

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

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE DE MACIÇOS
CONSTITUÍDOS POR SOLOS RESIDUAIS DE FILITO NO
QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

LUCAS ANDRÉ DE AREDE PONTES

ORIENTADOR: RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO G.DM-427/2025**

**BRASÍLIA-DF
DEZEMBRO/2025**

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

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE DE MACIÇOS
CONSTITUÍDOS POR SOLOS RESIDUAIS DE FILITO NO
QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

LUCAS ANDRÉ DE AREDE PONTES

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)

GERMÁN MARCELO MARTINS VINUEZA FREIRE, Dr. rer. nat. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

ABDOUL AZIZ DIENE, DSc (Vale)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 09 DE DEZEMBRO DE 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

PONTES, LUCAS ANDRÉ DE AREDE

Caracterização Geotécnica e Análise de Maciços Constituídos por Solos Residuais de Filito no Quadrilátero Ferrífero / Lucas André de Arede Pontes; orientador: Rafael Cerqueira Silva. -- Brasília, 2025.

xvi 176 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2025)

Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, 2025.

- | | |
|---------------------------|---------------|
| 1. Quadrilátero Ferrífero | 2. Filito |
| 3. Anisotropia | 4. Foliações. |
| I. ENC/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA

Pontes, L. A. A. (2025). Caracterização geotécnica e análise de maciços constituídos por solos residuais de filito no Quadrilátero ferrífero. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-427/2025, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas André de Arede Pontes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Caracterização Geotécnica e Análise de Maciços Constituídos por Solos Residuais de Filito no Quadrilátero Ferrífero.

GRAU / ANO: Mestre / 2025

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.

Lucas André de Arede Pontes
Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Fernanda, pelo amor e carinho, por tornar meus dias melhores e por caminhar ao meu lado, sempre, onde quer que eu esteja. Agradeço também à Olivia, minha companheira de quatro patas.

Aos meus pais, Márcia e Marcos, e à minha irmã, Daniela, pelo apoio constante, por acreditarem em mim e por comemorarem comigo cada etapa dessa jornada.

À minha tia Adriana e ao meu primo Davi, pelo acolhimento e pela forma carinhosa com que me receberam em sua casa durante parte deste processo.

Ao meu orientador, Prof. Rafael Cerqueira Silva, pelo apoio, ensinamentos, amizade e pela confiança ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, cujos ensinamentos e comprometimento com a universidade levarei comigo como inspiração.

Aos amigos que fiz no ATO da FICO, pela oportunidade de aprender com profissionais de excelência, pelo incentivo na realização desta dissertação e pelo acolhimento dado à minha família.

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).

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

Às incontáveis outras pessoas que não foram citadas, mas que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ANÁLISE DE MACIÇOS CONSTITUÍDOS POR SOLOS RESIDUAIS DE FILITO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero é a principal província mineral do Brasil e abriga obras de infraestrutura essenciais para a economia nacional, como ferrovias, rodovias e barragens. Essas intervenções ocorrem em terrenos geotécnicos complexos, onde são comuns solos residuais jovens de alteração de filito. Esses materiais, de natureza metassedimentar e fortemente anisotrópica, apresentam comportamento mecânico e hidráulico condicionado à orientação das foliações reliquias, o que influencia diretamente a estabilidade de maciços terrosos, taludes e estruturas de contenção. A compreensão desses controles estruturais é fundamental para reduzir incertezas de projeto e aprimorar práticas de engenharia em regiões marcadas por intensa atividade tectônica e deformacional. Esta dissertação investiga o comportamento geotécnico de solos residuais de filito, com foco nos efeitos da anisotropia estrutural sobre a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade. A pesquisa reúne e discute ensaios laboratoriais e de campo, incluindo caracterização física, ensaios de permeabilidade, cisalhamento direto orientado, compressão triaxial, ensaios de dispersividade e análise química por fluorescência de raios X (FRX). Também foram consideradas retroanálises de rupturas e programas de instrumentação geotécnica com inclinômetros, piezômetros e medidores de nível d'água. A interpretação dos dados de cisalhamento direto, apoiada por análises estatísticas, permitiu identificar diferenças geomecânicas entre as condições de saturação dos corpos de prova, bem como variabilidades associadas à anisotropia do material. Maiores velocidades de cisalhamento resultaram em maior mobilização da resistência, evidenciando a influência da taxa de deformação no comportamento do solo residual de filito. Verificou-se ainda que, embora ensaios triaxiais sejam amplamente empregados, o cisalhamento direto orientado, quando executado paralelamente às foliações, reproduz as condições mais críticas de resistência. O estudo contribui para ampliar o entendimento sobre solos residuais derivados de filito e propõe uma abordagem integrada que combina ensaios laboratoriais, observações estruturais, retroanálises e monitoramentos *in situ*.

**GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF SOIL MASSES
COMPOSED OF PHYLLITE RESIDUAL SOILS IN THE QUADRILÁTERO
FERRÍFERO**

ABSTRACT

The Quadrilátero Ferrífero is Brazil's main mineral province and hosts infrastructure works essential to the national economy, such as railways, highways, and dams. These interventions take place in geotechnically complex terrains where young residual soils derived from phyllite are common. These metasedimentary and strongly anisotropic materials exhibit mechanical and hydraulic behavior controlled by the orientation of relict foliation, which directly influences the stability of soil masses, slopes, and retaining structures. Understanding such structural controls is fundamental to reduce design uncertainties and improve engineering practices in regions marked by intense tectonic and deformational activity. This dissertation investigates the geotechnical behavior of residual phyllite soils, focusing on the effects of structural anisotropy on shear strength and permeability. The research compiles and discusses laboratory and field investigations, including physical characterization, permeability tests, oriented direct shear, triaxial compression, dispersivity tests, and chemical analysis by X-ray fluorescence (XRF). Back-analyses of failure events and geotechnical instrumentation programs involving inclinometers, piezometers, and water level measurements were also considered. The interpretation of direct shear data, supported by statistical analyses, allowed the identification of geomechanical differences between specimen saturation conditions, as well as variability associated with material anisotropy. Higher shear rates led to greater mobilization of shear strength, highlighting the influence of strain rate on the behavior of residual phyllite soils. It was further verified that, although triaxial tests are widely employed, oriented direct shear performed parallel to foliation planes reproduces the most critical strength conditions. The study contributes to advancing the understanding of residual soils derived from phyllite and proposes an integrated approach combining laboratory testing, structural observations, back-analyses, and in situ monitoring.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1 -INTRODUÇÃO	1
1.1 - MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	2
1.2 - OBJETIVOS	4
1.3 - METODOLOGIA	5
1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO 2	8
2 -REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 - EVOLUÇÃO TECTÔNICA E UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS . 8	
2.2 - ARQUITETURA ESTRUTURAL E DEFORMAÇÃO REGIONAL	12
2.3 - FILITOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	14
2.4 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS FILITOS E SOLOS RESIDUAIS DERIVADOS	17
2.5 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	19
2.6 - EFEITO DE ESCALA EM SOLOS RESIDUAIS	24
2.7 - SUPERFÍCIES DE FRICÇÃO	26
2.8 - MOVIMENTOS DE MASSA	28
CAPÍTULO 3	33
3 -CARACTERIZAÇÃO DOS MACIÇOS EM ESTUDO	33
3.1 - Maciço MA01 (km 578+500 - BR-040/MG)	35
3.2 - Maciço MA02 (km 579+300 - BR-040/MG)	37
3.3 - Maciço MA03 (km 586+700 - BR-040/MG)	40
3.4 - Maciço MA04 (km 590+175 - BR-040/MG)	41
3.5 - Maciço MA05 (km 590+500 - BR-040/MG)	45
CAPÍTULO 4	50
4 -MATERIAIS E MÉTODOS	50

4.1 - INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA.....	50
4.1.1 - INCLINÔMETROS.....	50
4.1.2 - PIEZÔMETRO CASAGRANDE.....	51
4.1.3 - MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA.....	53
4.2 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	54
4.2.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	59
4.2.2 - PERMEABILIDADE	60
4.2.3 - CISALHAMENTO DIRETO	61
4.2.4 - CONSIDERAÇÕES.....	64
4.2.5 - COMPRESSÃO TRIAXIAL	66
4.2.6 - PAPEL FILTRO	67
4.2.7 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA.....	72
4.2.8 - DESAGREGAÇÃO	74
4.2.9 - DISPERSÃO.....	75
4.2.10 - INDERBTIZEN MODIFICADO	76
4.2.11 - ESPECTOMETRIA DE FLUORECÊNCIA DE RAIOS-X	77
CAPÍTULO 5.....	79
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES - DADOS DE ENSAIOS	79
5.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	79
5.2 - PERMEABILIDADE	82
5.3 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO.....	84
5.3.1 - DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO.....	122
5.4 - ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL	126
5.4.1 - SOLO RESIDUAL DE FILITO COR LARANJA (MA05).....	126
5.4.2 - SOLO RESIDUAL DE FILITO/CINZA (MA05).....	132
5.4.3 - SOLO RESIDUAL DE FILITO MARRON (MA01)	138

5.4.4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS	141
5.5 - PAPEL FILTRO.....	143
5.6 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA	149
5.7 - DESAGREGAÇÃO	149
5.8 - DISPERSÃO	150
5.9 - INDEBTIZEN MODIFICADO	151
5.10 - ESPECTOMETRIