é consequência de um conjunto de eventos, por vezes cíclicos, cuja origem se encontra na formação da rocha e sua história geológica e geomorfológica posterior, como intemperismo, ação antrópica, movimentos tectônicos, erosão, dentre outros (ABGE, 1998).

De acordo com Varnes (1978), os movimentos de massa consistem de deformações cisalhantes e deslocamentos ao longo de uma ou várias superfícies que podem ser visíveis, inferidas ou contidas em uma zona estreita. A instabilização do maciço ocorre devido à processos que tendem a reduzir sua resistência ao cisalhamento e/ou aumentar a sollicitação, o que aproxima o estado de tensões de sua envoltória de ruptura.

Guidicini e Nieble (1984) apresentam uma classificação de agentes e causas de movimentos de massa. Os agentes podem ser classificados em agentes predisponentes e agentes efetivos.

Os agentes predisponentes representam um conjunto de aspectos geológicos, geométricos e ambientais onde o movimento poderá ocorrer em função apenas das condições naturais, não havendo, portanto, atuação antrópica. Os agentes predisponentes podem se manifestar pelos seguintes meios:

- Complexo geológico: alterabilidade por ação intempérica, falhas ou dobramentos como produtos de ação tectônica, atitude das camadas, formas estratigráficas, dentre outros;
- Complexo morfológico: inclinação superficial, massa e relevo;
- Complexo climático-hidrológico: regime de águas e clima;
- Outros: gravidade, calor solar, características da vegetação original.

Os agentes efetivos correspondem a um conjunto de fatores com atuação direta no desencadeamento de um movimento de massa. Nesse caso, são incluídas as diversas formas de atuação antrópica. A depender de uma atuação menos ou mais direta, os agentes efetivos podem ser classificados, respectivamente, como:

- Agentes efetivos preparatórios: ação antrópica e de animais, pluviosidade, erosão por água ou vento, dentre outras;
- Agentes efetivos imediatos: chuva intensa, erosões intensas, terremotos, ação antrópica, dentre outros.

Os agentes podem se manifestar nos movimentos de massa por meio de uma ou mais causas, que podem ser entendidas da seguinte maneira:

- Causas internas: levam ao colapso sem mudança geométrica e reduzem a resistência interna do maciço. Como exemplo cita-se o aumento da poropressão e a redução dos parâmetros de resistência por processos de alteração;
- Causas externas: que aumentam a sollicitação no maciço sem alteração dos parâmetros de resistência, como mudanças na geometria do sistema pela execução de cortes e/ou aterros, o aumento da sollicitação no maciço por carregamento ou a redistribuição de tensões por alívio de tensões e na mineração, em especial, o carregamento dinâmico causado por efeito de explosivos;
- Causas intermediárias, que refletem, no interior do talude, consequências de agentes externos, como rebaixamento rápido, *piping*, dentre outros.



### 3 - ÁREA DE ESTUDO

O trecho da rodovia BR-040 entre os km 578 e 580 teve seu traçado alterado no ano de 2011, dando lugar a uma área de mineração. Depois da mudança de traçado da rodovia o processo de mineração foi intensificado. A Figura 3.1 mostra uma imagem do ano de 2006 evidenciando como era a região de estudo no início da implantação da mineração, quando a rodovia possuía seu traçado original e o traçado atual com a localização do talude de corte resultante da mudança de diretriz da rodovia.

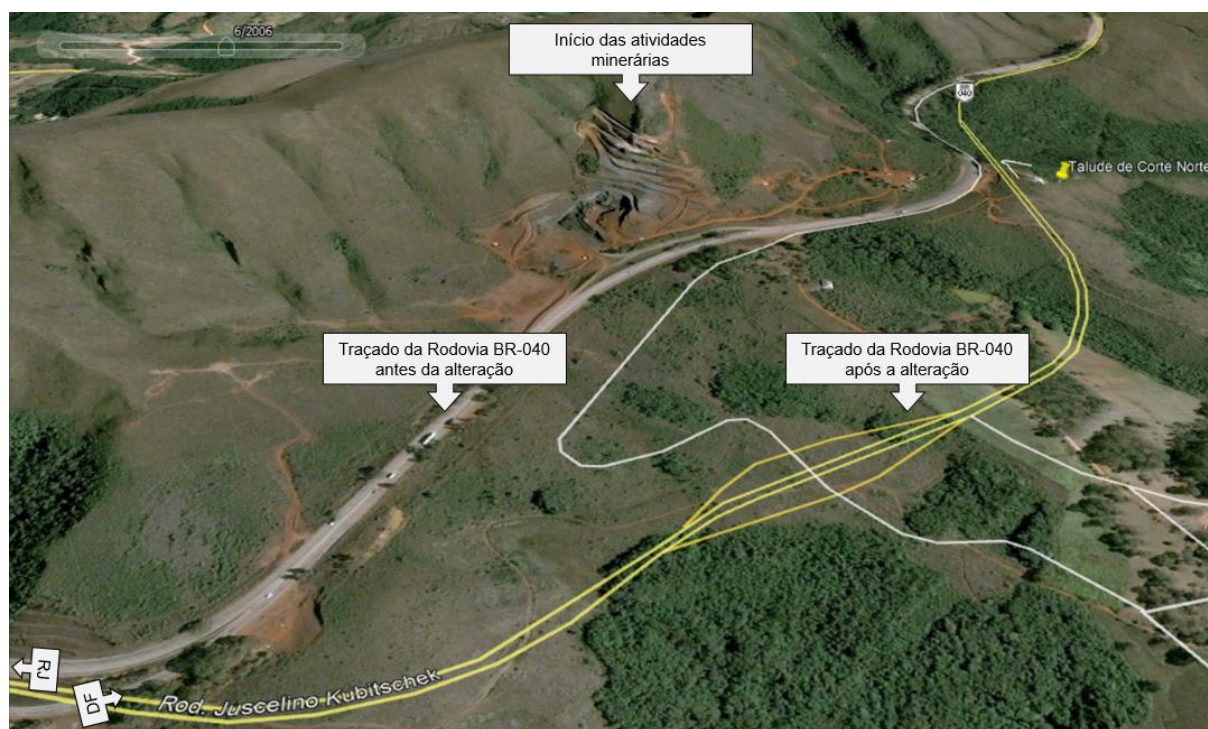


Figura 3.1. Imagem aérea do traçado original da Rodovia BR 040 na área de estudo (Google Earth, 2021).

A Figura 3.2 mostra, na mesma vista da Figura 3.1, uma imagem do local de estudo datada de agosto de 2020, com a configuração da cava de mineração nessa época e a identificação da área de estudo. O talude onde houve maior esforço de investigação geotécnica será identificado ao longo do texto como talude norte, como mostra a Figura 3.2. O talude norte encontra-se adjacente à pista com sentido à Brasília, enquanto o talude sul encontra-se adjacente à pista com sentido ao Rio de Janeiro. A Figura 3.3 apresenta vistas do talude norte (Figura 3.3a) e talude sul (Figura 3.3b).



Figura 3.2. Imagem aérea do traçado atual da Rodovia BR 040 na área de estudo (Google Earth, 2021).

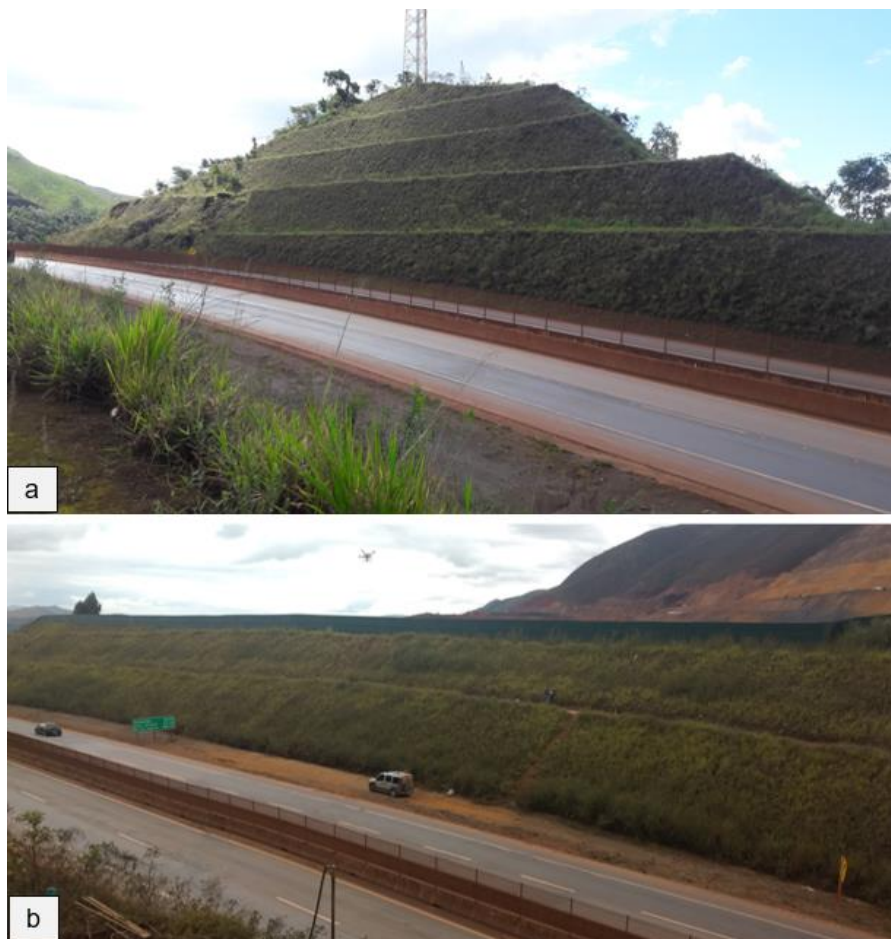


Figura 3.3. Vistas dos taludes norte e sul do corte pleno. a) Talude Norte; b) Talude Sul.

A área de estudo, nos pontos investigados, apresenta a ocorrência de filito, uma rocha metamórfica de granulação fina. O solo residual jovem oriundo dessa rocha apresenta foliações que, associadas com suas características mineralógicas, o torna vulnerável à ação intempérica, podendo favorecer a desagregação do maciço quando exposto. A foliação típica do filito também pode criar caminhos preferenciais de percolação de água, facilitando a desagregação das partículas de solo. Na Figura 3.4 é apresentada uma visão geral do segmento que apresenta movimentações. No trecho podem-se observar trincas nos taludes e abatimentos e trincas escansas ao eixo da rodovia, que afloram na superfície das duas pistas da rodovia.

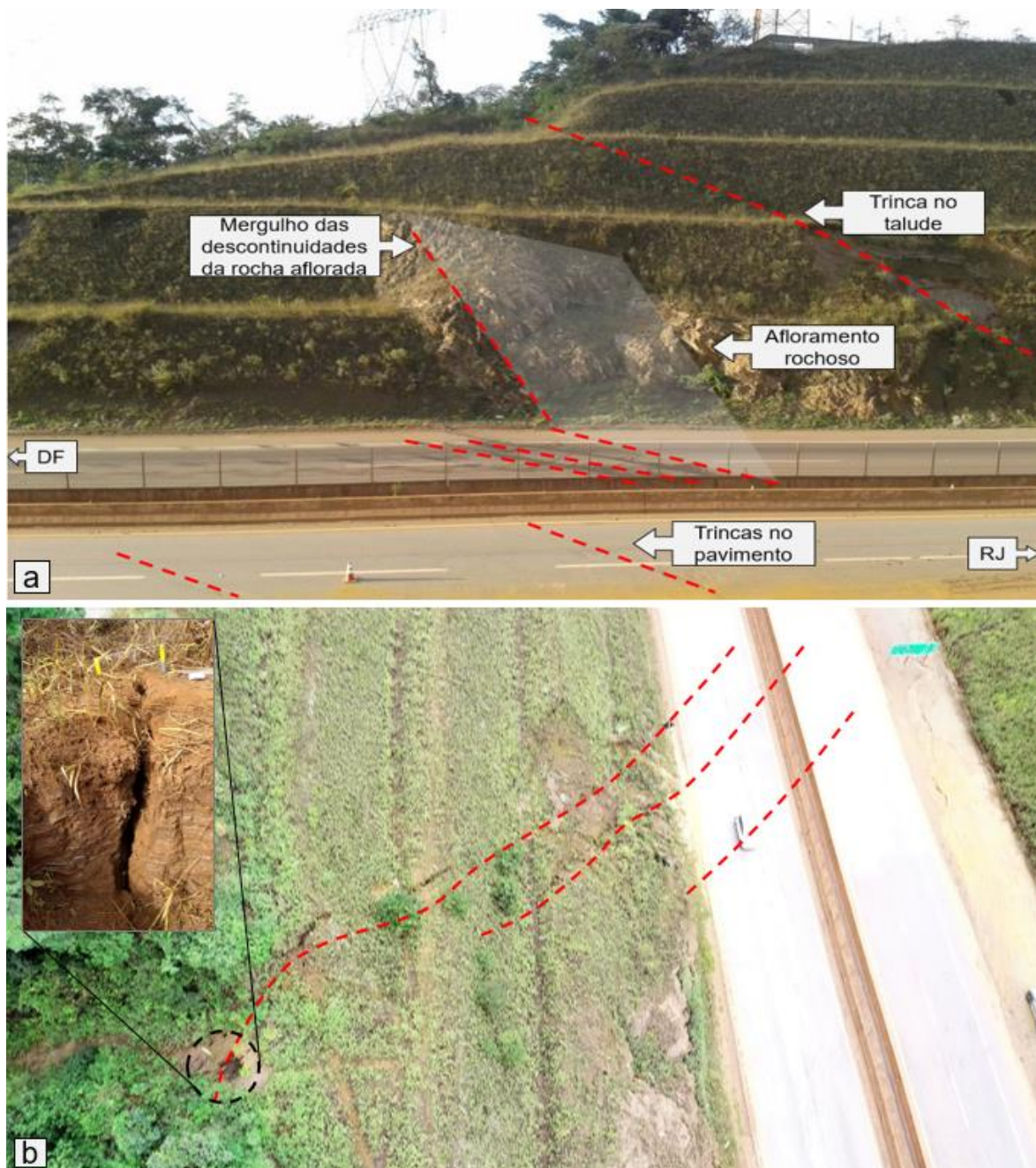


Figura 3.4. Trincas verificadas no trecho do talude de corte norte.

As trincas apresentam persistência elevada, envolvendo também os taludes, com aberturas que variam de milimétricas a centimétricas, como mostra a Figura 3.5. No pavimento da rodovia as trincas são associadas a abatimentos. A faixa esconsa formada pelos abatimentos encontra-se em ponto alto do greide do traçado longitudinal da rodovia. Entretanto, a magnitude do abatimento gerou um ponto baixo, havendo acúmulo de água pluvial entre o bordo do pavimento e o pé do talude. Quando do período dos estudos, o greide da rodovia passou por reconformações por meio de execução de revestimento asfáltico antes e depois da faixa de abatimento.



Figura 3.5. Trincas no talude de corte norte e no pavimento.

A Figura 3.6 mostra o avanço da cava de mineração em direção ao talude, sendo intensificado a partir do ano de 2016, aproximadamente, como mostram as imagens de 2014 até o ano de 2020.

As escavações na cava de mineração, bem como aquelas necessárias para implantação da rodovia, pelo desconfinamento do maciço, podem gerar uma redistribuição de tensões, desenvolvendo um alívio de tensões na face do talude. O desconfinamento promovido pelas escavações impõe ao solo uma trajetória de tensões caracterizada por compressão vertical por descarregamento.

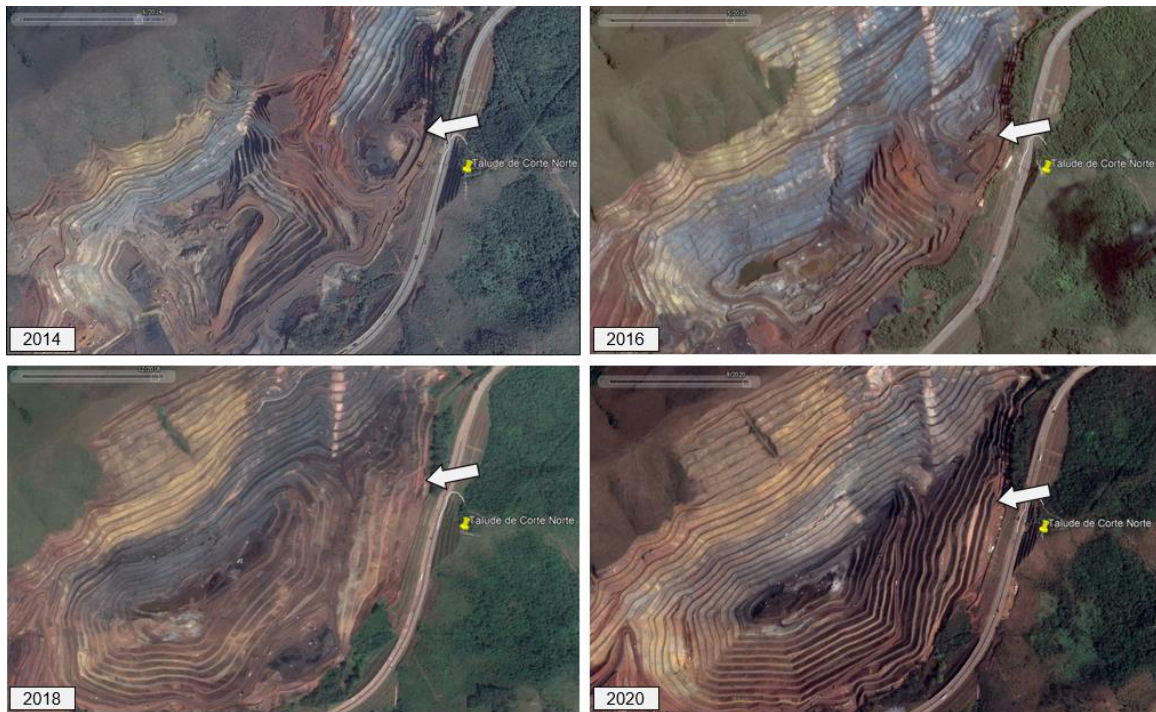


Figura 3.6. Avanço da cava em direção ao talude de corte.

A remoção dos materiais mais intemperizados que capeam o maciço, resultante da escavação, deixam as camadas inferiores mais expostas à ação intempérica, principalmente da incidência direta da precipitação e variações climáticas, o que acelera o processo de alteração, uma vez que o filito encontrado nesse horizonte apresenta predisposição aos processos intempéricos.

Beato (2006) afirma que o potencial hídrico subterrâneo da região está associado a estruturas geológicas favoráveis. A oscilação do lençol freático causada por variações pluviométricas e/ou rebaixamento do lençol freático pode estar relacionada a uma inversão de fluxo de água subterrânea em direção à escavação, podendo provocar a alteração do regime de fluxo original.

Com o avanço da atividade minerária no Quadrilátero Ferrífero, o aumento no número de cavidades mapeadas foi expressivo. De acordo com Piló & Auler (2005), a maioria das cavidades encontram-se em litologia ferrífera, próximo ao contato da canga com outra litologia. A ocorrência de cavidades é comum nas regiões cobertas pelas formações Batatal, Cauê e Gandarela (Castro *et al*, 2020).

### 4 - METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os métodos utilizados nesta pesquisa para avaliação do comportamento do solo residual de filito e para o aprimoramento do entendimento dos fenômenos observados na área de estudo.

O maciço estudado foi cortado para implantação da rodovia BR-040 no trecho do Km578+500. Os taludes de corte foram executados em seção plena, apresentam trincas persistentes (>100m), cujas aberturas superam 10 cm e se estendem nos taludes das pistas Norte e Sul onde ocorre significativo abatimento no alinhamento das trincas.

Em função do surgimento de trincas no pavimento e nos taludes de corte norte e sul como indício de movimentação, foi iniciada em 2018, uma campanha de investigação geológico-geotécnica de campo com coleta de material para ensaios de laboratório e instalação de instrumentos na faixa de domínio da rodovia para compreensão dos mecanismos que explicam as movimentações verificadas em campo.

Nos meses de abril e maio de 2018 uma campanha de sondagem rotativa foi realizada a fim de estabelecer um perfil geológico-geotécnico para os taludes do km 578+500, bem como instalar instrumentos de monitoramento de deslocamento horizontal e piezometria. Também foram coletados dados pluviométricos para a avaliação do comportamento da instrumentação frente à pluviometria observada no período de análise.

Os estudos da litologia local foram complementados por sondagem geofísica, pelo método de eletrorresistividade, que possibilita a identificação, na subsuperfície, dos diferentes materiais geológicos (Braga, 2015). Foram executadas seis linhas geoeletricas, em total de 1.640 m de extensão, apresentando as variações de resistividade em profundidades da ordem de 40 m. A Figura 4.1 apresenta o traçado das linhas geoeletricas utilizadas no levantamento geofísico.



Figura 4.1. Traçados das linhas geolétricas para investigação geofísica.

Em abril de 2020 foi realizada a retirada de amostra indeformada no talude norte para a realização de ensaio de compressão triaxial drenado (CID) e caracterização física. Os ensaios foram realizados a partir da coleta de bloco indeformado nas proximidades de uma região do talude que apresentava instabilidade, como mostra a Figura 4.2.



Figura 4.2. Ponto de coleta de Bloco Indeformado para realização de ensaios.

Os resultados das investigações geológico-geotécnicas, bem como informações oriundas de referências bibliográficas, tais como mapas de geologia estrutural, mapas com informações de topografia e hidrografia, foram utilizadas para gerar um modelo geológico simplificado de todo o domínio estudado. As investigações geológico-geotécnicas refletem o perfil de intemperismo na região do eixo da rodovia, os mapas geológicos estruturais disponíveis auxiliaram o entendimento da disposição do corpo mineral e os mapas com informações de hidrografia, bem como todo o arcabouço bibliográfico apresentado no Capítulo 2 e os resultados de monitoramento, contribuíram para o entendimento do comportamento do nível d'água.

#### **4.1 - Investigação Geológico-Geotécnica**

A fim de definir um modelo geológico e verificar a posição do nível d'água ao longo dos taludes norte e sul, foram executadas sondagens rotativas (ABGE, 2013) ao longo da extensão dos taludes, conforme mostrado na Figura 4.3.

A avaliação do tipo de solo/rocha obtido pela sondagem foi feita por análise tátil e visual do material retirado dos furos. Tal avaliação foi feita pela empresa executora dos furos e registrada nos boletins de sondagem, disponibilizados para avaliação neste trabalho.

Foram realizados sete furos de sondagem rotativa, sendo três furos no talude norte (adjacente à pista sentido Brasília) e quatro no talude sul (adjacente à pista sentido Rio de Janeiro), totalizando 257 m perfurados. Foram realizados os seguintes furos, com suas respectivas profundidades: SR-01 (48,0 m), SR-02 (20,5 m), SR-03 (49,5 m), SR-04 (47,0 m), SR-05 (16,0 m), SR-06 (31,0 m), SR-07 (45,0 m). Os furos foram dispostos na área de estudo conforme mostra a Figura 4.3.



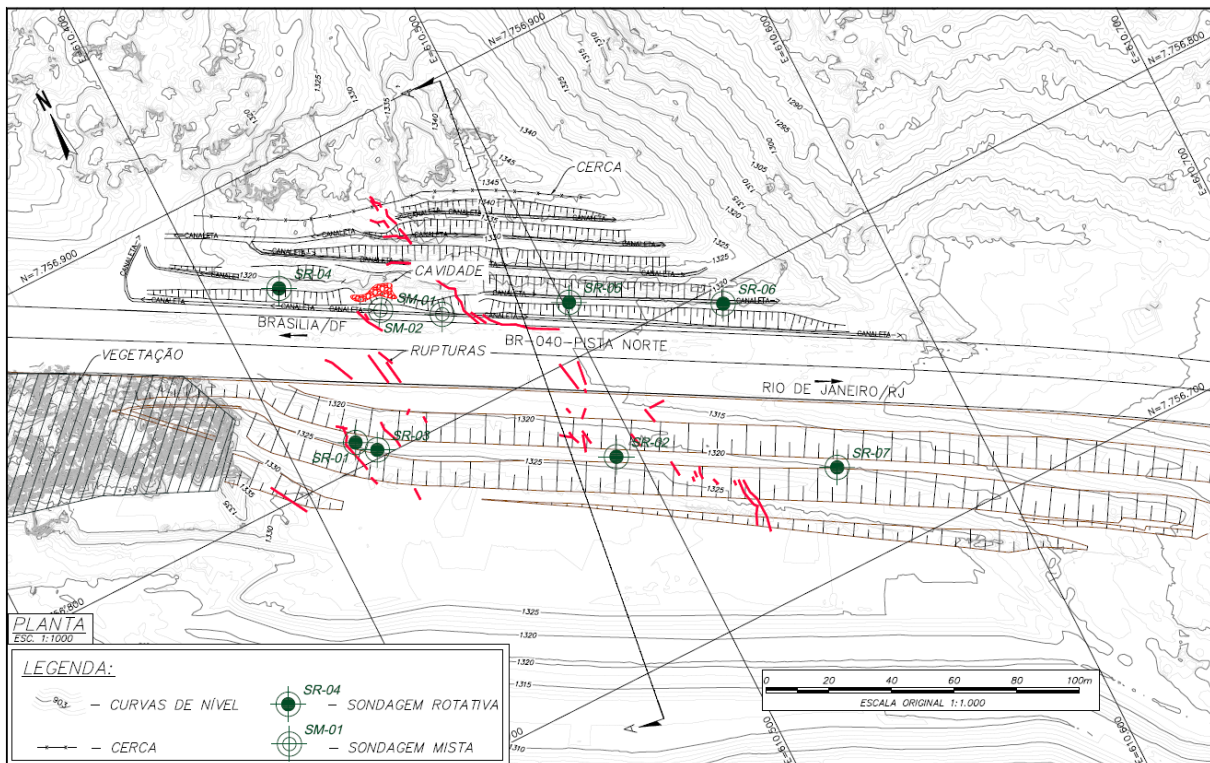


Figura 4.3. Localização dos furos de sondagens executadas na área de estudo.

## 4.2 - Instrumentação

Para monitoramento e controle de deslocamentos horizontais e níveis piezométrico e freático nos taludes norte e sul, foram instalados inclinômetros, piezômetros e medidores de nível d'água nos maciços, respectivamente.

### 4.2.1 - Inclinômetros

Os inclinômetros podem ser definidos como dispositivos para monitoramento de deslocamentos normais ao eixo de um tubo guia por meio de uma sonda (torpedo) com sensor gravitacional (acelerômetro) projetada para medir sua inclinação ao longo da vertical inclinométrica. O tubo guia é instalado em furos de sondagem, em geral, com alinhamento vertical, de modo que os dados adquiridos possam definir deslocamentos horizontais na subsuperfície.

A determinação de zonas de deslizamento em taludes constitui uma das suas principais aplicações (Dunnicliff, 1988). A Figura 4.4 apresenta um esquema dos princípios de operação do inclinômetro.

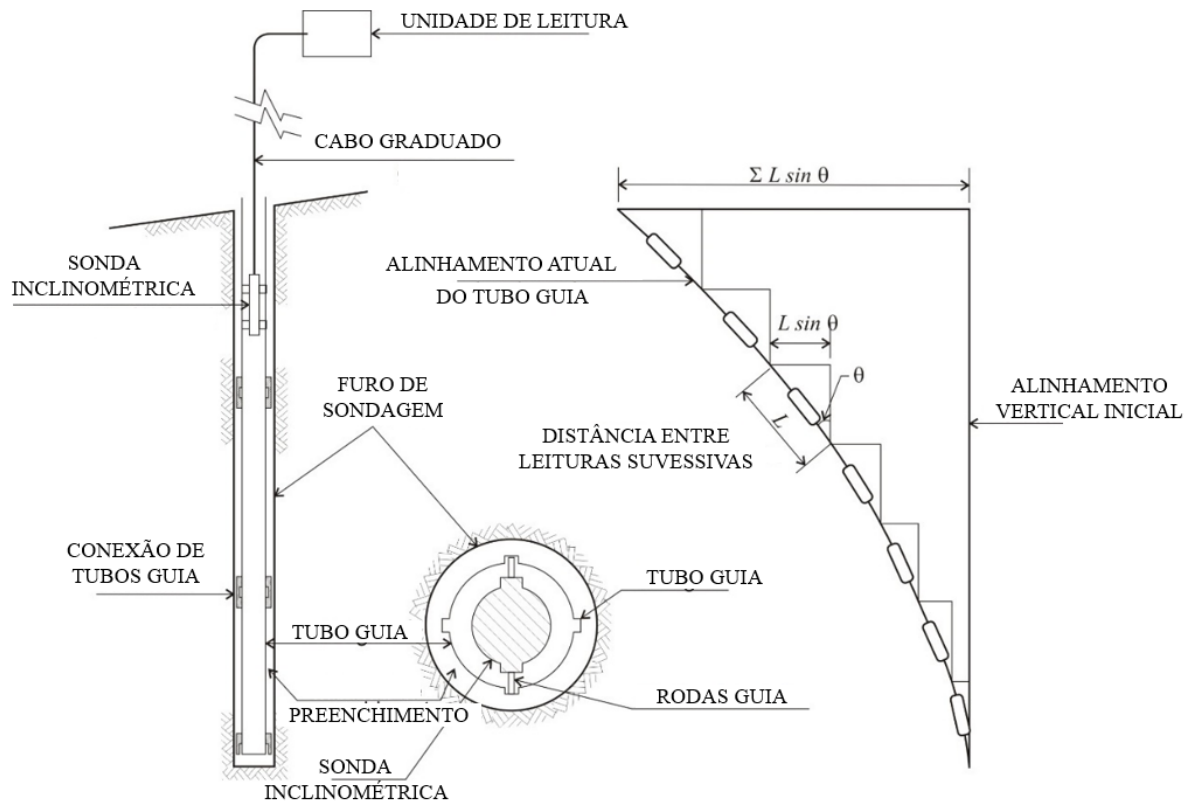


Figura 4.4. Princípios de operação do inclinômetro (adaptado de Dunicliff, 1988).

A Figura 4.5 mostra os tubos guia de PVC utilizados para a instalação (1 e 2), o momento da realização de leitura (3) e a sonda inclinométrica (torpedo) (4) utilizada para leitura e registro dos dados de monitoramento dos deslocamentos horizontais nos instrumentos instalados.



Figura 4.5. Materiais e equipamentos utilizados para instalação e aquisição de dados.

#### 4.2.2 - Piezômetro de Tubo Aberto (Casagrande)

Os piezômetros de tubo aberto (*standpipe*), também referidos como piezômetros de Casagrande, são instrumentos instalados em furos de sondagem e requerem a vedação e um elemento filtrante poroso para que o instrumento responda apenas à poropressão atuante na região do elemento filtrante (Dunnicliff, 1988).

Tais instrumentos possuem robustez e alta confiabilidade para a observação de subpressões e poropressões nos mais diversos contextos em que são aplicados, como em barragens de terra, encostas ou taludes, como no caso em estudo. A democratização do seu uso em obras geotécnicas se deve, dentre outros fatores, pela simplicidade de instalação e operação, baixo custo e ótimo desempenho a longo prazo (Silveira, 2006). A Figura 4.6 apresenta, de modo esquemático, o perfil genérico de instalação do piezômetro de tubo aberto instalado na área de estudo.

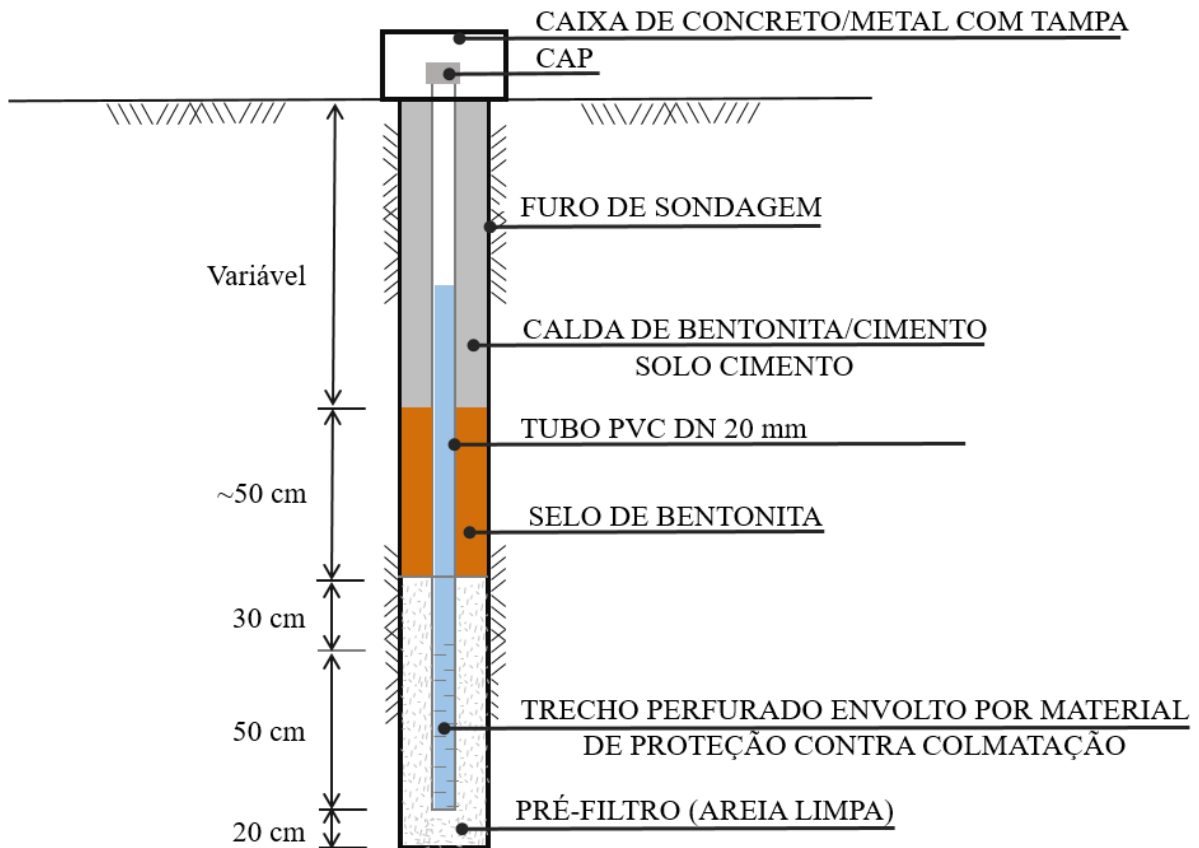


Figura 4.6. Perfil genérico de instalação de um piezômetro de tubo aberto.

#### 4.2.3 - Medidor de Nível de Água

O medidor de nível d'água é um instrumento utilizado em monitoramentos geotécnicos para indicar a leitura instantânea do nível d'água, submetido à pressão atmosférica, em um furo de sondagem previamente executado (Souza, 2012). O instrumento possui operação semelhante à do piezômetro de tubo aberto e, no que tange à instalação, o medidor de nível d'água se caracteriza por ter o espaço anelar entre o tubo perfurado e a parede do furo de sondagem preenchido por material drenante em toda a sua extensão.

A Figura 4.7 apresenta de modo esquemático o perfil genérico de instalação dos medidores de nível d'água instalados na área de estudo.

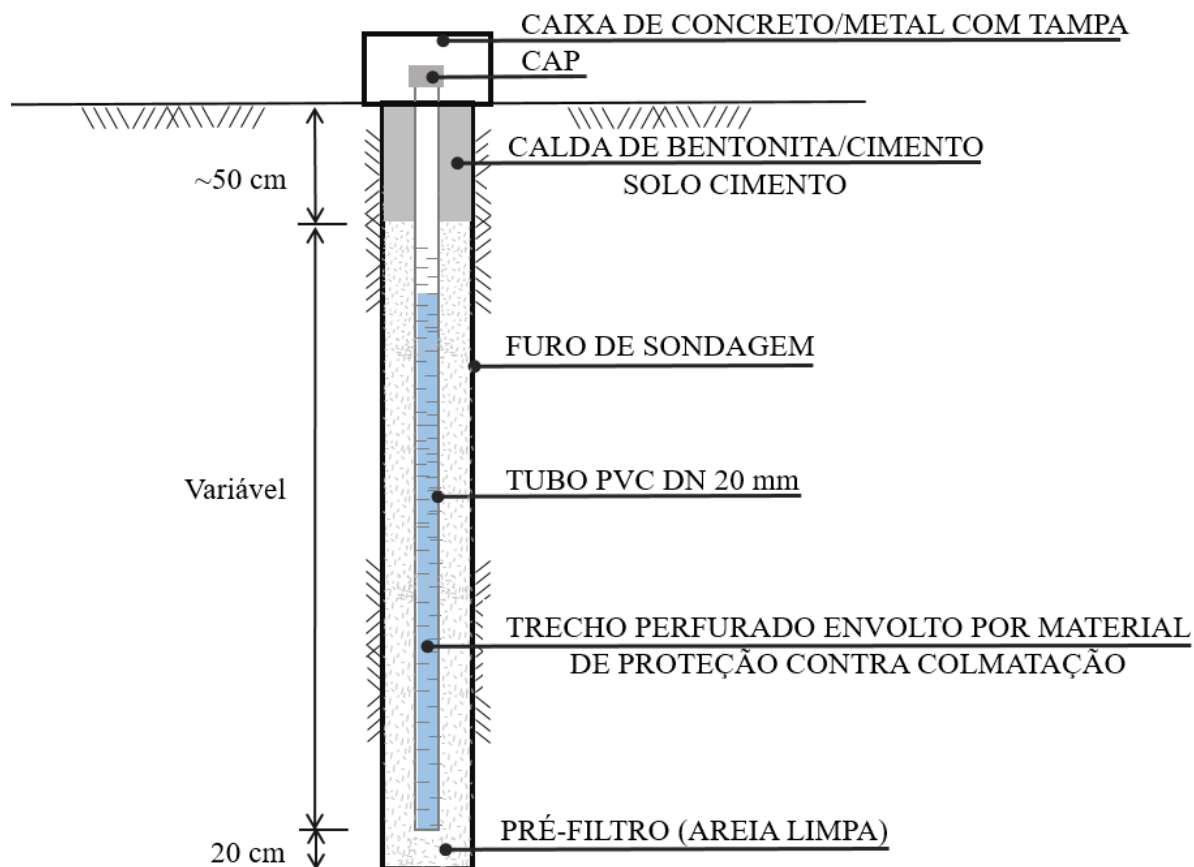


Figura 4.7. Perfil genérico de instalação de um medidor de nível d'água.

De acordo com Silveira (2006), o nível freático pode ser definido como a superfície superior de um corpo d'água subterrâneo, na qual atua a pressão atmosférica. Em condições estáticas do lençol freático onde há um aumento uniforme da pressão hidrostática com a profundidade, os níveis d'água medidos em um piezômetro instalado em grande profundidade e em um medidor de nível d'água instalado em uma menor profundidade correspondem ao nível freático. Entretanto, é possível, especialmente em material de baixa capacidade de drenagem, que haja uma diferença do nível freático, medido pelo medidor de nível d'água, e o nível piezométrico, medido pelo piezômetro, caso ocorram situações de fluxo de águas subterrâneas, sobrecarga ou descarga nas camadas superiores. A instalação conjunta desses instrumentos visa permitir a avaliação de possíveis subpressões ou fluxos descendentes no talude.

A fim de monitorar a ocorrência de tais fenômenos, os instrumentos MNA-1 e PZC-1 foram instalados em conjunto. A Figura 4.8 apresenta um perfil genérico da instalação dos instrumentos supracitados.

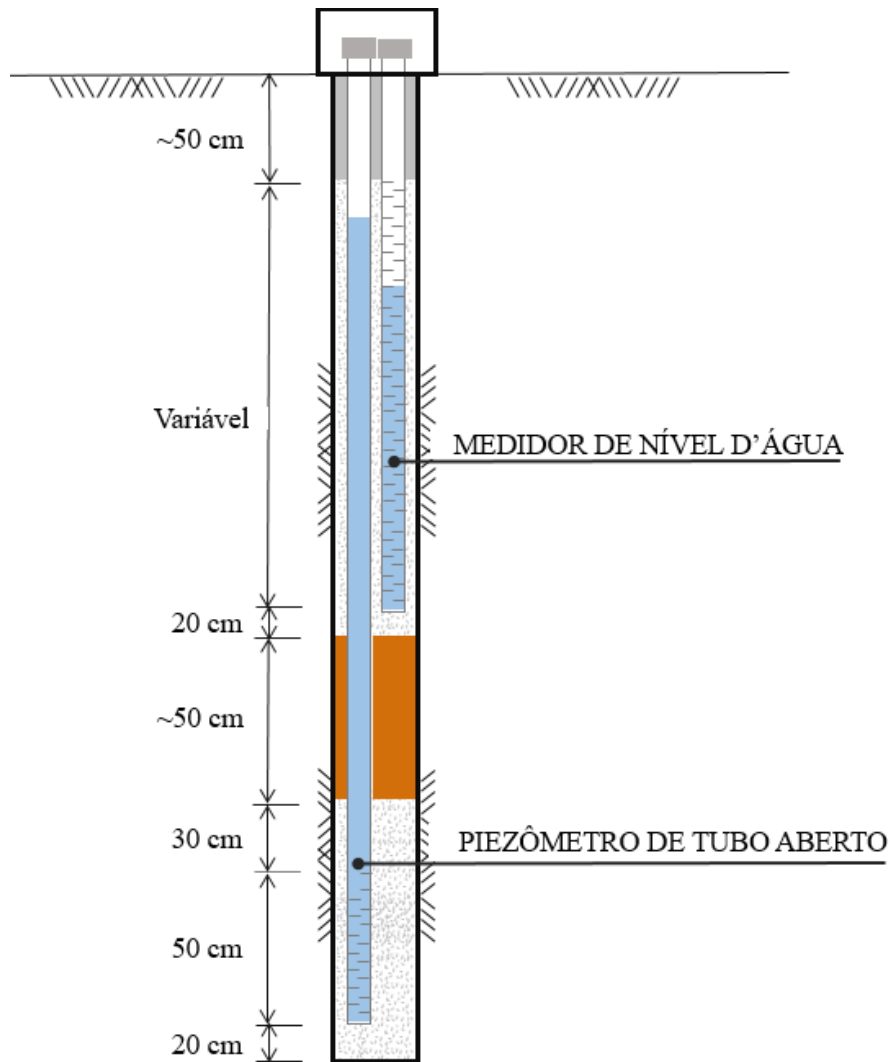


Figura 4.8. Perfil genérico da instalação conjunta de piezômetro de tubo aberto e medidor de nível d'água.

Os inclinômetros, piezômetros de tubo aberto e medidores de nível d'água foram instalados, com suas respectivas profundidades: I-1 (47,0 m), I-2 (20,0 m), I-3 (46,0 m), I-4 (30,0 m), I-5 (42,0 m), PZC-1/MNA-1 (48,0 m/47,0 m) e MNA-2 (16,0 m). A Figura 4.9 mostra a disposição em planta dos instrumentos instalados na área de estudo.

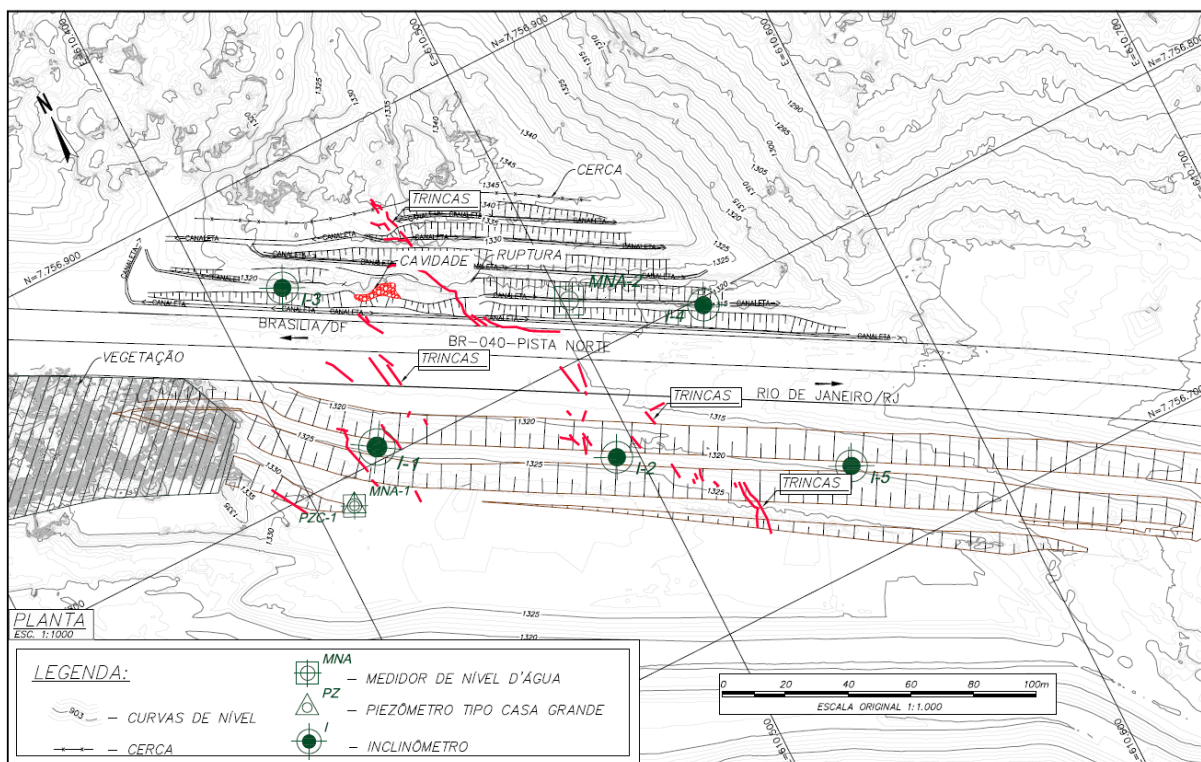


Figura 4.9. Instrumentação instalada na área de estudo.

#### 4.2.4 - Dados Pluviométricos

Os dados pluviométricos são coletados da estação pluviométrica mais próxima ao local de estudo, localizada em Piedade do Paraopeba, distrito de Brumadinho (MG). A obtenção dos dados é feita pelo órgão CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais). A série histórica contém dados de precipitação diária e acumuladas de 4, 25 e 96 dias.

#### 4.3 - Ensaios de Laboratório

Nesta seção são apresentados os ensaios de laboratório realizados em amostras de solo residual de filito retiradas na área de estudo. Na Figura 4.10 são apresentados, em planta, os pontos de amostragem para a realização dos ensaios de laboratório, com os respectivos nomes das amostras.

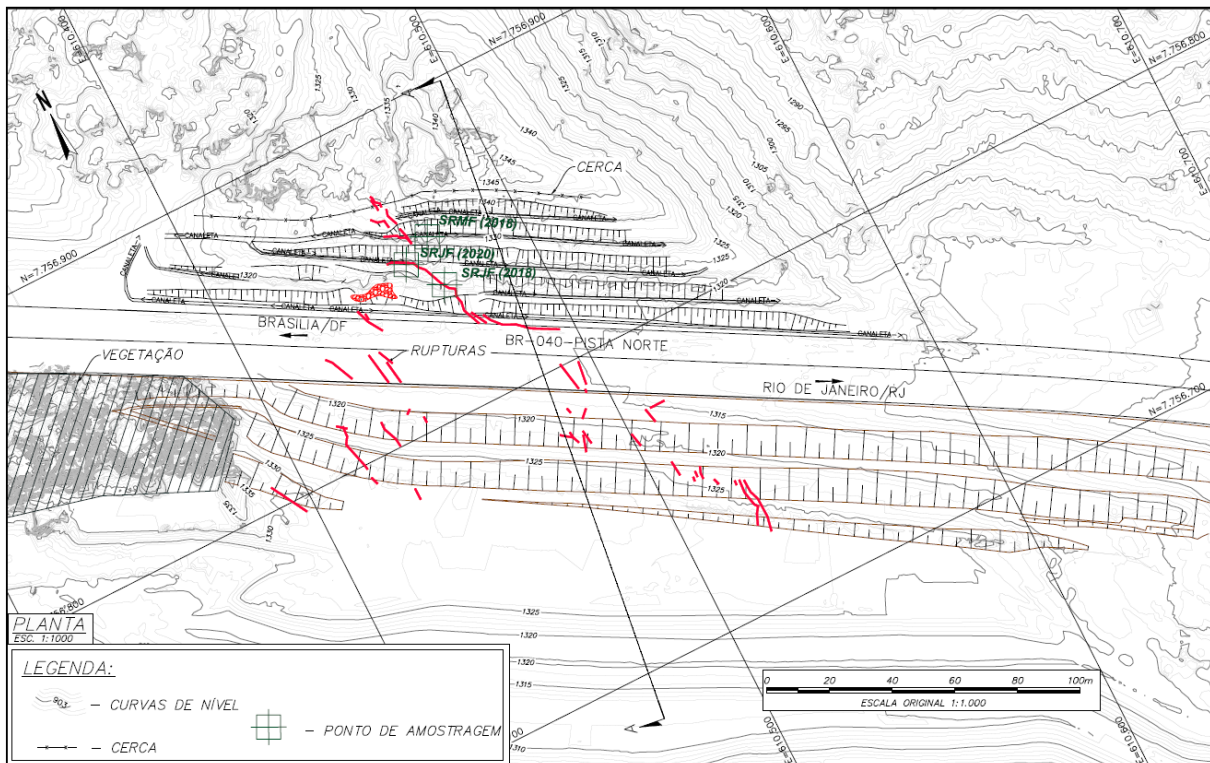


Figura 4.10. Localização dos pontos de amostragem para realização de ensaios de laboratório.

#### 4.3.1 - Caracterização Geotécnica

Para a caracterização geotécnica foi utilizado o solo remanescente das amostras indeformadas retiradas em Solo Residual Maduro de Filito (SRMF) e Solo Residual Jovem de Filito (SRJF), da campanha de investigação realizada em 2018, e da amostragem em Solo Residual Jovem de Filito, realizada em 2020.

Foram executados os seguintes ensaios normatizados: análise granulométrica (ABNT NBR 7181, 2016), limite de liquidez (ABNT NBR 6459, 2016), limite de plasticidade (ABNT NBR 7180, 2016) e densidade real dos grãos (ASTM D5550, 2014).

A análise granulométrica foi realizada com e sem o uso de defloculante a fim de verificar o comportamento da matriz fina do solo nas duas condições.

#### 4.3.2 - Ensaio de Permeabilidade

Foram realizados ensaios de permeabilidade à carga variável (ABNT NBR 14545, 2000), conforme o método B da referida normativa (sem aplicação de contrapressão para saturação da amostra) em corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5,0 cm e altura de 10,0 cm. As leituras de vazão foram realizadas durante o ensaio até que se atingisse valores de vazão pouco variáveis e sem tendência de aumento ou diminuição.



As amostras ensaiadas foram retiradas em solo residual maduro de filito (SRMF) e solo residual jovem de filito (SRJF) com fluxo paralelo e perpendicular às foliações do material a fim de verificar a influência da foliação na anisotropia hidráulica.

#### 4.3.3 - Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é normatizado pela ASTM D3080-11, que o conceitua como um ensaio de determinação relativamente rápida das propriedades de resistência drenada. Os caminhos de drenagem através do corpo de prova são curtos, o que permite que a dissipação do excesso de poropressão ocorra mais rápido do que em outros ensaios de determinação de parâmetros de resistência drenada.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em corpos de prova retirados de amostras indeformadas do solo residual maduro de filito (SRMF) e do solo residual jovem de filito (SRJF) nas condições natural e inundada.

A amostragem foi realizada a partir da cravação de cilindros metálicos biselados de 10,0 cm de diâmetro e 12,5 cm de altura. Os cilindros foram previamente lubrificados a fim de reduzir o atrito com o solo na parede interna.

Na Figura 4.11 são apresentados os cilindros utilizados para obtenção das amostras. Durante o processo de amostragem, o solo que excede o diâmetro do tubo é talhado de modo que a geometria se adeque ao tubo gerando a menor perturbação possível.



Figura 4.11. Amostragem para ensaio de cisalhamento direto.

Pode-se perceber em campo certa dificuldade na obtenção dos corpos de prova em função da existência planos de foliações pelas quais o material se rompe a pequenas deformações. Tais planos preferenciais de ruptura podem ser observados na Figura 4.12.



Figura 4.12. Planos preferenciais de ruptura observados na amostragem do solo.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em corpos de prova de seção quadrada (5,0 x 5,0 cm) e altura de 2,0 cm nas condições natural e inundada. Nesses últimos, os corpos de prova permaneceram inundados por, pelo menos, 24 horas antes das fases de consolidação e cisalhamento propriamente dito. Os corpos de prova foram submetidos a tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa (ou 140 kPa) e 200 kPa. A Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16 mostram os corpos de prova de cada material, em suas respectivas condições, após a realização dos ensaios de cisalhamento direto.

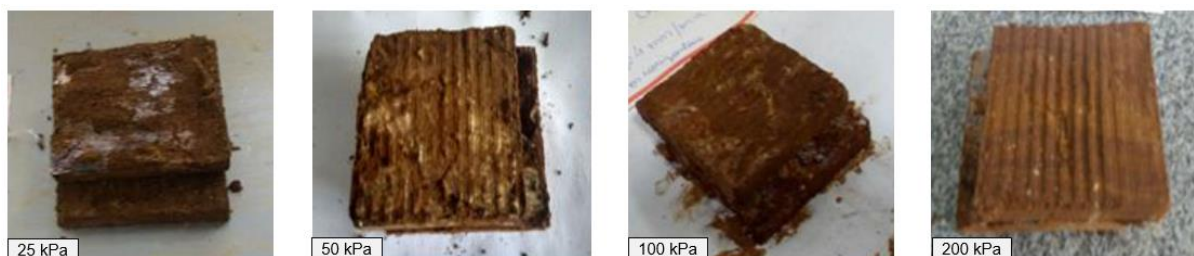


Figura 4.13. Corpos de prova de solo residual maduro de filito (SRMF) – condição natural.

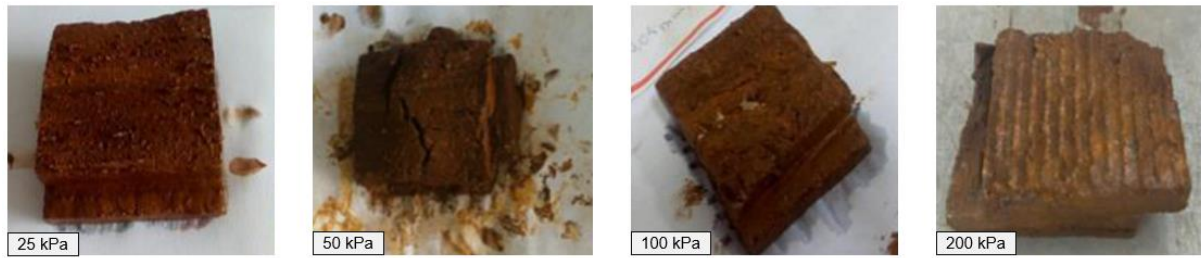


Figura 4.14. Corpos de prova de solo residual maduro de filito (SRMF) – condição inundada.

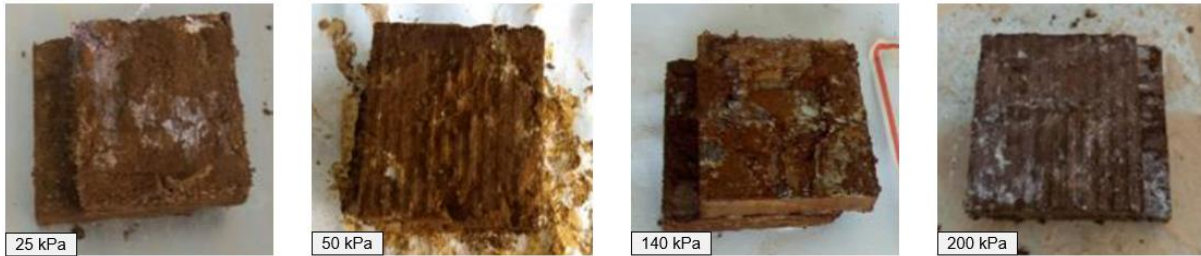


Figura 4.15. Corpos de prova de solo residual jovem de filito (SRJF) – condição natural.

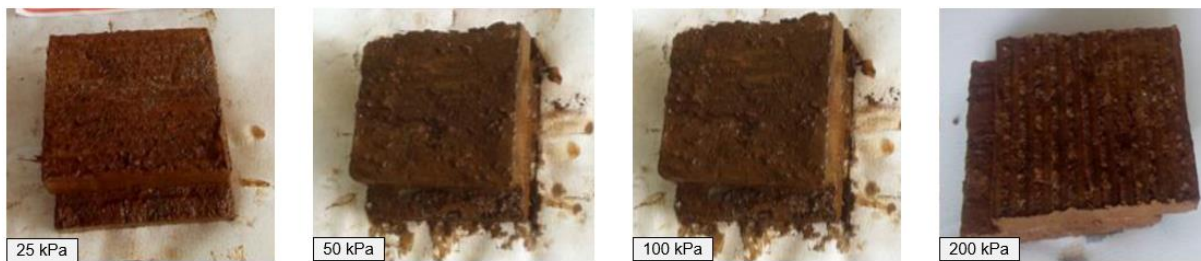


Figura 4.16. Corpos de prova de solo residual jovem de filito (SRJF) – condição inundada.

A norma ASTM D3080-11 apresenta valores típicos de tempo de falha e estimativas de deslocamento horizontal relativo para que ocorra a falha no material ensaiado de modo a garantir as condições de drenagem durante o cisalhamento. Desse modo, a taxa de deslocamento durante o cisalhamento é definida pela Equação (4.1):

$$R_d = \frac{d_f}{t_f} \quad (4.1)$$

Onde:  $R_d$  é a taxa de deslocamento durante o cisalhamento;  $d_f$  é a estimativa de deslocamento lateral relativo para a ruptura, em mm;  $t_f$  é tempo total estimado decorrido até a ruptura, em minutos.

De acordo com a referida norma, o valor de  $t_f$  para um solo siltoso de baixa plasticidade é de aproximadamente 200 min e o valor de  $d_f$  para um solo normalmente adensado ou levemente pré-adensado é de aproximadamente 10 mm, retornando, de modo que a taxa de

deslocamento durante a fase de cisalhamento do ensaio devesse ocorrer em valores iguais ou menores que 0,05 mm/min. Como o valor praticado no ensaio foi de 0,04 mm/min, tem-se garantido que o carregamento ocorreu sob condições drenadas.

#### 4.3.4 - Ensaio de Compressão Triaxial

O ensaio de compressão triaxial pode ser dividido em três principais categorias, segundo Head (1986), a saber:

- **Ensaio Rápido Não-Drenado**, no qual nenhuma tentativa de medir poropressão é realizada e os parâmetros são obtidos apenas em termos de tensão total;
- **Ensaio Não-Drenado**, no qual não é permitida a drenagem do corpo de prova durante a aplicação da tensão de desvio. Assim, a poropressão gerada não pode ser dissipada e é medida durante o ensaio.
- **Ensaio Drenado**, no qual a drenagem é permitida e medida e não deve haver desenvolvimento de excesso de poropressão durante a aplicação da tensão de desvio.

O ensaio de compressão triaxial do tipo consolidado isotropicamente drenado (CID) é normatizado pela norma americana ASTM D7181-20. De acordo com a referida norma, o procedimento de ensaio visa a determinação da resistência e relação de tensão-deformação de uma amostra cilíndrica submetida à consolidação e posteriormente cisalhada em condições drenadas a uma taxa constante de deformação axial (ensaio de deformação controlada).

No talude avaliado, são observadas movimentações constantes sob condições de carregamento/descarregamento lento, que representam uma condição de sollicitação drenada. Apesar de não se encontrar saturado em campo, utilizou-se da realização do ensaio com a amostra saturada a fim de simular piores condições de resistência do material.

Conhecidas as características de fragilidade do material amostrado e a dificuldade de manuseio para a retirada de corpos de prova em condição indeformada, em função dos seus planos de foliação, foram retirados dois blocos indeformados para a realização dos ensaios de laboratório (Figura 4.17).



Figura 4.17. Retirada de blocos indeformados para a realização de ensaios de laboratório.

O ensaio de compressão triaxial foi realizado no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ), Campus Alto Paraopeba, com o apoio do Grupo de Pesquisa em Infraestrutura de Transportes e Obras Geotécnicas. O equipamento de utilizado para o ensaio consiste de um painel de aplicação de pressões hidrostáticas, uma prensa servo-controlada e dos instrumentos de medição de deslocamento (LVDT), força (Célula de Carga), variação volumétrica (Medidor de Variação Volumétrica) e poropressão (Transdutor de Poropressão). A Figura 4.18 mostra uma célula de ensaio montada na prensa servo-controlada e respectivos componentes do equipamento.

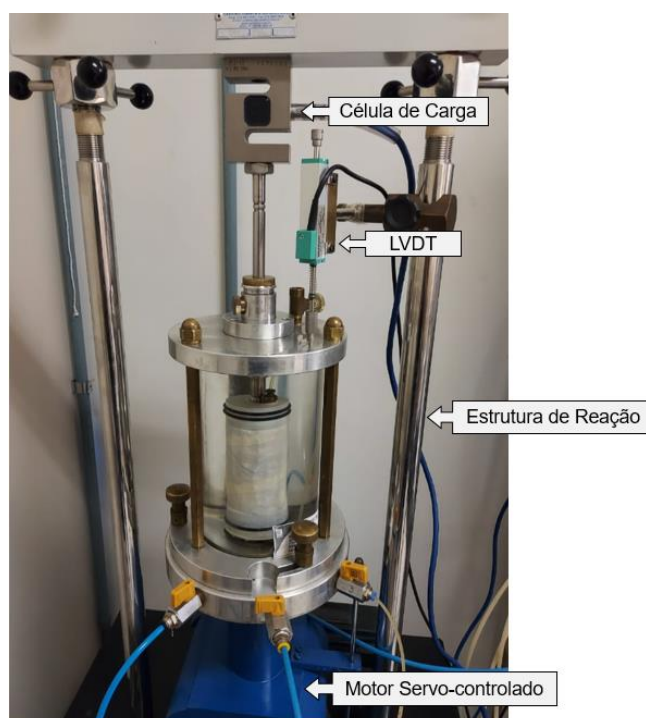


Figura 4.18. Equipamento para ensaio de compressão triaxial.

Para a determinação dos parâmetros de resistência do solo foram ensaiados quatro corpos de prova, moldados com dimensões de 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, aproximadamente. Os corpos de prova foram submetidos à tensões confinantes para consolidação de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. A Figura 4.19 apresenta os corpos de prova moldados antes da realização do ensaio.



Figura 4.19. Corpos de prova – antes do ensaio de compressão triaxial.

A Figura 4.20 mostra os componentes utilizados na montagem dos corpos de prova ensaiados.

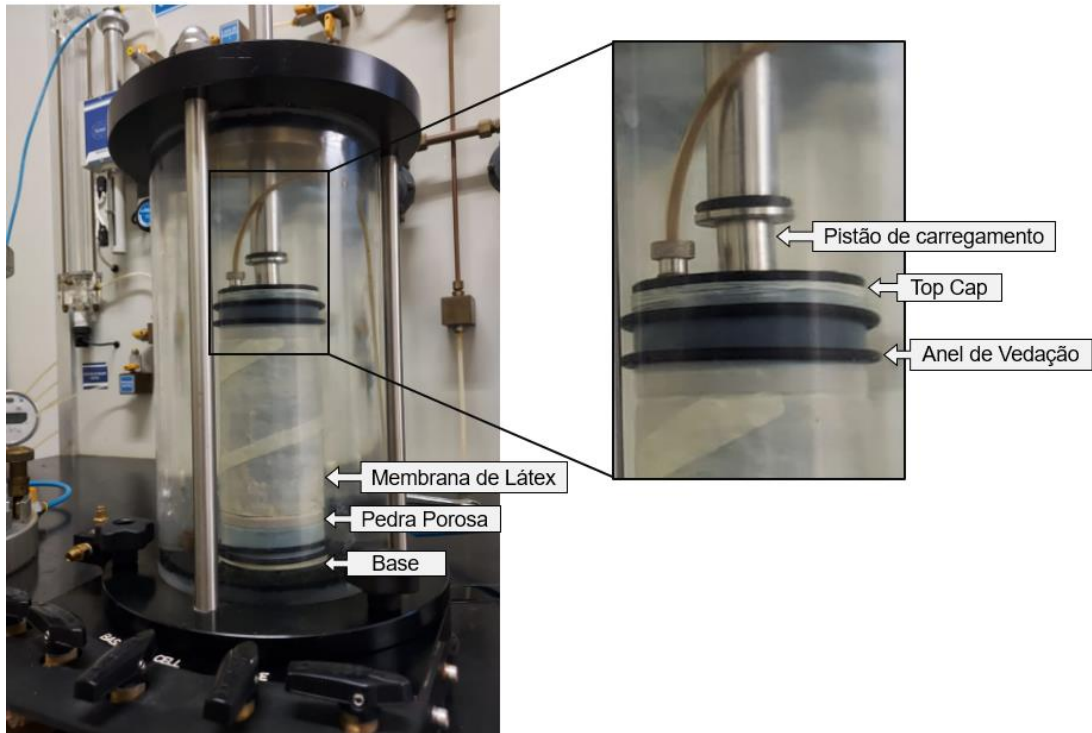


Figura 4.20. Componentes de montagem dos corpos de prova.

De acordo com essa norma D7181 (ASTM, 2011), a taxa de deformação a ser aplicada na fase de carregamento da amostra a fim de se garantir a dissipação do excesso de poropressão pode ser calculada, considerando a ruptura do corpo de prova como 4% de deformação axial e a impossibilidade de drenagem pela lateral, através da Equação (4.2):

$$\Delta\varepsilon = \frac{4\%}{10t_{90}} \quad (4.2)$$

Onde:  $\Delta\varepsilon$  é a taxa de deformação na fase de compressão axial;  $t_{90}$  é o tempo necessário para se atingir 90% do grau de adensamento, verificado na fase de consolidação ensaio.

De acordo com Head (1986), para amostras cuja relação comprimento/diâmetro é aproximadamente igual a 2, o tempo necessário para que ocorra a ruptura do corpo de prova em ensaios do tipo CD com drenagem lateral é dado pela Equação (4.3):

$$t_f = 14 \cdot t_{100} \quad (4.3)$$

Onde:  $t_f$  é o tempo necessário para que a amostra seja levada à ruptura;  $t_{100}$  é o tempo necessário para se atingir 100% do grau de adensamento, verificado na fase de consolidação do ensaio.

A taxa de deformação axial a ser utilizada no ensaio pode ser definida pela equação:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon.L}{100t_f} \text{ mm/min} \quad (4.4)$$

Onde:  $\Delta\varepsilon$  é a taxa de deformação na fase de compressão axial;  $\varepsilon$  é a deformação axial na qual o material sofre a ruptura;  $L$  é a altura da amostra;  $t_f$  é o tempo necessário para que a amostra seja levada à ruptura.

Foi utilizada uma taxa de deformação axial de 0,03 mm/min para o ensaio. Durante a etapa de carregamento foram realizadas leituras de poropressão, por meio do transdutor de poropressão, e verificou-se que a taxa de deformação axial adotada foi suficientemente lenta para que o carregamento ocorresse de forma drenada, como pretendido.



### 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se, neste item, o conjunto de resultados obtidos nas campanhas de investigação de laboratório e campo, e a discussão dos mesmos, bem como do monitoramento realizado na estrutura, que balizaram o entendimento do comportamento do material, do modelo de engenharia e do fenômeno observado em campo.

#### 5.1 - Ensaio de Laboratório

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de laboratório executados nos solos amostrados no talude norte em conjunto com as análises e discussões dos dados obtidos.

##### 5.1.1 - Caracterização Geotécnica

Para fins de identificação os materiais serão apresentados conforme suas características geológicas e o ano em que foram amostrados e ensaiados. Assim, SRMF (2018) deve ser entendido como Solo Residual Maduro de Filito amostrado em 2018, SRJF (2018) deve ser entendido como Solo Residual Jovem de Filito amostrado em 2018 e SRJF (2020) deve ser entendido como Solo Residual Jovem de Filito amostrado em 2020.

Um resumo dos resultados obtidos nas análises granulométricas é apresentado na Tabela 5.1 e as curvas granulométricas obtidas para os solos estudados com e sem o uso de defloculante no ensaio são apresentados na Figura 5.1.

Tabela 5.1. Resultado da análise granulométrica com e sem o uso de defloculante.

Ensaio	Material	Argila	Silte	Areia		Pedregulho	
				Fina	Média Grossa		
Com Defloculante	SRMF(2018)	16,21	39,05	36,37	8,07	0,24	0,05
	SRJF(2018)	17,29	42,74	24,55	14,51	0,77	0,14
Sem Defloculante	SRMF(2018)	0,00	55,83	30,19	13,92	0,00	0,05
	SRJF(2018)	0,00	62,80	24,65	12,40	0,01	0,14
	SRJF(2020)	13,11	62,04	20,85	5,00	1,00	0,00

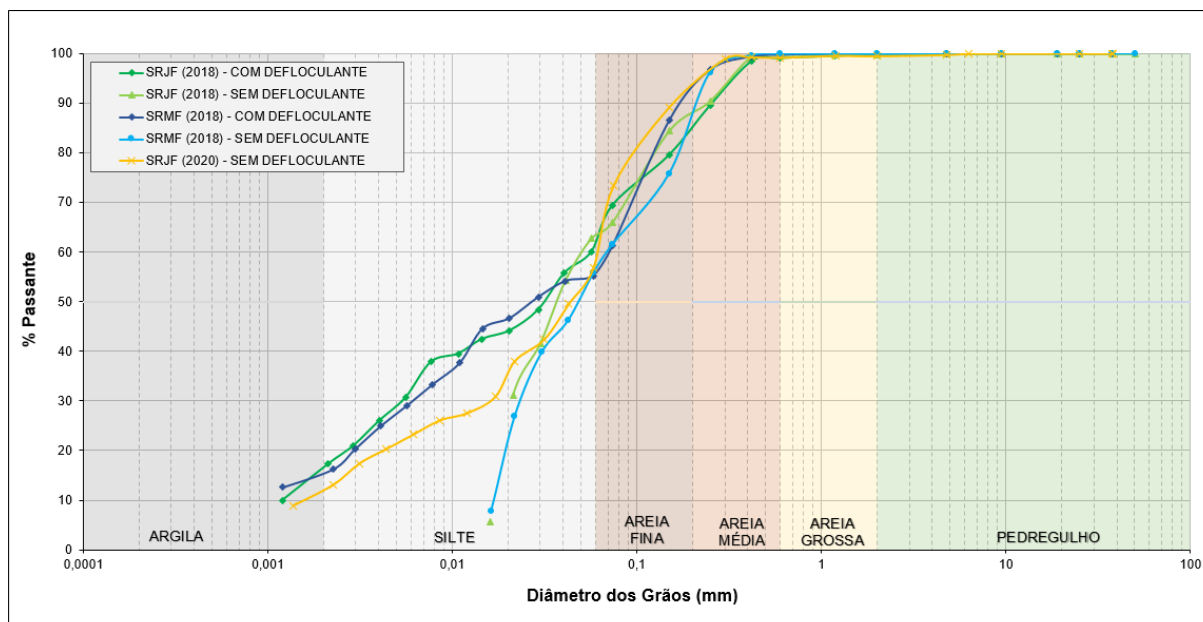


Figura 5.1. Curva granulométrica dos materiais ensaiados.

É possível observar, pela diferença entre os ensaios com e sem o uso de defloculante, que a agregação do solo estudado se dá da fração argilosa para a fração siltosa, onde as curvas se distanciam. Na fração arenosa não há influência significativa do uso de defloculante no resultado.

A Tabela 5.2 apresenta um resumo dos parâmetros físicos obtidos na caracterização geotécnica e do coeficiente de permeabilidade obtidos em ensaios de permeabilidade à carga variável.

Tabela 5.2. Ensaio de caracterização geotécnica e condutividade hidráulica.

Material	Limites de Atterberg			$\delta_{nat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$G_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{nat}$ (%)	$k$ (cm/s)
	wL (%)	wP (%)	IP(%)				
SRMF(2018)	38,4	34,1	4,2	1,890	3,004	29,2	7,8E-05
SRJF(2018)	41,4	36,7	4,7	1,625	3,083	46,5	4,7E-05
SRJF(2020)	33,7	NP	NP	1,809	3,362	20,4	-

Para o SRJF (2020) houve a tentativa de realização dos ensaios de limites de Atterberg, em que o ensaio de limite de liquidez apresentou resultado semelhante aos obtidos na campanha de 2018 (33,7%), entretanto, não foi possível a realização do ensaio de limite de plasticidade e, portanto, a determinação do índice de plasticidade.

O índice de atividade é definido como:  $IP / \% \text{ fração granulométrica menor que } 2 \mu\text{m}$  (Skempton, 1953). Considera-se o material ativo quando os valores forem superiores a 1,25. Ressalta-se que argilas ativas têm características de expansibilidade e perda de resistência

quando submetidas a acréscimos no teor de umidade. Os solos apresentam índice de atividade de argilas (IA) da ordem de 0,26, caracterizando uma argila inativa.

Observa-se, em geral, que o solo possui características de baixa plasticidade e densidade dos grãos elevada, o que se justifica pela proximidade do ponto de amostragem com o corpo minério de ferro adjacente. Albuquerque Filho (2004) relata que partículas de minério de ferro apresentam valores de densidade dos grãos da ordem de 3,0 g/cm<sup>3</sup> para materiais próximos a regiões de extração de minério de ferro localizados no Quadrilátero Ferrífero.

A Figura 5.2 apresenta a carta de plasticidade que permite a classificação dos materiais de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). O solo é classificado como silte de baixa plasticidade, o que endossa os resultados obtidos nos ensaios de granulometria e limites de Atterberg.

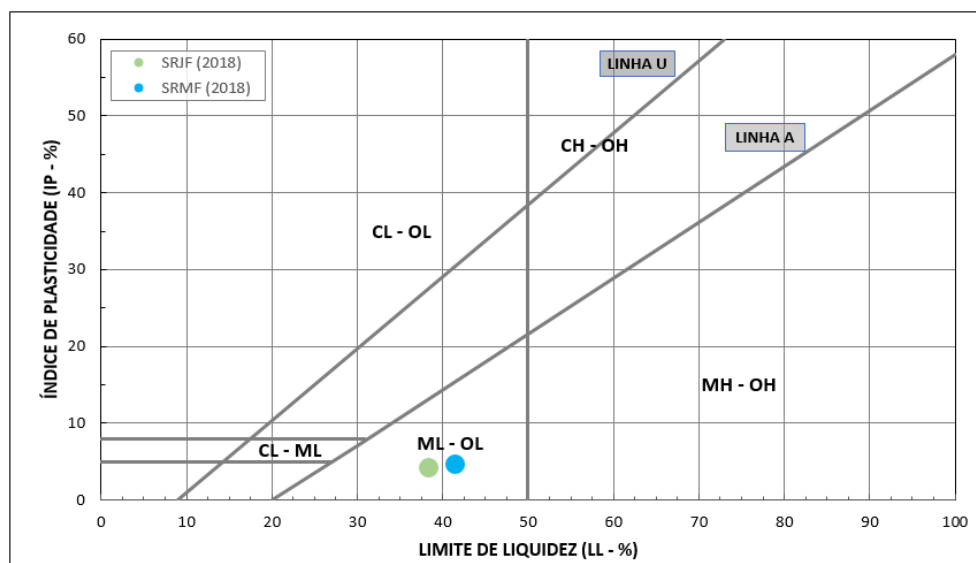


Figura 5.2. Carta de plasticidade dos materiais.

### 5.1.2 - Permeabilidade à Carga Variável

Para fins de verificação da influência das foliações na condutividade hidráulica, especialmente do solo residual jovem, foram realizados ensaios de permeabilidade à carga variável com fluxo paralelo e perpendicular às foliações apresentadas pelo material. Os resultados são apresentados na Tabela 5.3

Tabela 5.3. Coeficiente de permeabilidade de acordo com a orientação de fluxo e material.

Material	Orientação do fluxo em relação à foliação	$\gamma_{nat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)	e	k (cm/s)
SRMF(2018)	Perpendicular	1,10	40,6	55,3	1,80	$3,3 \cdot 10^{-5}$
	Paralelo	1,08	43,3	56,9	1,86	$6,0 \cdot 10^{-5}$
SRJF(2018)	Perpendicular	1,25	37,7	39,6	1,40	$4,0 \cdot 10^{-5}$
	Paralelo	1,31	33,4	42,5	1,29	$1,2 \cdot 10^{-4}$

A Tabela 5.3 mostra que o solo residual maduro de filito (SRMF) não apresenta diferença significativa no valor do coeficiente de permeabilidade, mesmo ensaiado em orientações diferentes, enquanto o solo residual jovem de filito (SRJF) apresenta permeabilidade com o fluxo perpendicular às foliações cerca de três vezes menor que a permeabilidade obtida com fluxo paralelo. Tal resultado expressa uma baixa relevância das estruturas reliquiares no solo residual jovem, no que diz respeito à anisotropia hidráulica.

De acordo com Mello (1967), os materiais ensaiados podem ser classificados como areias finas siltosas. Apesar da análise granulométrica mostrar predominância de silte em relação à areia, os ensaios de permeabilidade podem ser considerados representativos ao se levar em conta que a estrutura do solo é mantida no ensaio permeabilidade, o que não ocorre na caracterização. Ademais, a fração arenosa ocorre em percentual próximo à fração siltosa.

### **5.1.3 - Cisalhamento Direto**

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados no solo residual maduro de filito (SRMF 2018) e solo residual jovem de filito (SRJF 2018). Ambos foram ensaiados em corpos de prova nas condições natural e inundada. Uma consolidação das características iniciais e finais dos corpos de prova é apresentada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Consolidação das características iniciais e finais dos corpos de prova.

Material	Condição	$\sigma_n$ (kPa)	$w_i$	$w_f$	$e_0$	$S_0$	$S_f$
SRMF (2018)	Natural	25	45,55%	40,30%	1,98	70,84%	62,67%
		50	46,61%	46,80%	1,93	74,35%	74,65%
		140	28,77%	34,30%	1,84	48,23%	57,51%
		200	41,29%	41,65%	1,70	74,75%	75,40%
	Inundada	25	42,79%	50,82%	1,87	70,73%	84,00%
		50	43,48%	70,73%	2,19	61,30%	99,74%
		100	46,42%	59,31%	1,83	78,07%	99,76%
		200	44,71%	62,84%	2,07	66,45%	93,40%
SRJF (2018)	Natural	25	31,92%	31,56%	1,10	87,01%	86,01%
		50	34,15%	34,80%	1,17	87,77%	89,46%
		100	42,28%	36,91%	1,14	86,16%	76,95%
		200	41,78%	39,27%	1,29	97,03%	91,19%
	Inundada	25	33,22%	35,53%	1,07	93,19%	99,69%
		50	34,23%	43,13%	1,31	78,67%	99,13%
		100	37,97%	38,50%	1,16	97,92%	99,30%
		200	39,84%	44,25%	1,34	89,34%	99,24%

$\sigma_n$  = tensão normal;  $w_i$  = Teor de Umidade Inicial;  $w_f$  = Teor de Umidade Final;  $e_0$  = Índice de Vazios Inicial;  $S_0$  = Grau de Saturação Inicial;  $S_f$  = Grau de Saturação Final

A seguir, são apresentadas curvas de deformação horizontal por tensão de cisalhamento e as envoltórias de resistência obtidas para cada material ensaiado em sua respectiva condição de saturação.

#### 5.1.3.1 - Solo Residual Maduro de Filito (SRMF 2018) – Condição Natural

A Figura 5.3 e a Figura 5.4 apresentam a curva de deformação horizontal pela resistência ao cisalhamento e a envoltória de resistência, respectivamente, obtidas pelo ensaio de cisalhamento direto realizado em amostras do material denominado solo residual maduro de filito (SRMF 2018), ensaiado em condição natural.

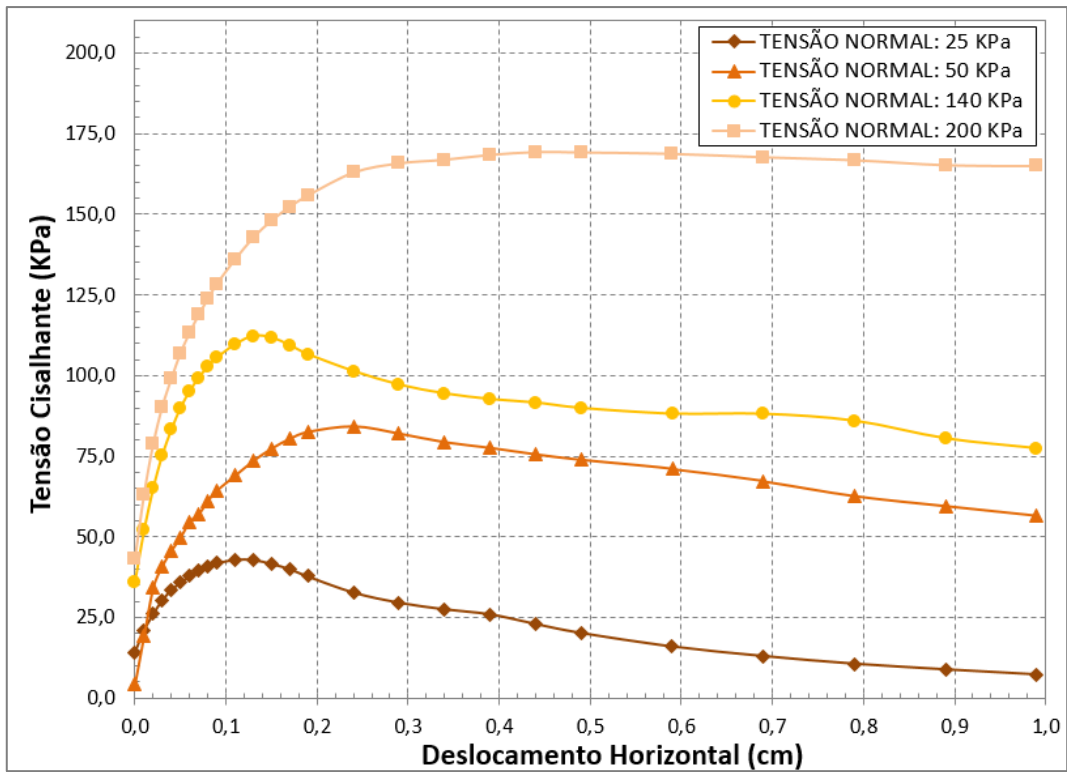


Figura 5.3. Curva de deformação horizontal por tensão de cisalhamento – SRMF(2018) em Condição Natural

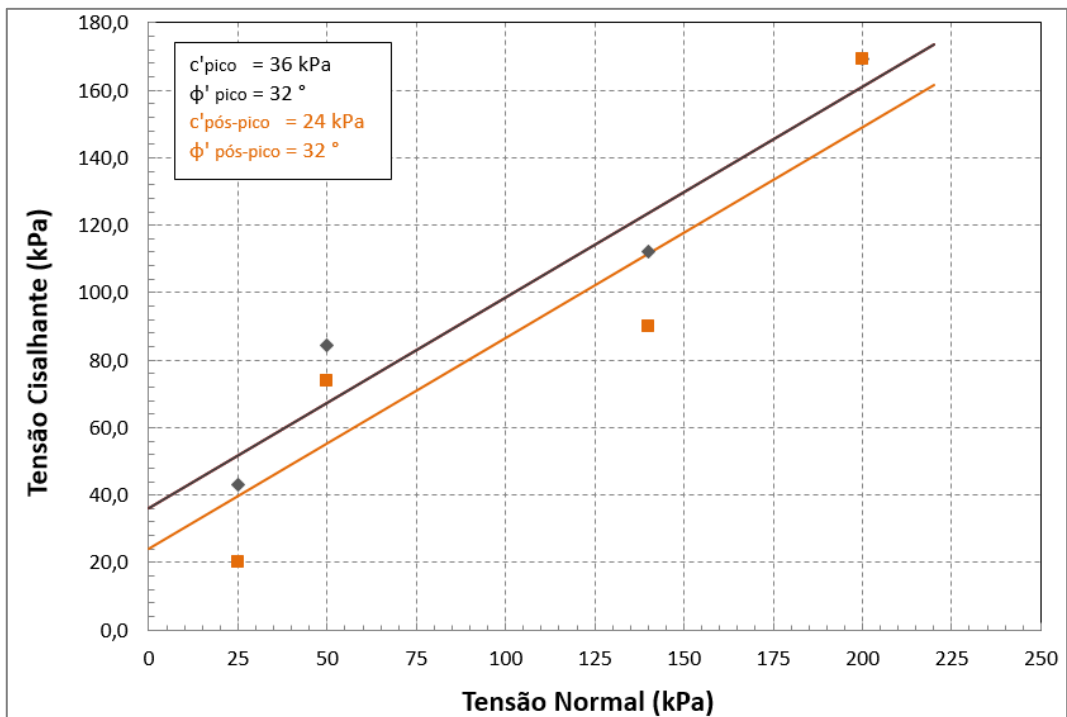


Figura 5.4. Envoltória de resistência – SRMF(2018) em Condição Natural.

O solo residual maduro de filito apresenta comportamento consistente com picos mais expressivos em tensões inferiores a 200 kPa. É possível observar que a amostra ensaiada apresenta considerável rigidez em baixas deformações. A alta rigidez inicial pode ter relação

com processos de cimentação desenvolvidos no solo residual, dada a proximidade do local de amostragem com um depósito de minério de ferro.

### 5.1.3.1 - Solo Residual Maduro de Filito (SRMF 2018) – Condição Inundada

São apresentadas na Figura 5.5 e na Figura 5.6 a curva de deformação horizontal pela resistência ao cisalhamento e a envoltória de resistência, respectivamente, obtidas pelo ensaio de cisalhamento direto realizado em amostras de solo residual maduro de filito (SRMF 2018), ensaiadas em condição inundada, dadas as faixas de tensão normal aplicadas.

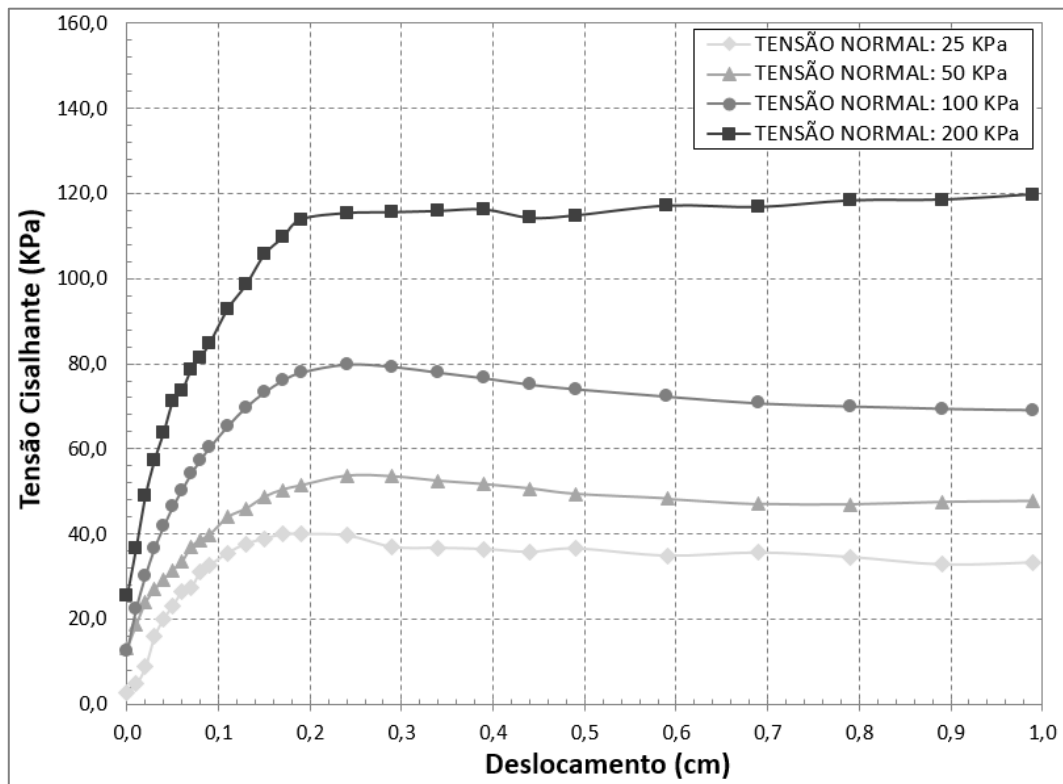


Figura 5.5. Curva de deformação horizontal por tensão de cisalhamento – SRMF(2018) em Condição Inundada

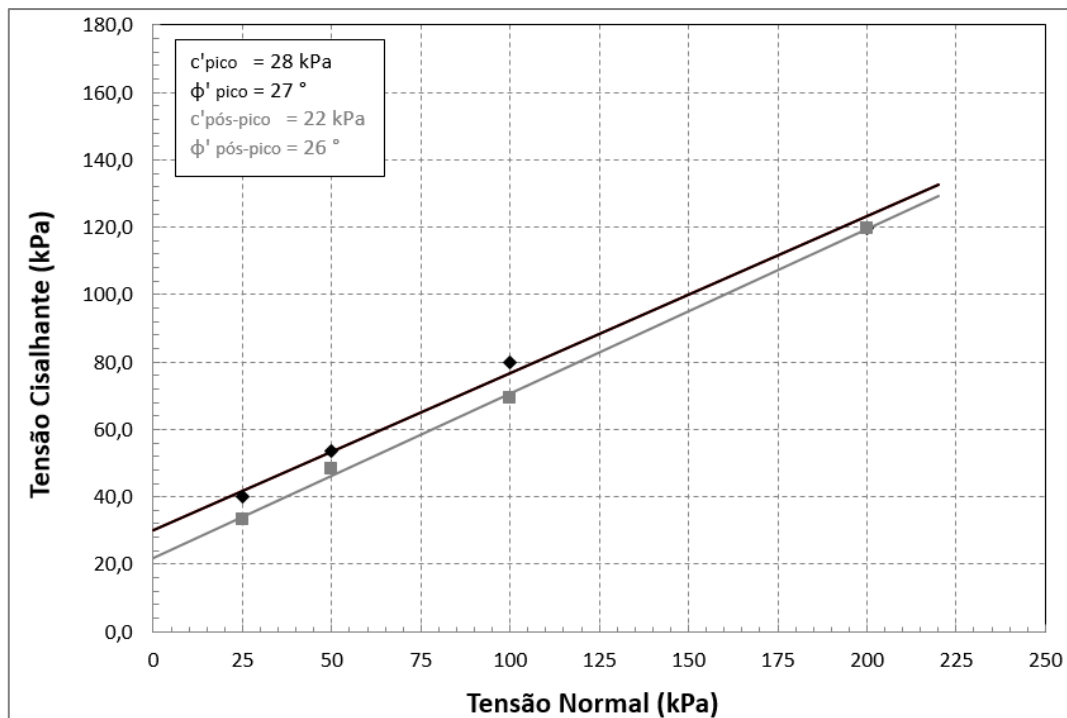


Figura 5.6 – Envoltória de resistência – SRMF(2018) em Condição Inundada

As curvas de resistência ao cisalhamento (Figura 5.5) apresentam picos menos pronunciados desde baixas tensões até a inexistência de resistência de pico na amostra ensaiada a 200 kPa de tensão normal.

Diferentemente das demais amostras ensaiadas, observa-se uma certa estabilização de tensão cisalhante pós-pico para todos os corpos de prova ensaiados, sendo possível, portanto, determinar uma envoltória de resistência pós-pico a partir de patamares de resistência melhor definidos para o solo residual maduro de filito na condição inundada, conforme mostrado na Figura 5.6.

### 5.1.3.2 - Solo Residual Jovem de Filito (SRJF 2018) – Condição Natural

A Figura 5.7 e a Figura 5.8 apresentam, respectivamente, a curva de deformação horizontal pela resistência ao cisalhamento e a envoltória de resistência, obtidas no ensaio de cisalhamento direto em uma amostra de solo residual jovem de filito (SRJF 2018) ensaiado em condição natural, considerando as faixas de tensão normal aplicadas.



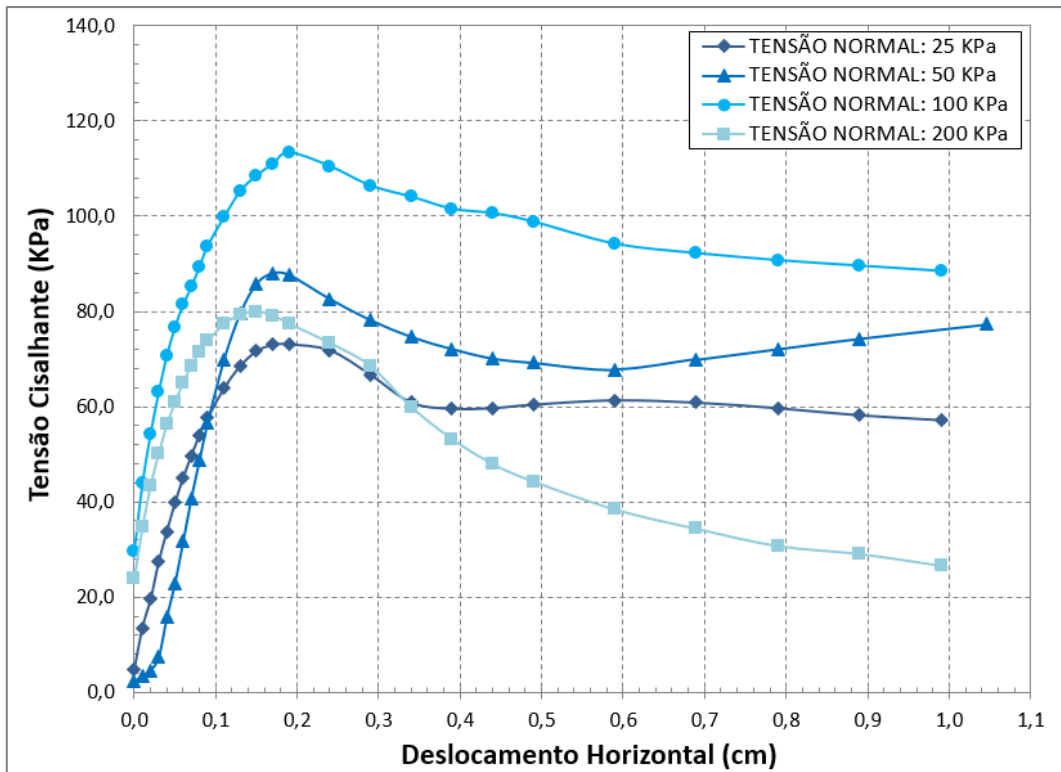


Figura 5.7. Curva de deformação horizontal por tensão de cisalhamento – SRJF(2018) em Condição Natural.

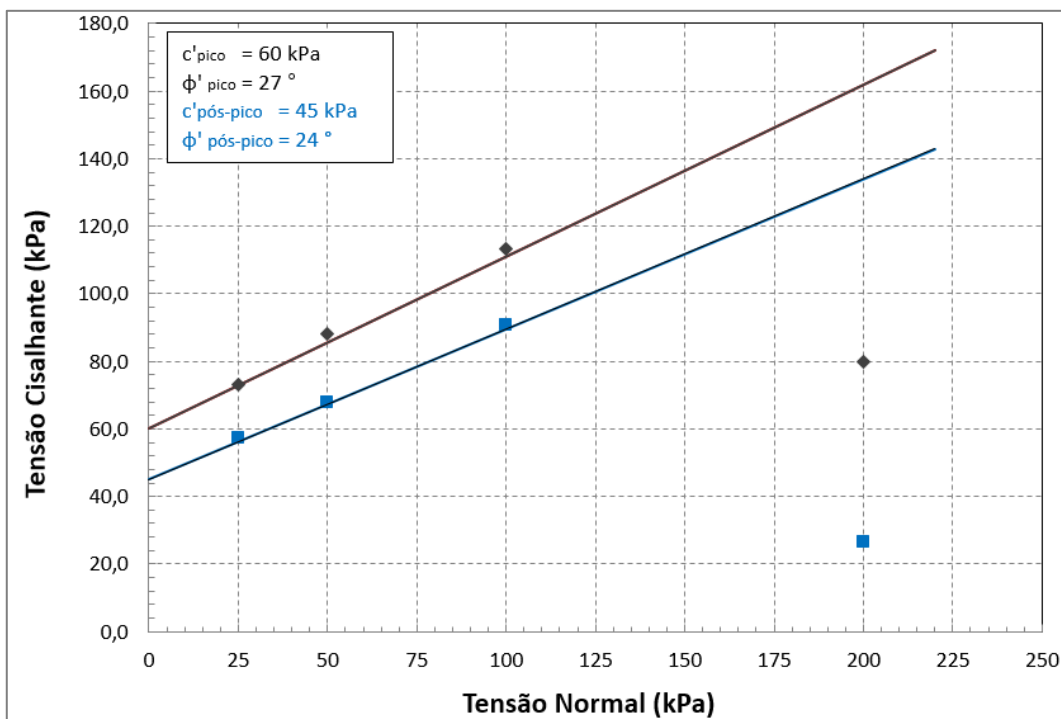


Figura 5.8. Envoltória de resistência – SRJF(2018) em Condição Natural.

O solo residual jovem de filito, cisalhado em condição natural de umidade, apresenta tensões cisalhantes de pico, em torno de 4% de deformação horizontal. Não se observa o

estabelecimento de um patamar de resistência (resistência residual) como uma característica geral do material.

Como pode ser observado tanto na Figura 5.7 quanto na Figura 5.8, o corpo de prova ensaiado à tensão de 200 kPa se rompe em uma tensão cisalhante inferior aos demais, não sendo considerado na envoltória para definição dos parâmetros de resistência. Não foi possível que todos corpos de prova moldados a partir da amostra indeformada tivessem planos de foliação com a mesma direção em relação à imposta pelo cisalhamento. Mesmo os planos de foliação estando paralelos à direção do cisalhamento, outra questão relativa aos ensaios de cisalhamento direto neste tipo de material, refere-se ao fato de não ter certeza que os planos durante o ensaio estejam coincidentes, podendo estar pouco acima ou pouco abaixo da superfície de cisalhamento. O corpo de prova ensaiado a 200 kPa pode ser uma situação de plano de foliação coincidente com o plano de ruptura imposto pelo ensaio. Tal resultado mostra a influência da anisotropia resultante das foliações na resistência ao cisalhamento do solo residual jovem de filito, independentemente dos níveis de confinamento.

#### **5.1.3.3 - Solo Residual Jovem de Filito (SRJF 2018) – Condição Inundada**

São apresentados na Figura 5.9 e na Figura 5.10, a curva de deformação horizontal pela resistência ao cisalhamento e a envoltória de resistência, respectivamente, oriundas do ensaio de cisalhamento direto realizado em uma amostra de residual jovem de filito (SRJF 2018) ensaiado na condição inundada, dadas as faixas de tensões normais aplicadas.

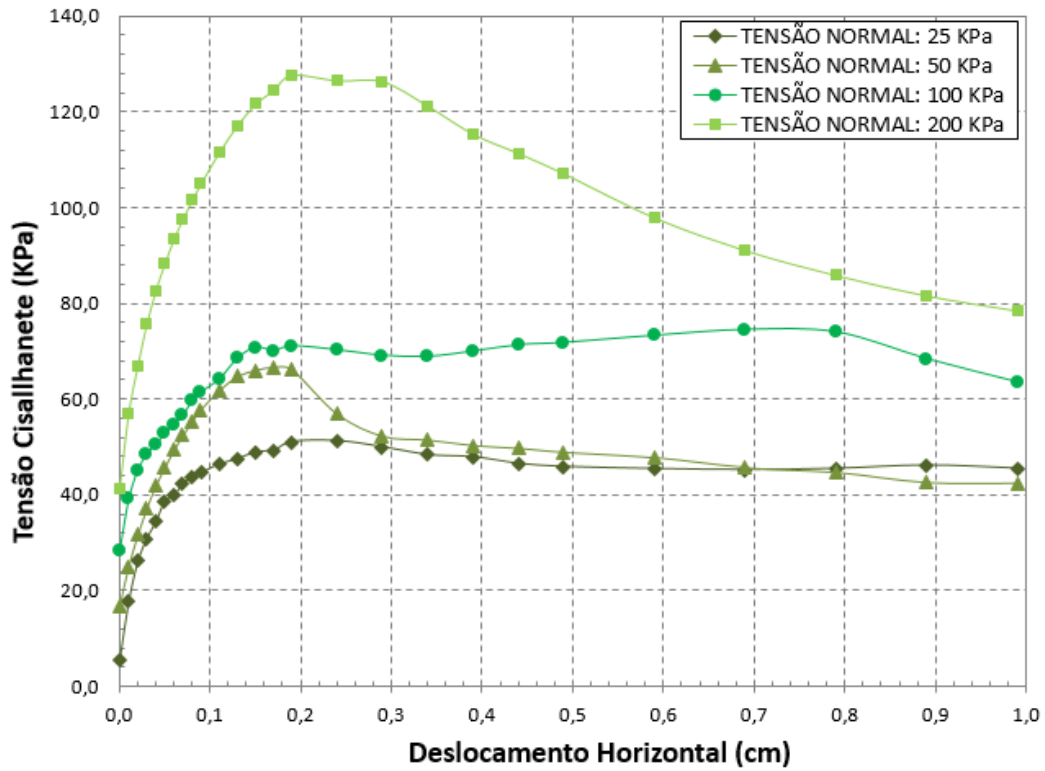


Figura 5.9. Curva de deformação horizontal por tensão de cisalhamento – SRJF(2018) em Condição Inundada.

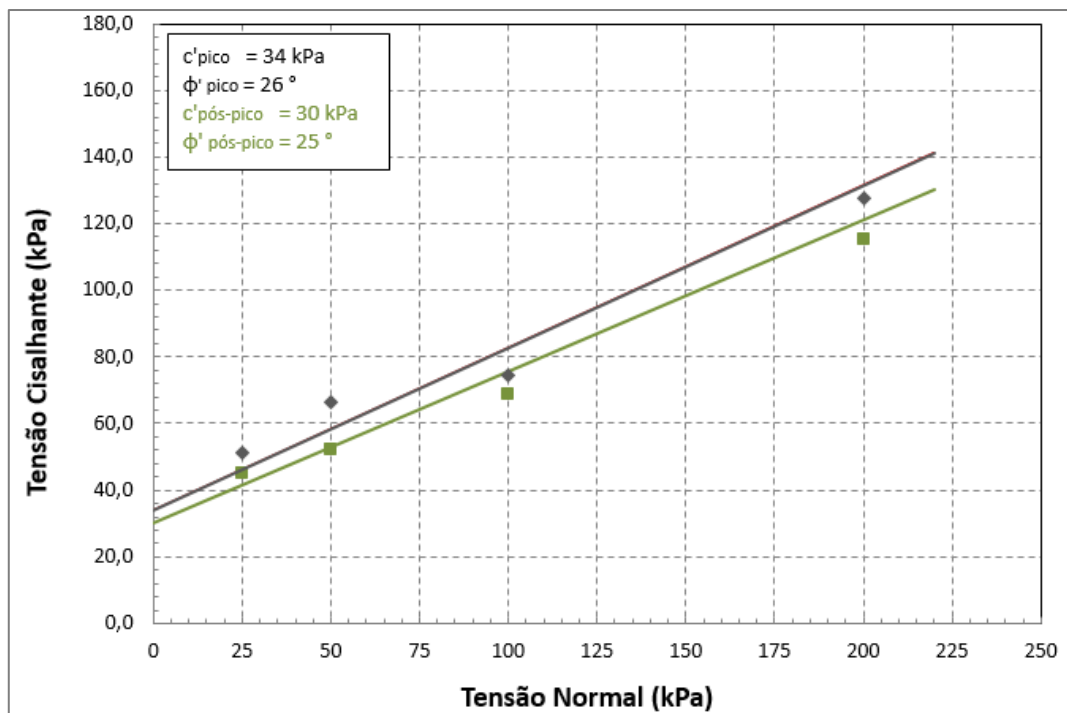


Figura 5.10. Envoltória de resistência – SRJF(2018) em Condição Inundada.

Diferentemente do solo residual jovem ensaiado em condição natural, observa-se na Figura 5.9 um comportamento de pico menos pronunciado em baixas tensões.

Um resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios é apresentado na Tabela 5.5 para o solo residual maduro de filito (SRMF) e solo residual jovem de filito (SRJF), nas respectivas condições de ensaio e para envoltórias de pico e pós-pico.

Tabela 5.5. Parâmetros obtidos no ensaio de Cisalhamento Direto.

Material	Ensaio Inundado				Ensaio Natural			
	Pico		Pós-Pico		Pico		Pós-Pico	
	c' (kPa)	$\phi$ (°)	c' (kPa)	$\phi$ (°)	c' (kPa)	$\phi$ (°)	c' (kPa)	$\phi$ (°)
SRMF (2018)	28	27	22	26	36	32	24	32
SRJF (2018)	34	26	30	25	60	27	45	24

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto mostram, a princípio, altos valores de coesão para um solo de características silto-arenosas. Entretanto, conforme mencionado, tal fato pode estar associado proximidade do solo com a reserva de minério de ferro, cuja influência tende a aumentar a coesão por cimentação.

De acordo com Futai (2012), o efeito da cimentação por depósitos de óxidos de ferro é acentuado em horizontes superficiais, acima do lençol freático, o que altera a estrutura do solo e influencia propriedades geotécnicas, apesar da forte dependência da qualidade da amostragem.

Vale ressaltar que o possível incremento de resistência gerado por cimentação ocorre em pequenas deformações, neste caso, na ordem de até 4%, em geral. Entretanto, são observadas grandes deformações acumuladas ao longo do tempo no talude norte e na pista de rolamento da rodovia e os valores de resistência ao cisalhamento obtidos em laboratório que melhor tendem a representar as movimentações de campo, são aqueles cuja tensão de desvio estabelecem um patamar de resistência residual, em grandes deformações.

Para tais casos, de acordo com Duncan (2014), é recomendável a avaliação da resistência residual por meio do ensaio *ring shear*, uma vez que a amostra pode ser submetida a deslocamentos ilimitados através da rotação contínua do anel. O ensaio de cisalhamento por rotação de um anel, *ring shear*, é normatizado pela ASTM D7608-18.

Os resultados mostram que há uma redução nos parâmetros de resistência com a inundação dos corpos de prova, que tem relação com a perda de coesão conferida por sucção quando da imersão das amostras em água.

Silva (2006) realizou ensaios de cisalhamento direto em filitos dolomíticos da Mina do Pico com características físicas semelhantes aos apresentados nesse trabalho e obteve valores de ângulo de atrito entre  $28^\circ$  e  $29^\circ$  e coesão variando de 24 kPa a 38 kPa, para a condição inundada, e para a condição natural, valores de ângulo de atrito entre  $13^\circ$  e  $32^\circ$  e coesão variando de 83 kPa a 280 kPa. Tais resultados evidenciam uma similaridade com o material estudado neste trabalho. Deve-se levar em conta que os valores de coesão obtidos em ensaios de cisalhamento direto em condição natural experimentam de uma variação que está relacionada com as condições de estado do material no momento da amostragem como, por exemplo, o teor de umidade.

#### 5.1.4 - Ensaio de Compressão Triaxial

O ensaio de compressão triaxial tipo CID foi realizado com o solo residual jovem de filito coletado em 2020 (SRJF 2020). A Figura 5.11 apresenta as trajetórias de tensões efetivas obtidas no ensaio de acordo com as respectivas tensões de confinamento praticadas e a Figura 5.12 apresenta a relação deformação axial versus tensão de desvio no carregamento.

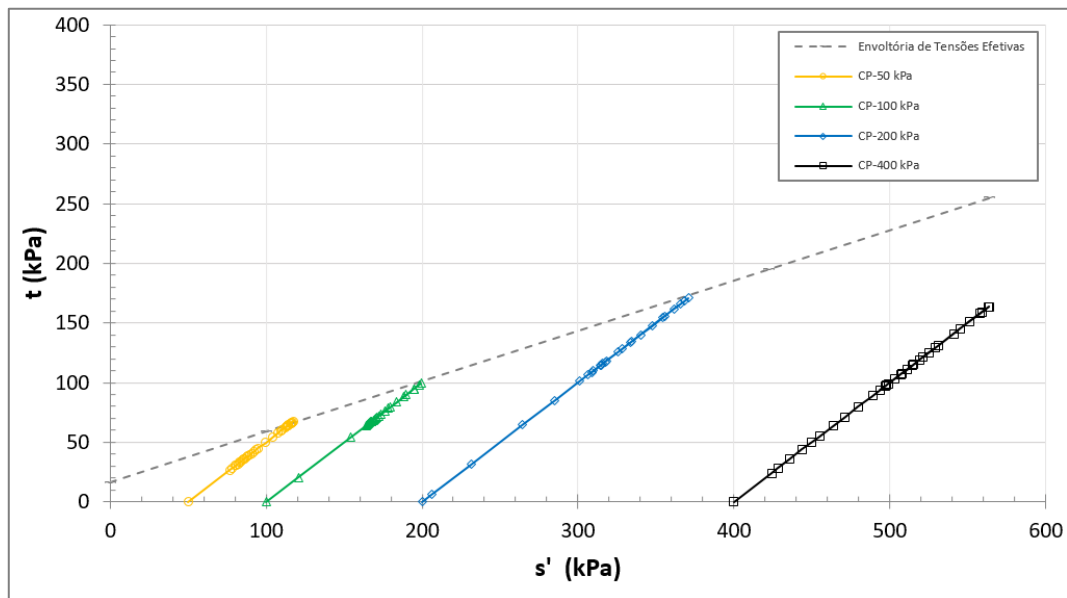


Figura 5.11 – Trajetória de tensões efetivas do ensaio de compressão triaxial.

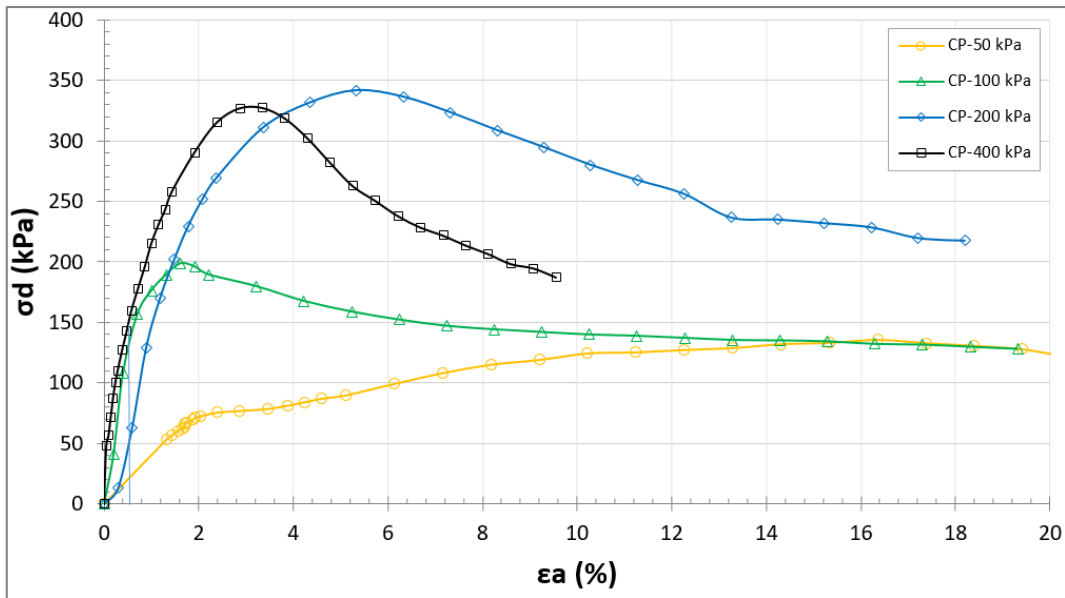


Figura 5.12 – Relação deformação axial versus tensão de desvio no carregamento.

A Figura 5.13 apresenta a envoltória de resistência obtida no ensaio de compressão triaxial drenado.

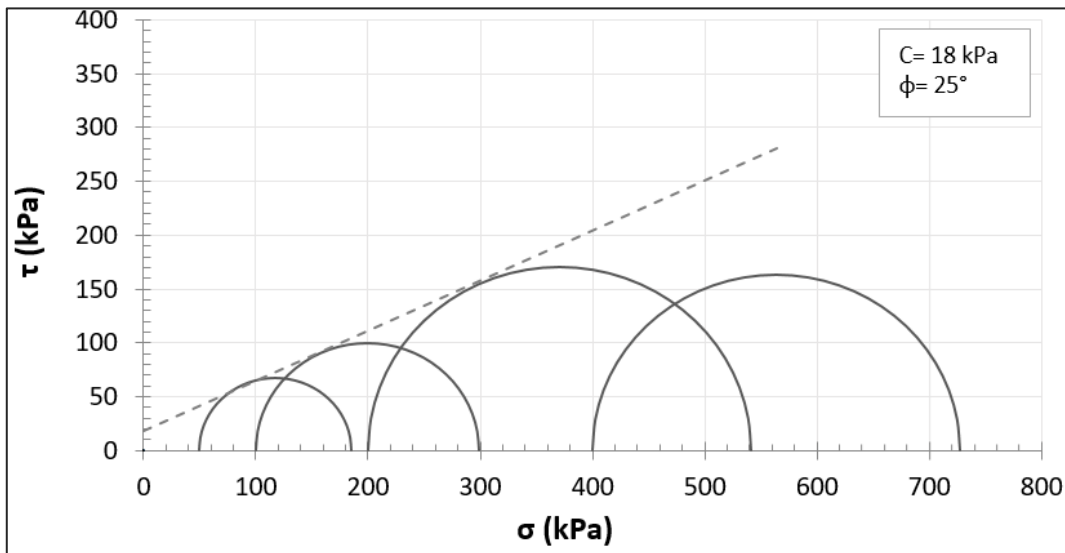


Figura 5.13 – Envoltória e parâmetros de resistência obtidos no ensaio de compressão triaxial.

É possível observar que o corpo de prova ensaiado com maior tensão confinante na consolidação (400 kPa) apresentou redução na resistência ao cisalhamento em relação ao corpo de prova consolidado a 200 kPa, evidenciado pela disparidade gráfica observada tanto nas envoltórias, quanto no gráfico de tensão de desvio. Em função desse resultado, o último corpo de prova não foi considerado na definição da envoltória e dos parâmetros.

Tal fato reforça o quanto a resistência ao cisalhamento em solos residuais jovens de filito da região de estudo depende das estruturas planares (foliações) e como as características de formação geológica influenciam mecanicamente o comportamento. De fato, outros estudos

com filito do Quadrilátero Ferrífero mostram que o aumento do confinamento não necessariamente retorna maiores valores de resistência, quando a ruptura ocorre em superfícies específicas. Santiago (2008) verificou, realizando ensaios oedométricos e de compressão triaxial CIU em amostras de filito, que o solo com maior tensão de pré-adensamento não necessariamente possuiu maiores parâmetros de resistência, de modo que não houve uma relação direta entre a tensão de pré-adensamento e a resistência do solo.

Um resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios é apresentado na Tabela 5.5 para o solo residual jovem de filito (SRJF 2020) submetido ao ensaio de compressão triaxial.

Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos no ensaio de Compressão Triaxial – CID

Material	Ensaio Inundado	
	c (kPa)	$\phi$ (°)
SRJF (2020)	18	25

Na Figura 5.14 são apresentados os corpos de prova após a aplicação da tensão de desvio na última fase do ensaio. É possível perceber que as superfícies de ruptura desenvolvidas nos ensaios têm íntima relação com as feições estruturais do solo, especificamente os planos de foliação. No caso do corpo de prova consolidado a 400 kPa de pressão de confinamento, percebe-se uma diferença no padrão da superfície de cisalhamento em relação aos demais, uma vez que a mesma ocorre na porção inferior do corpo de prova, reforçando as observações de que a ruptura ocorre em planos específicos.

Por ter, em essência, textura siltosa, o filito possui planos de foliação e descontinuidades lisos. A Figura 5.15 mostra um aspecto típico do solo residual de filito encontrado na área de estudo: os planos de fraqueza nos quais a ruptura ocorre são, em geral, compostos por uma fina camada de textura sedosa, muito escorregadia.

Devido a estas características, para grandes deslocamentos na direção do cisalhamento ter-se-ia mobilizado a resistência residual. Em solos com alto teor de finos (argilas e siltes), as partículas tendem a se alinhar na direção do movimento à medida que o solo sofre deslocamento relativo, sendo criada uma superfície espelhada chamada de superfície *slickensided*. Tal condição é mais evidente nas partículas lamelares das argilas.

Parâmetros de resistência residual podem ser determinados por meio de retroanálises ou então por ensaios especiais, como por exemplo o ring shear. Estudos de retroanálise realizados por Silva *et al.* (2018) em um colúvio composto por filito, se movimentando por rastejo, próximo ao local de estudo (km 590+175), indicaram coesão nula e ângulo de atrito de 25°.

Entretanto, os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados em vários corpos de prova com foliações em diferentes direções, indicaram variação do intercepto coesivo, sendo 15 kPa um valor médio. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e triaxial revelaram que o solo residual jovem de filito apresenta um ângulo de atrito baixo, variando entre 24° e 27°, se aproximando dos valores observados na literatura. Já o intercepto coesivo apresentou maiores valores. Entretanto, a coesão pode ser praticamente anulada quando se tem mobilização de uma superfície de cisalhamento.



Figura 5.14 – Corpos de prova após ruptura no ensaio de compressão triaxial.



Figura 5.15 – Superfície de ruptura do corpo de prova.



## 5.2 - Modelo geológico

As campanhas de investigação geológico geotécnicas realizadas nos taludes norte e sul do km 578+500 da rodovia BR-040 cobrem apenas uma região localizada do problema em relação a todo o domínio. As sondagens e ensaios realizados apenas na rodovia não produzem informação direta sobre a geologia e os aspectos geotécnicos dos materiais encontrados na região da cava de mineração.

Com a ausência de investigações geotécnicas na área da cava, foram utilizados estudos que apresentam seções geológicas da região para a definição de um modelo geológico simplificado que suporte os estudos, tal qual apresentado por Endo *et al.* (2019) na Figura 2.4.

Gomes (2005) apresenta, na Figura 5.16, um mapa estrutural simplificado da região Centro-Sul da Sinclinal Moeda com a posição dos perfis geológicos estruturais e seções da área em uma visada Sul-Norte, onde destaca-se, em preto, a formação ferrífera do Supergrupo Minas representando uma camada guia. O local de estudo encontra-se, destacado em vermelho, entre os perfis AA' e BB'.

O mapa estrutural simplificado (Figura 5.16) mostra a região Centro-Sul da Sinclinal da Moeda. O mapa principal apresenta coordenadas UTM (7760484,92 no topo e 604398,85 na base esquerda). Ele ilustra estruturas tectônicas como zonas de cisalhamento transcorrente, cavalgamento e normal, bem como acamamentos sedimentares (normais e invertidos) e foliações metamórficas. Linhas de perfil geológico AA', BB', CC' e DD' são traçadas através da área. Uma formação ferrífera (Supergrupo Minas) é destacada em preto. Um local de estudo é marcado com um símbolo vermelho entre os perfis AA' e BB'. Uma legenda detalha os símbolos utilizados para as diferentes estruturas geológicas. Abaixo do mapa principal, duas seções geológico-estruturais (A-A' e B-B') são apresentadas, mostrando a disposição das camadas geológicas e as estruturas tectônicas em uma visada Sul-Norte.

LEGENDA	
	Zona Cisalhamento Transcorrente
	Zona Cisalhamento Cavalgamento
	Zona Cisalhamento Normal
	Acamamento sedimentar
	Acamamento sedimentar invertido
	Foliação metamórfica
	Contato

Figura 5.16. Mapa estrutural simplificado e seções geológico-estruturais da região Centro-Sul da Sinclinal da Moeda, com indicação (em vermelho) do local de estudo (adaptado – Gomes, 2015).

A partir da análise das campanhas de investigação realizadas, das seções geológicas apresentadas por Endo *et al.* (2019) e Gomes (2015) e das imagens de satélite obtidas (Figura

65

5.17), desenvolveu-se a interpretação e estabelecimento de um modelo geológico simplificado, apresentado na Figura 5.18. A definição de um possível nível freático para o modelo geológico foi fundamentada na imagem aérea sobre a topografia e hidrografia (Figura 5.17). Nesta é possível observar cursos de água que contribuem para o entendimento de que, antes das intervenções realizadas na região, havia um fluxo do topo para a base da Serra da Moeda em cursos de água passando pela região de estudo.

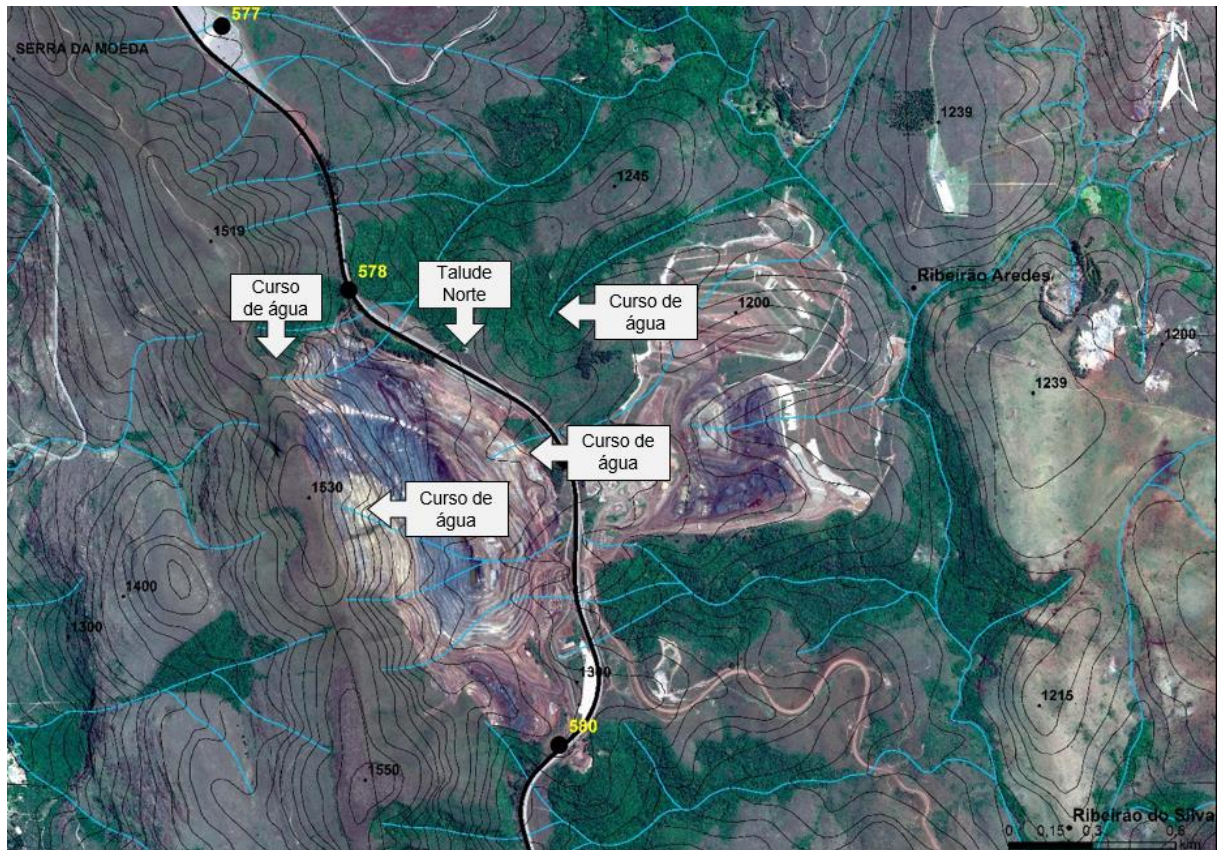


Figura 5.17. Imagem aérea sobre topografia e hidrografia para auxiliar na definição do lençol freático.

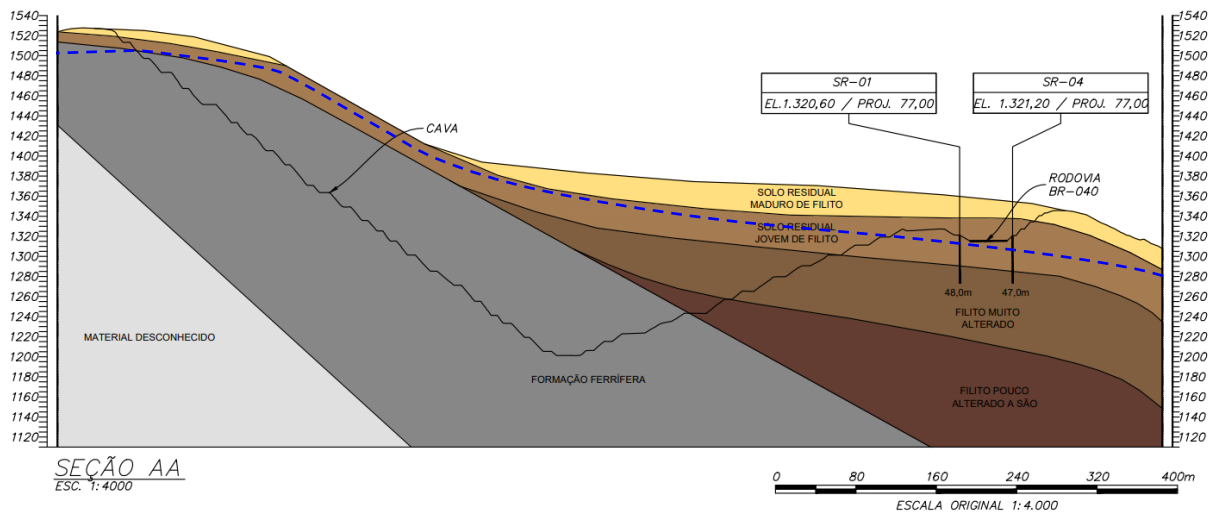


Figura 5.18. Modelo geológico interpretado a partir da campanha investigação geotécnica. (os taludes rodoviários da direita e da esquerda são, respectivamente, os taludes norte e sul).

O modelo considera uma camada de solo residual maduro de filito, encontrado na porção superior do talude norte pelas amostragens realizadas no ano de 2018. A camada de solo residual jovem de filito foi encontrada nas amostragens realizadas nos anos de 2018 e 2020 e nas sondagens realizadas nos taludes norte e sul. O filito muito alterado também foi verificado nos furos de sondagem executados para implantação da instrumentação, no ano de 2018.

A seção do modelo geológico também proporciona uma visualização do expressivo volume de material removido pelas escavações, resultando em importante alívio de tensão. Em particular, na região é notada intensa ação tectônica, como pode ser visualizado na face do talude da Pista Sul (Figura 2.9), em que ocorrem dobras anticlinais e sinclinais muito próximas uma da outra. De acordo com Woodward (1999), a formação de dobras tem relação com a distribuição de tensões em um maciço, uma vez que deformações ocorridas por dobramento (ou vice-versa) provocam uma mudança na direção das tensões principais atuantes. Nestas condições de formação dos maciços rochosos que originam os solos locais, pode-se ter tensões horizontais residuais com valores maiores que a própria tensão vertical.

Quanto aos demais materiais apontados no modelo geológico, o filito pouco alterado a são foi inserido no modelo geológico tendo como base o perfil de intemperismo já verificado nas investigações que deram origem às camadas sobrejacentes, e pelo fato de o filito ser uma rocha típica das formações Cauê e Gandarela, que ocorrem nessa região, conforme apresentado no Capítulo 2.

O material denominado formação ferrífera advém da seção geológica apresentada por Endo *et al.* (2019) (Figura 2.4) e do mapa estrutural apresentado por Gomes (2005) (Figura 5.16), além das observações de campo e imagens de satélite que mostram como o corpo mineral

se desenvolve na projeção da cava. Os materiais existentes à montante da formação ferrífera são desconhecidos.

### 5.3 - Instrumentação e Investigações de Campo

Nesta seção são apresentados resultados e discussões do monitoramento realizado. Foram disponibilizados dados de monitoramento do período compreendido entre maio de 2018, quando da implantação dos instrumentos, e maio de 2019. A Figura 5.19 apresenta a disposição dos instrumentos em planta na área de estudo. Nela foram inseridos vetores que representam a magnitude, direção e sentido dos deslocamentos horizontais máximos medidos pelos inclinômetros no período de monitoramento acessado.

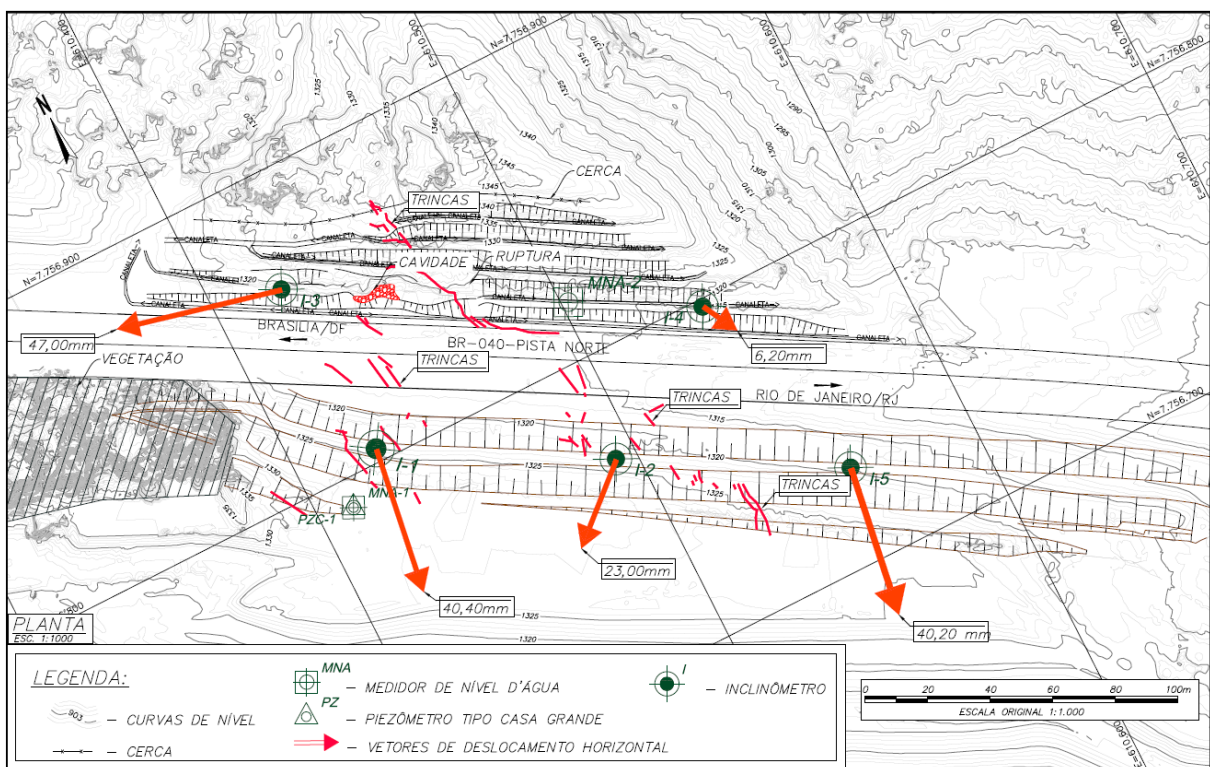


Figura 5.19. Disposição dos instrumentos em planta com vetores de deslocamento horizontal dos inclinômetros.

O fato dos deslocamentos do talude sul estarem direcionados em sentido oposto ao da pista da rodovia, ou seja, para dentro do talude, mostra que a instrumentação registra um fenômeno que não se restringe apenas à movimentação dos taludes rodoviários. Comparando-se as trinças com as direções dos deslocamentos registradas na inclinometria nota-se que não há um padrão. Os deslocamentos dos inclinômetros (I1, I4 e I5) apresentam certo paralelismo com a direção das trinças. Já os deslocamentos dos inclinômetros I2 e I3 são perpendiculares às trinças, sendo esta condição mais compreensiva.

Apesar dos resultados da inclinometria apontar para diferentes direções, os deslocamentos horizontais, em linhas gerais, são direcionados para a cava(Figura 5.19), possivelmente devido ao alívio de tensões gerado pelas escavações da mina a céu aberto. Superfícies de deslizamento podem ser identificadas em um perfil de deslocamentos em profundidade, quando há uma inflexão acentuada no perfil. A Figura 5.20 e a Figura 5.21 que mostram, em seção, os deslocamentos horizontais medidos pelos inclinômetros, não evidenciam nenhuma superfície de deslizamento explícita nas verticais inclinométricas apresentadas.

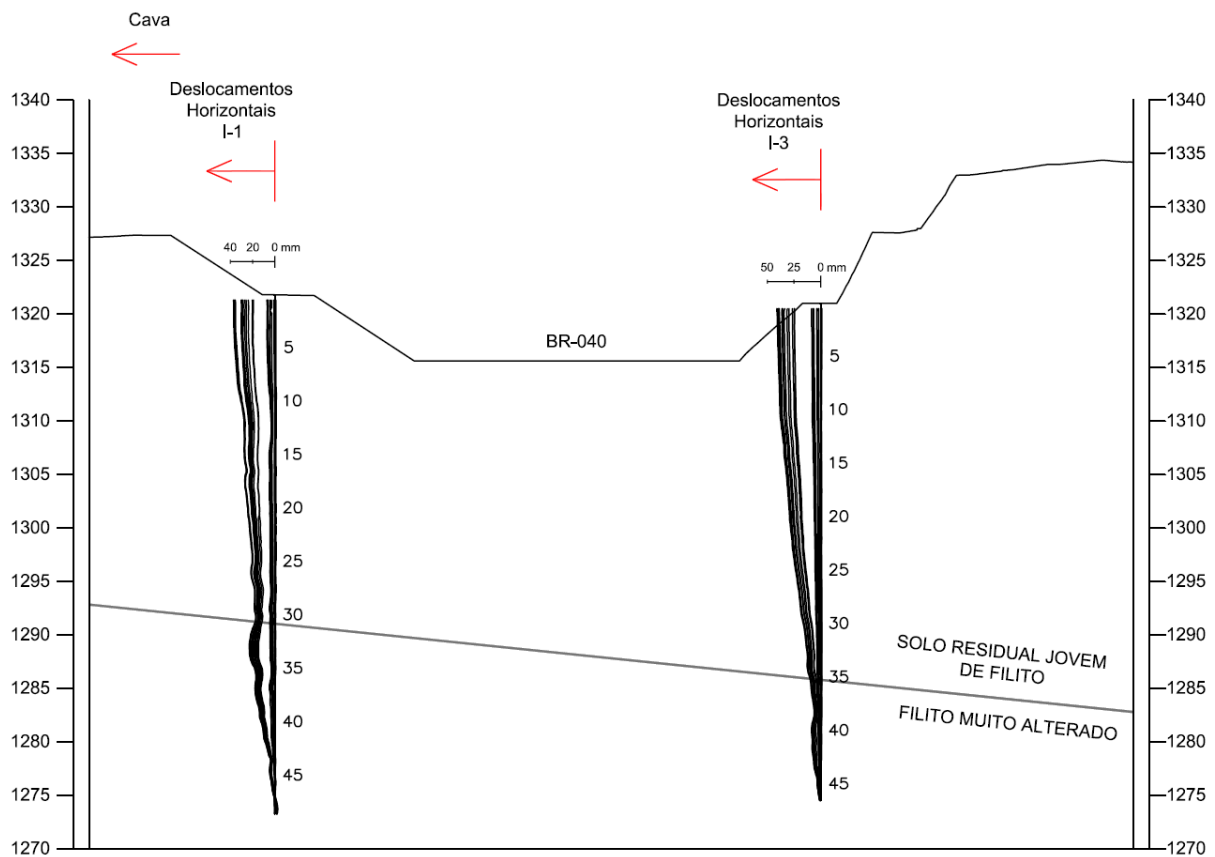


Figura 5.20. Verticais inclinométricas dos instrumentos I-1 e I-3.

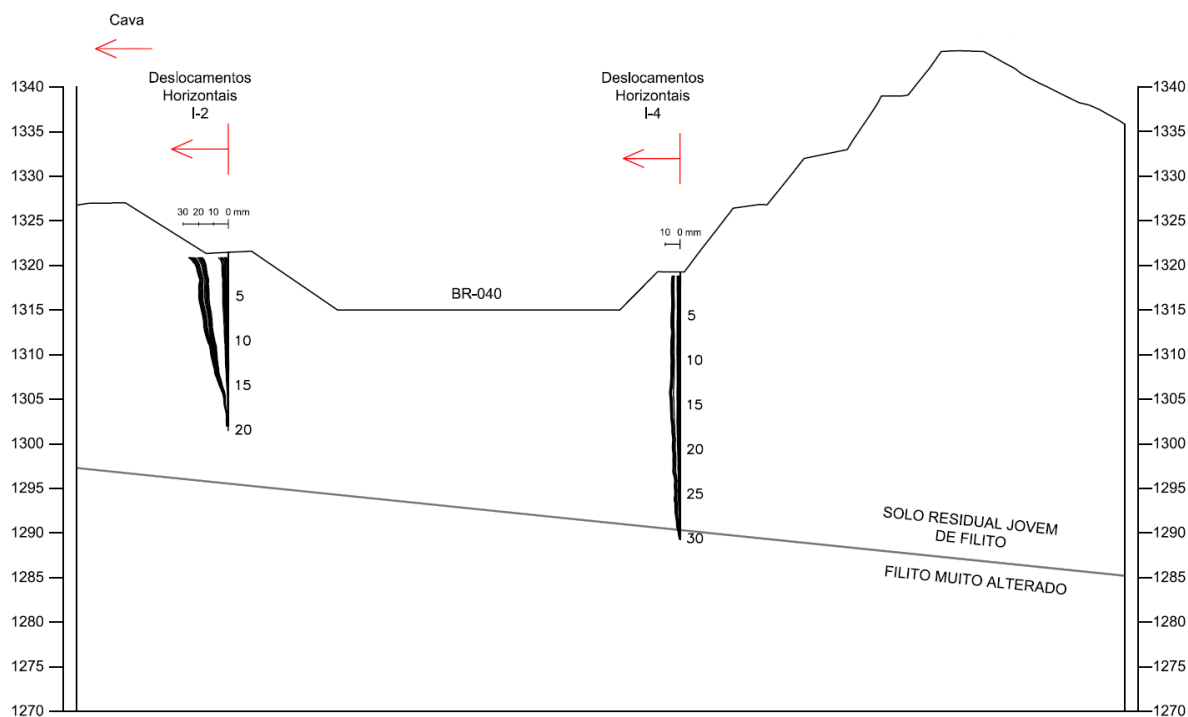


Figura 5.21. Verticais inclinométricas dos instrumentos I-2 e I-4.

De acordo com Dunicliff (1988), o objetivo das medidas de deslocamentos aferidas pelos inclinômetros é, normalmente, a localização de alguma zona de deslocamento e a avaliação de sua progressão ao longo do tempo. Tais zonas muitas vezes ocorrem em pequenas espessuras, em profundidade, e o acúmulo de deslocamento horizontal medido pode ser utilizado para representar a magnitude e a velocidade em que o movimento ocorre.

Ainda considerando a influência do alívio de tensões gerado pela escavação da cava de mineração, a inobservância de inflexão nos perfis de deslocamento em profundidade dos inclinômetros deixa possibilidades a serem investigadas: i) possíveis superfícies de ruptura poderiam estar se desenvolvendo abaixo da cota de instalação dos inclinômetros; ii) a magnitude dos deslocamentos verificados ainda não foi capaz mobilizar uma superfície de ruptura que intercepte os instrumentos.

A fim de verificar a possibilidade de possíveis superfícies de rupturas se desenvolverem abaixo da instrumentação, realizou-se uma análise de estabilidade em um modelo simplificado. Dada a complexidade do modelo geológico e o fato de se dispor de parâmetros de resistência apenas de solo residual jovem e solo residual maduro de filito, onde esse último comporia uma fração pouco relevante da seção de análise, optou-se pela utilização de uma seção homogênea.

Tomando o perfil de intemperismo do modelo geológico apresentado na Figura 5.18 como referência, o solo residual jovem de filito representa o material menos confinado, mais intemperizado e, conseqüentemente, tende a apresentar os menores parâmetros de resistência

ao cisalhamento dentre os demais materiais. Foi adotado o ângulo de atrito do solo residual jovem de filito encontrado no ensaio de compressão triaxial drenado ( $25^\circ$ ). Considerando que as movimentações verificadas pela monitoração e as anteriores à instalação da instrumentação tenham mobilizado a resistência residual do filito, adotou-se uma coesão nula, conforme encontrado por Silva *et al.* (2018). Tal consideração também representa uma condição mais crítica em termos de parâmetros de resistência.

A Figura 5.22 apresenta o modelo geológico-geotécnico simplificado utilizado para a verificação e as superfícies de ruptura obtidas na análise de estabilidade. O nível d'água encontra-se no fundo da cava, como mostram as imagens de satélite apresentadas no Capítulo 3, e não intercepta os inclinômetros, uma vez que seus respectivos furos de sondagem se apresentaram secos. Comparando-se a seção geológica (Figura 5.18) com o modelo geológico-geotécnico utilizado para análise de estabilidade, verifica-se o rebaixamento do lençol freático e a inversão do fluxo de água subterrânea. A análise apresentada na Figura 5.22 não tem por objetivo quantificar o estado de segurança geotécnica do maciço por meio do fator de segurança, uma vez que não se dispõe de informações de cunho geológico e geotécnico suficientes para tal.

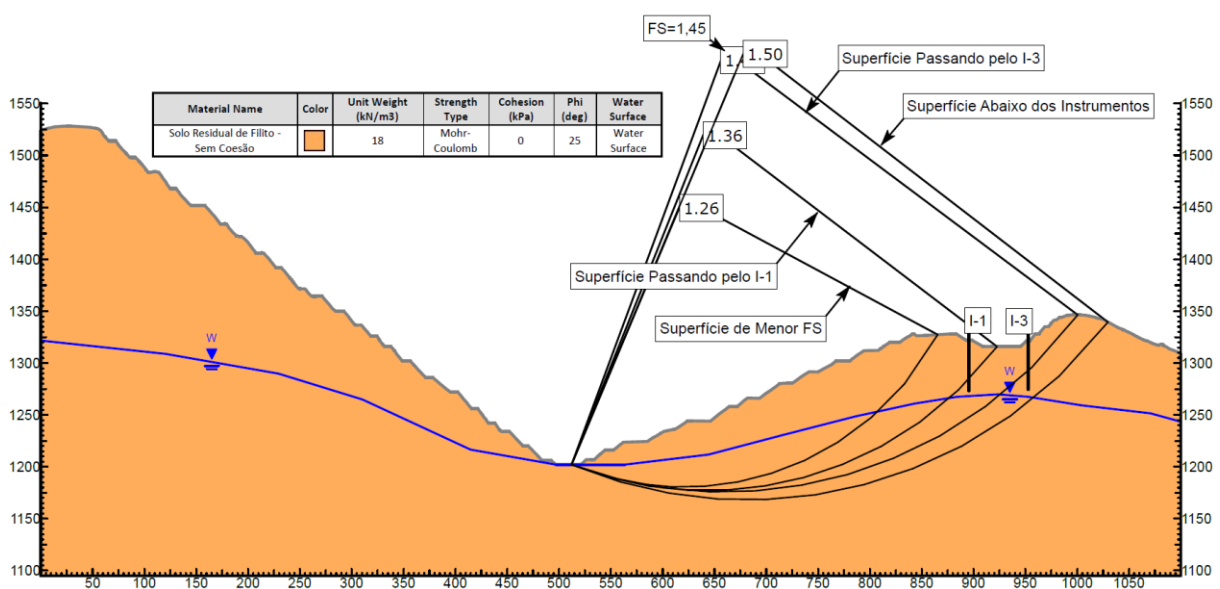


Figura 5.22. Análise de estabilidade do maciço homogêneo.

A Figura 5.22 mostra que, para as condições geométricas simuladas, superfícies de ruptura que interceptam os inclinômetros tenderiam a se desenvolver antes de uma possível superfície de ruptura mais profunda, posicionada abaixo dos instrumentos. Desse modo, pode ser questionável uma superfície de deslizamento que contenha a rodovia se desenvolva sem que intercepte os inclinômetros instalados.

Com relação à segunda possibilidade levantada, que considera que a magnitude dos deslocamentos verificados pode não ter mobilizado uma superfície de deslizamento, entende-se que o modelo de engenharia estudado pode ser representado por um ensaio triaxial de compressão vertical por descarregamento, descrito graficamente por Lambe e Whitman (1969), cuja trajetória de tensões é marcada pela redução da tensão horizontal e se desenvolve de forma ascendente e para a esquerda.

A quantificação do desconfinamento e, conseqüentemente, dos deslocamentos necessários para mobilizar uma superfície de deslizamento em direção à cava seria possível por meio de modelagem numérica e com a realização do ensaio de compressão triaxial por descarregamento, a fim de se obter parâmetros de resistência e deformabilidade que melhor representem a trajetória de tensões que a escavação impõe em escala real, além de uma vasta campanha de investigação geológico geotécnica que cubra todo o domínio da área estudada.

Para o período de monitoração dos inclinômetros foi observado um deslocamento acumulado de até 43 mm, registrado pelo inclinômetro I-3, a 2,0 m de profundidade a partir do topo do tubo do inclinômetro. A Figura 5.23 apresenta os deslocamentos máximos observados em cada inclinômetro ao longo do período de monitoração. Observa-se que a movimentação tem velocidade constante, cuja precipitação não tem impacto significativo, sendo que a velocidade média de deslocamento é da ordem de 0,05 m/ano, para o período analisado. De acordo com a classificação de Varnes (1978), apresentada na Tabela 5.7, trata-se de uma movimentação extremamente lenta, característica de movimentos de rastejo.

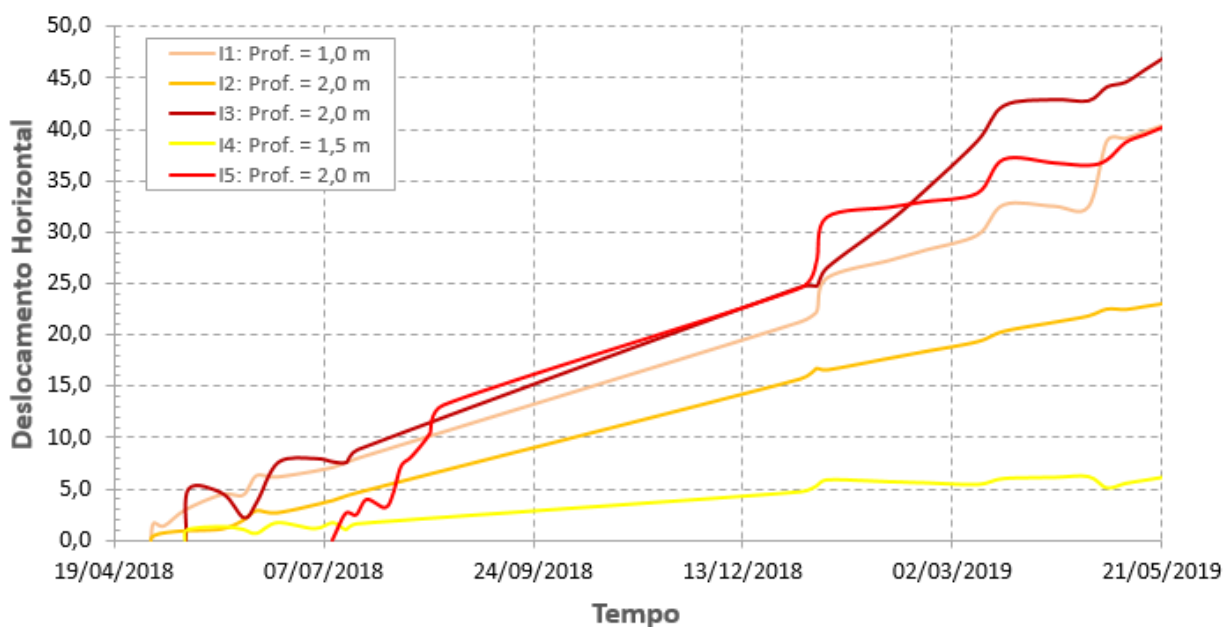


Figura 5.23. Evolução dos deslocamentos horizontais máximos verificados nos inclinômetros.



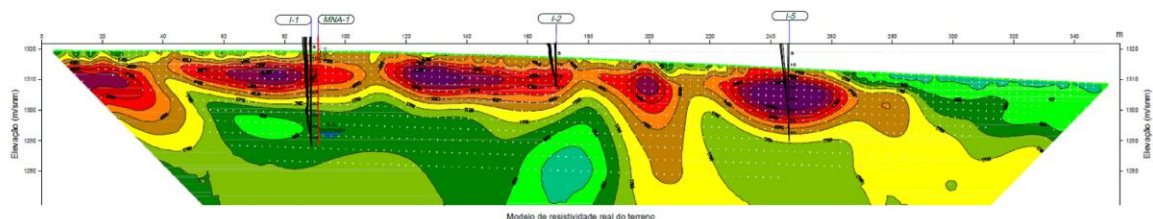
Tabela 5.7. Classificação quanto à velocidade do movimento de massa (Varnes, 1978).

Classificação	Velocidade
Extremamente Rápido	>3 m/s
Muito Rápido	0,3 m/min a 3 m/s
Rápido	1,5 m/dia a 0,3 m/min
Moderado	1,5 m/mês a 1,6 m/dia
Lento	1,5 m/ano a 1,6 m/mês
Muito Lento	0,06 m/ano a 1,6 m/ano
Extremamente Lento	< 0,06 m/ano

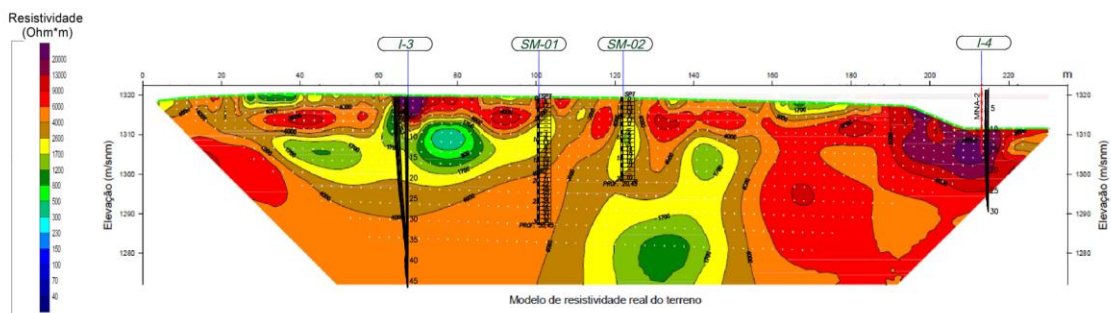
#### A classificação de Varnes

A fim de relacionar o histórico de monitoramento dos inclinômetros e sondagens com as características dos materiais do maciço, elaboraram-se seções geofísicas com os instrumentos e furos de sondagem (com índice  $N_{SPT}$ ) locados, conforme mostra a Figura 5.24.

De acordo com Cardoso (2016), o uso da resistividade para interpretação da ocorrência de cavidades é direto. Quando da ocorrência de espaços (cavidades) não preenchidas por água e sedimento, os perfis geoeletricos apontam alto resistivo em elevado contraste com a resistividade dos materiais circundantes. Dentro da cavidade a condutividade elétrica tende a zero e a resistividade, que é inversamente proporcional, consequentemente, tenderá a altos valores. Dessa forma, é possível diagnosticar a ocorrência de cavidades e inferir preenchimento ou fluxos aquosos na mesma.



a) Perfil geoeletrico L-2 – Talude Sul.



b) Perfil geoeletrico L-4 – Talude Norte.

Figura 5.24. Seção geofísica L-2 com as verticais inclinométricas e sondagens.





Figura 5.26. Cavidade verificada no afloramento rochoso do talude norte.

A Figura 5.27 apresenta detalhes do interior da cavidade mostrada na Figura 5.26, cuja investigação foi realizada por meio de uma filmagem teleguiada.



Figura 5.27. Detalhe do interior da cavidade.

Na Figura 5.28 são apresentados valores típicos de resistividade para diferentes rochas, canga e cavidades, consolidados por Cardoso (2016). É possível notar que os valores encontrados na área de estudo ( $2 \times 10^4 \Omega m$ ) são típicos de cavidades em rochas. De acordo com Cardoso (2016), a aplicação de métodos elétricos como o EL e eletromagnéticos como o GPR (Ground Penetrating Radar) produz resultados concretos na investigação de cavidades. Tais

métodos conduzem a um nível satisfatório de detalhamento geométrico quando utilizadas técnicas de interpolação e inversão matemática de seções geoeletricas do terreno investigado.

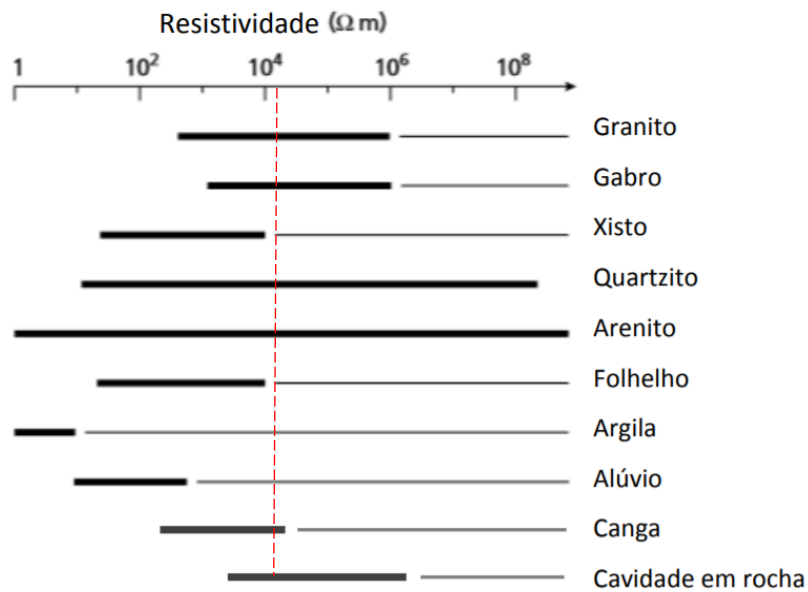


Figura 5.28. Intervalo aproximado de valores de resistividade encontrados em rochas, canga e cavidades em rocha. (Cardoso, 2016).

Os registros da instrumentação também mostram que o nível d'água verificado no instrumento MNA-1 (Figura 5.24a) foi precedido de um rebaixamento da ordem de 10,0 m entre maio de 2018 e maio de 2019. A Figura 5.29 apresenta a variação do nível d'água medida no instrumento MNA-1 e a pluviometria no mesmo período de monitoramento. Observa-se que o rebaixamento do lençol freático não tem relação com o registro da precipitação. Mesmo com o aumento das chuvas em 2019, foi registrado o rebaixamento do lençol freático. Isso soma e fundamenta a concepção do modelo geológico-geotécnico, no qual, além do rebaixamento, foi considerado a inversão do fluxo d'água, em função do avanço da profundidade da cava de mineração. A particularidade de presença de dobras também pode ser levada em consideração em relação ao fluxo de água subterrânea. Dobras sinclinais presentes no filito podem constituir caminhos condutores preferenciais da água subterrânea.

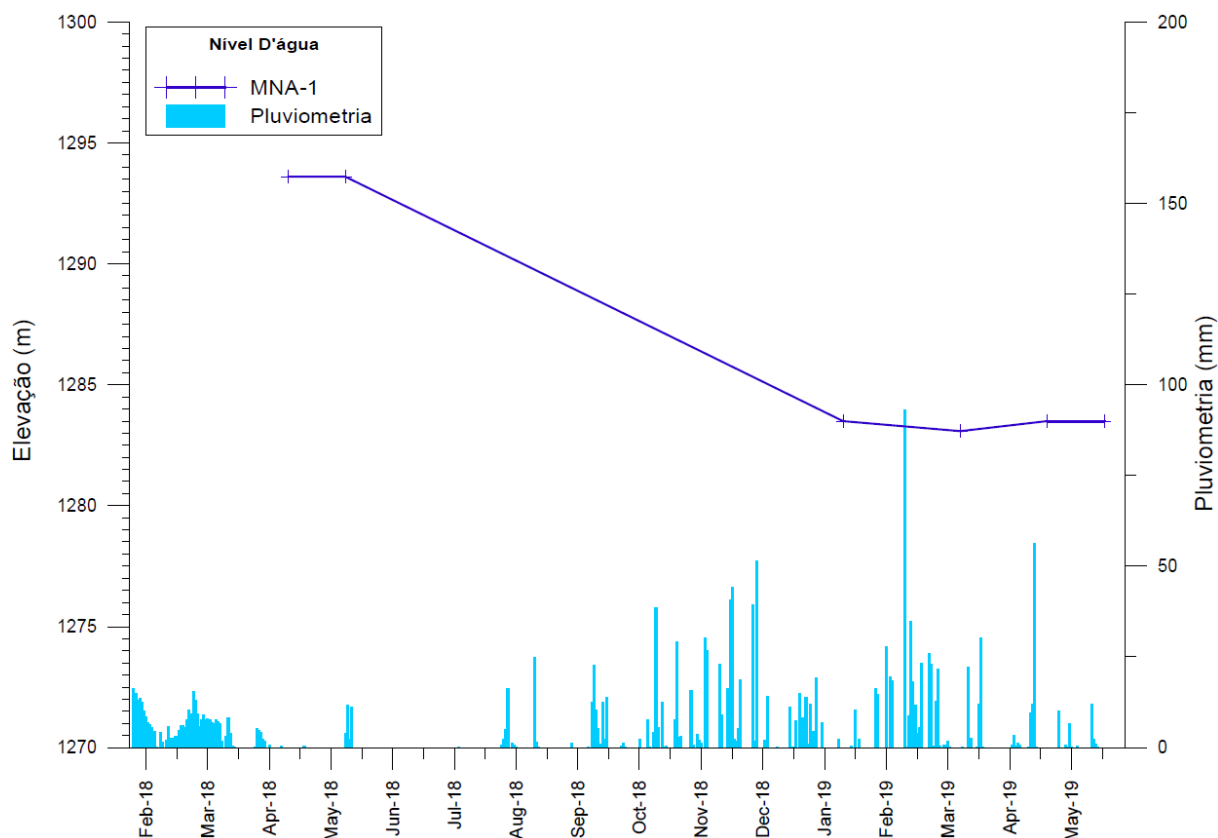


Figura 5.29. Variação do nível d'água medida no instrumento MNA-1 e pluviosidade correspondente no período de monitoramento.

Não se dispõe de registros anteriores e posteriores ao período analisado, entretanto, conforme apresentado no Capítulo 3 (Figura 3.6), entre os anos de 2016 e 2020 há um avanço significativo da cava em direção ao talude de corte da rodovia. É razoável que tal avanço tenha influenciado na variação do nível d'água observada no MNA-1. O instrumento PZC-1 não registrou nível piezométrico no período analisado.

A presença de cavidade aflorando no pé do talude e outras possíveis, como sugerido pela geofísica, associada ao rebaixamento do lençol freático poderia ser uma condição para a ocorrência de abatimentos, principalmente no pavimento. A água, por possuir características de incompressibilidade diante de uma vasta gama de tensões, incluindo as geralmente praticadas em obras geotécnicas, tende a conter deformações por carregamento vertical nas cavidades, ao mesmo tempo em que atua como agente intempérico, ampliando-as. Assim, a presença de água na cavidade seria benéfica. Portanto, o possível esvaziamento das cavidades, causado pelo rebaixamento do lençol freático, tenderia a criar um vazio, provocando as deformações, que geram os abatimento e trincas observadas no pavimento (Figura 5.30).

Com relação à ocorrência de detonações na região, deve-se ressaltar que as trincas e planos mobilizados tendem a evoluir, uma vez que um percentual da energia de detonação é transformado em vibrações no maciço. Entretanto, tais ocorrências não foram monitoradas.



Figura 5.30. Deformações trincas no pavimento na direção do afloramento rochoso com presença de cavidade.

### 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O presente Capítulo apresenta conclusões obtidas por esta pesquisa, a fim de consolidar o conhecimento desenvolvido. Também são apresentadas sugestões para pesquisas futuras a fim de complementar o entendimento até aqui desenvolvido.

#### 6.1 Conclusões

O solo residual de filito do maciço estudado foi caracterizado como silto-arenoso, com baixa plasticidade. A permeabilidade dos solos residuais maduro e jovem de filito, tiveram comportamentos distintos. Tanto o solo residual maduro de filito quanto o solo residual jovem de filito, independentemente da direção da foliação em relação ao fluxo de água do ensaio, apresentaram pouca variação do coeficiente de permeabilidade, mostrando praticamente nenhuma anisotropia de fluxo. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial mostraram que o solo residual de filito apresenta um ângulo de atrito baixo, variando entre 24° e 27°, em geral, se aproximando dos valores encontrados na literatura. Os resultados também mostram que, para a condição natural, os solos residuais jovens apresentam valores de ângulo de atrito menor que os encontrados para os solos residuais maduros. Já o intercepto coesivo apresentou maiores valores, podendo estar relacionado à cimentação, dada a proximidade da área de estudo com depósitos de minério de ferro. As particularidades geológicas e geotécnicas do filito o constituem um agente predisponente, no âmbito do complexo geológico, e se manifestam como causa interna, uma vez que não alteram características geométricas do maciço.

As estruturas reliquias presentes no solo residual jovem de filito, associadas às dobras, especialmente as sinclinais e isoclinais, se configuram como agentes predisponentes do complexo geológico capazes de concentrar tensões e fluxo de água subterrânea. Se mergulharem em direção à face do talude da cava, essas estruturas dobradas tendem a favorecer o movimento de massa, uma vez que as direções das foliações são as preferenciais à percolação e a resistência ao cisalhamento é reduzida nesses planos, como mostram os ensaios geotécnicos realizados. Além disso, dobras, principalmente as sinclinais, podem ser caminhos preferenciais ao fluxo de água subterrânea.

A partir da análise das campanhas de investigação, revisão de literatura, imagens de satélite e cartas temáticas (topografia, hidrografia), desenvolveu-se um modelo geológico-geotécnico simplificado, contendo os possíveis horizontes de solos e rochas, incluindo o lençol

freático. A seção do modelo mostra um expressivo volume de material removido pelas escavações. Alívios de tensão gerados pelo desconfinamento tendem a contribuir para a redução da resistência ao cisalhamento nos planos de foliação, facilitando a movimentação relativa entre eles. A redistribuição de tensões também possui relação com as características estruturais dos materiais geológicos da região, como dobramentos, que podem atuar alterando a direção das tensões principais, potencializando os efeitos da decompressão promovida pelas escavações. Além disso, o filito é muito afetado pelo desconfinamento, cujas propriedades são modificadas e os processos de intemperismo ocorrem com certa celeridade. Esse é um aspecto bastante notável e evidenciado nos taludes de corte em filito do Quadrilátero Ferrífero. Nesse sentido, as escavações podem ser consideradas como agentes efetivos preparatórios e se manifestam como causa externa, uma vez que alteram a geometria do maciço.

Visto que em determinados momentos são utilizados explosivos para o avanço da escavação, tem-se ainda o impacto das detonações. As trincas e planos mobilizados também tendem a evoluir pelos abalos sísmicos causados por detonações, pois um percentual da energia transferida do explosivo para a rocha é transformado em vibrações no maciço. As vibrações se caracterizam como agentes efetivos preparatórios, uma vez que não provocam colapso em uma única ocorrência, e se manifestam como causas intermediárias.

Apesar dos vetores resultantes da inclinometria apontarem para diferentes direções, os deslocamentos horizontais, em geral, são direcionados para a cava. Durante o período de monitoração foi constatada movimentação com velocidade média da ordem de 0,05 m/ano, caracterizada como extremamente lenta. Apesar da progressão dos deslocamentos ao longo do tempo, não foi evidenciada uma zona de deslocamento, que caracterizasse uma superfície de deslizamento. Análises de estabilidade elaboradas com base em um modelo geológico-geotécnico simplificado indicaram que possíveis superfícies de deslizamento tenderiam a se desenvolver interceptando os inclinômetros antes de superfícies mais profundas. Assim, o desenvolvimento de superfícies de deslizamento que contenham a rodovia sem interceptar os inclinômetros instalados pode ser questionável. Nas análises foi considerado um único material, com ângulo de atrito  $25^\circ$  e coesão nula, correspondente a uma condição de resistência residual do filito.

A situação de descarregamento do maciço observada em campo poderia ser representada pelo ensaio triaxial de compressão vertical por descarregamento (guardado o aspecto de axissimetria ausente no modelo real), cuja trajetória de tensões é marcada pela redução da tensão horizontal. A quantificação da taxa de desconfinamento com o tempo, a relação entre desconfinamento vertical e lateral e, conseqüentemente, os deslocamentos necessários para



mobilizar uma superfície de deslizamento em direção à cava seria possível por meio de modelagem numérica, que não compõe o escopo da pesquisa.

Nas análises de estabilidade também foi definido um lençol freático, por meio de hidrografia, associada à monitoração dos níveis d'água e piezométricos. Pela hidrografia definiu-se pontos de saída de água na seção modelada. Com base nessa informação observou-se que o nível d'água foi rebaixado em direção ao fundo da cava, havendo uma inversão do fluxo de água subterrânea nas proximidades do maciço analisado. Essa hipótese pode ser razoável, visto que na monitoração verificou-se rebaixamento de 10 m, mesmo em período chuvoso.

Os perfis geoeletricos apontaram alto resistivo em elevado contraste com a resistividade dos materiais circundantes. Dentro de espaços vazios a condutividade elétrica tende a zero e a resistividade, que é inversamente proporcional, tenderá a altos valores. A interpretação das sondagens geofísicas, por meio de eletrorresistividade, baseadas nas prospecções geotécnicas, monitorações, presença de cavidade no pé do talude, abatimentos com deslocamentos verticais praticamente constantes e as resistividades encontradas, sugere a ocorrência de mais cavidades. A presença de cavidade aflorando no pé do talude e outras possíveis, como sugerido pela geofísica, associada ao rebaixamento do lençol freático se configura uma condição para a ocorrência de abatimentos, principalmente no pavimento. Com o rebaixamento do conteúdo de água há redução do suporte proporcionado pelo fluido às camadas sobrejacentes. A água, por possuir características de incompressibilidade, tende a conter deformações por carregamento vertical nas cavidades, atuando, concomitantemente, como agente intempérico e ampliando-as. Deste modo, a presença de água na cavidade seria benéfica. As cavidades representam os agentes predisponentes no âmbito do complexo geológico. O rebaixamento do nível d'água e a inversão de fluxo de água subterrânea se constituem agentes efetivos preparatórios e se manifestam como causa intermediária, uma vez que refletem, no maciço, consequências de agentes externos.

É importante ressaltar que os estudos que deram origem a essa pesquisa abordam um período de tempo específico, uma geometria específica, modelo geológico-geotécnico simplificado e não refletem a atual condição do maciço. Portanto, a avaliação da segurança geotécnica da área de estudo não foi objetivo deste trabalho.

## **6.2 Sugestões para pesquisas futuras**

A partir dos resultados e discussões reportados, sugere-se um aprofundamento dos estudos até então realizados. São sugestões para pesquisas futuras:

- Realizar campanha de investigação geofísica complementar com na região da rodovia para a confirmação das cavidades. A aplicação de métodos eletromagnéticos como o GPR poderia contribuir para a validação da existência de cavidades;
- Obter investigações geológico-geotécnicas e dados hidrogeológicos pretéritos da área da cava para otimização do modelo de engenharia e entendimento da hidrogeologia local. Adicionar ao programa de investigações, o ensaio de compressão triaxial por descarregamento para comparação e validação da trajetória de tensões obtida no ensaio com o modelo numérico;
- Simular a influência do alívio de tensões gerado pela cava por meio de estudos de tensão-deformação e a influência do rebaixamento do nível d'água (esvaziamento) em uma cavidade inserida no modelo;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE, Associação Brasileira De Geologia De Engenharia. Boletim 03: Manual de Sondagens. 5.ed. São Paulo: 2013.
- ABGE, Associação Brasileira De Geologia De Engenharia (1998). Geologia de Engenharia. ABGE/FAPESP/CNPq. São Paulo, 576 p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457: Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.
- ALBUQUERQUE FILHO, L.H. (2004). Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeito de Minério de Ferro através de ensaios de piezocone. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 194p.
- ASTM, American Society for Testing and Materials (2011). D3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- ASTM, American Society for Testing and Materials (2014). D5550: Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer.
- ASTM, American Society for Testing and Materials (2020). D7181: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils.
- ASTM, American Society for Testing and Materials (2018). D7608-18: Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Measure Drained Fully Softened Shear Strength and Stress Dependent Strength Envelope of Fine-Grained Soils.
- Baltazar O.F. & Zucchetti M., (2007). Lithofácies 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(2007), 471–499;
- BEATO, D. A. C., MONSORES, A. M., BERTACHINI, A. C., (2006). Potencial aquífero nos metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero – Região da APA SUL RMBH – MG. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS, Curitiba, PR.

- BEZERRA, D.P. (2014). Quadrilátero Ferrífero – MG: fatores condicionantes do relevo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 148 p.
- BRAGA, A.C.O. (2015). Geofísica Aplicada: Métodos Geométricos em Hidrogeologia. Editora Oficina de Textos, São Paulo, SP, 160 p.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1967). Mechanism of brittle fracture of rock: Part I—theory of the fracture process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 4(4): 395-404.
- BISHOP, A.W., (1967). Progressive failure - with special reference to the mechanism causing it. *Proceedings of the Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks*. Oslo, Norway, 2:142-150.
- CANEDO, G. R. (2013). Mapa de isso-velocidades: uma ferramenta para o controle das vibrações nas pedreiras. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 161 p.
- CARDOSO, L.H. (2016). Investigação geofísica na prospecção de cavidades naturais em Litotipos Ferríferos na região de Mariana, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 102 p.
- CARVALHO, T.R.R. (2019). Caracterização mineralógica, química, física e mecânica de perfis de intemperismo de filito sob clima tropical. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 129 p.
- CASTRO, P.T.A., ENDO, I., GANDINI, A. L., (2020). Quadrilátero Ferrífero: avanço do conhecimento nos últimos 50 anos. 3i Editora, Belo Horizonte, MG, 480 p.
- CERRI, R.I., REIS F. A.G.V., GRAMANI, M.F., GIORDANO, L.C., ZAINE, J.E. (2017). Landslides zonation hazard: relation between geological structures and landslides occurrence in hilly tropical regions of Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89(4):2609-2623.
- COSTA, T.A.V. (2009). Caracterização Geológico-Geotécnica e Modos de Ruptura do Minério Hematítico Friável nas Minas da Vale, Borda Oeste do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia (Mestrado Profissionalizante), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 195 p.
- COSTA, W.D. (2012). Geologia de Barragens. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 352 p.
- DANTAS, J.C.M., MESQUITA, D.C., DE PAULA, P.S., GUERRA, K.J. (2017). Correlação entre dados de perfuração geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero MG. *Revista Águas Subterrâneas*, São Paulo, SP, 31(4):373-383.
- DAS, B.M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*. 7.ed., Cengage Learning Stanford Libraries, USA, 683p.

- DORR, J. V. N., (1969). Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. USGS, Professional Paper 641- A, 110p.
- DORR, J.V.N. (1958). The Gandarela Formation: Sociedade Brasileira de Geologia Bol., 7(2):63-64.
- DUNCAN, C.W., MAH, C.W. (2004). Rock Slope Engineering: Civil and Mining. 4th Edition, Spon Press, London, UK, 456 p.
- DUNCAN, J.M., WRIGHT, S.G., BRANDON, T.L. (2014). Soil Strength and slope stability. 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, USA, 317 p.
- DUNNICLIFF, J. (1988). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons Inc, Hoboken, USA, 577 p.
- DUTRA, G. (2013). Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. 32º Congresso Brasileiro de Espeleologia, SBE, Barreiras, BA, 415-426.
- ENDO I, GALBIATTI H. F., DELGADO C. E. R ., OLIVEIRA M. M. F. de, ZAPPAROLI A. de C., MOURA L . G. B. de, PERES G. G., OLIVEIRA A. H. de, ZAVAGLIA G., DANDERFER Fº A., GOMES C. J. S ., CARNEIRO M. A., NALINI J r. H. A., CASTRO P de T. A., SUITA M. T. de F.,TAZAVA E., LANA C. de C., MARTINS-NETO M. A., MARTINS M. de S ., FERREIRA Fº F. A., FRANCO A. P., ALMEIDA L . G., ROSSI D. Q ., ANGELI G., MADEIRA T. J . A., PIASSA L . R . A., MARIANO D. F., CARLOS D. U., (2019). Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- FUTAI, M.M., CECÍLIO JUNIOR, M.O., ABRAMENTO, M. (2012). Resistência ao cisalhamento e deformabilidade de solos residuais da Região Metropolitana de São Paulo. Twin Cities: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba, ABMS, 155-187.
- GOMES, C.J.S., SILVA, R.G., FILHO, A.D., DI ALMEIDA, J.F.S., PESSÔA, M.V. (2005). Aferição múltipla de modelos geológico-estruturais por meio da modelagem física analógica e da modelagem estrutural tridimensional: um exemplo do Quadrilátero Ferrífero. Revista Brasileira de Geociências, SBG, 35(4): 525-534.
- GUIDICINI, G., NIEBLE, C.M. (1984). Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Editora Blucher, São Paulo, SP, 216 p.
- HOEK, E., BRAY, J. (1977). Rock Slope Engineering – Revised Second Edition. The Institution of Mining and Metallurgy, London, UK, 620 p.
- HOEK, E., READ, J., KARZULOVIC, A., CHEN, Z.Y. (2000). Rock slopes in Civil and Mining Engineering. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia.
- HUALLANCA, R.E.Z. (2004). Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 114 p.

- HASUI, Y., CARNEIRO, C.D.R., ALMEIDA, F.F.M., BARTORELLI, A., (2012). Geologia do Brasil. Beca, São Paulo, SP, 900 p.
- IRAMINA, W. S., ESTON, S. M. (2002) O mapa de iso-velocidades como ferramenta de controle ambiental. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ISRM (2015). The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014. Springer Nature, Cham, Switzerland, 306 p.
- LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V. (1969) Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, USA, 548 p.
- LAZARIM, H.A. (1999) Caracterização Hidrogeológica no extremo norte da Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Nova Lima, MG: Proposta de modelo. Dissertação de Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 115 f.
- LEÃO, M.F., BARROSO, E.V., POLIVANOV, H., MARQUES, E.A.G., VARGAS JR, E.A., FIGUEIREDO, V.D. (2017). Aspectos Mineralógicos, Químicos e Físicos de Frente de Intemperismo em Filito da Formação Batatal, Quadrilátero Ferrífero. Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ, 40(3):398-406.
- LEÃO, M. F. (2017). Comportamento Geomecânico de Frente de Intemperismo em Filito da Região do Quadrilátero Ferrífero. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 177 p.
- MACHADO FILHO, J. G. (2000). Estabilidade de encostas e condicionantes geológicos, geomorfológicos e estruturais, num trecho da serra de Cubatão. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 172 p.
- MELLO, V. TEIXEIRA, A. M. (1967). Mecânica dos Solos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos., SP, 137 p.
- PARIZZI, M. G. (2004). Condicionantes e Mecanismos de Ruptura em Taludes da Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG. Tese de Doutorado, Escola de Minas, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 233p.
- PILÓ, L.B., AULER, A. (2005). Cavernas em minério de ferro e canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. O Carste, 17(3): 92-105.
- PILÓ, L.B., AULER, A. (2009). Geoespeleologia das cavidades em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. Congresso Brasileiro de Espeleologia, CECAV, Montes Claros, MG, 30:181-186.
- PIMENTEL, J., TEIXEIRA, C.Z., SILVA, F.M. (2005). Geotecnia. Projeto APA Sul RMBH, Estudo do Meio Físico, CPRM/SEMAD/CEMIG, Belo Horizonte, MG, 4.

- PITANGA, H. N., (2002). Influência da velocidade de carregamento e do tempo de inundação na resistência ao cisalhamento de solos estruturados. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 101p.
- PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J., JORDAN, T.H. (2006). Para entender a terra. Ed. Bookman, Porto Alegre, RS, 768 p.
- RAMSAY, J.G., HUBER, M.I. (1987). The Techniques of Modern Structural Geology 2: folds and fractures. London: Academic Press.
- SAMPAIO, J.A., ALMEIDA S, L.M. (2005). Calcário e dolomito. In: Rochas & minerais industriais: usos e especificação. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ, Cap. 15, pp.327-350.
- SANGLARD, J.C.P., ROSIÈRE, C.A., SANTOS, J.O.S., MCNAUGHTON, N.J., FLETCHER, I.R. (2014). A estrutura do segmento oeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, e o controle tectônico das acumulações compactas de alto teor em Fe. Revista do Instituto de Geociências – USP, São Paulo, SP, 14(1):81-95.
- SANTIAGO, L.O.R. (2008). Alteração e alterabilidade de rochas básicas intrusivas metamorfizadas e filitos sericíticos da região do Quadrilátero Ferrífero e sua implicação no comportamento mecânico. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 133 p.
- SCIENCELEARN, 2021. Seismic Wave. Internet. Disponível em: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/340-seismic-waves>, Acesso em: 18/08/2021.
- SILVA, E.M. (2006). Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 123 p.
- SILVA, R. C., COSTA, D. P., EHRLICH, M. (2018). Movimentação de Rastejo e Proposta de Estabilização de um Depósito de Solo Residual de Filito. In: V Simpósio Pan-americano de Deslizamentos (SPD), Salvador, Bahia, Brasil.
- SILVEIRA, J. F. A., (2006). Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento, Oficina de Textos, São Paulo, SP, 416 p.
- SILVEIRA, L.G.C. (2017). Controle de vibrações e pressão acústica no desmonte de rochas com explosivos: estudo de caso em uma mina do Quadrilátero Ferrífero. Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 137 p.
- SIMMONS, G.C. (1963). Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. O Carste, 17(3): 74-77.
- SOUZA, L.R. (2012). Desenvolvimento de um sistema de instrumentação para medição do nível d'água com base na tecnologia de fibra óptica. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, PR, 125 p.
- TAMROCK. (1984). Handbook on surface drilling and blasting. Painofaktorit, Finland, 310 p.

- VANN, J.H. (1963). Developmental processes in laterite terrains in Amapá. *Geographical Review*, 53(3):406-417.
- VARNES, D. J., (1978). Slope movement types and processes. *Landslides: Analysis and Control*, Washington, USA, 176:11-33.
- WOODWARD, N. B., (1999). Competitive macroscopic deformation processes. *Journal of Structural Geology*, 21: 1209-1219.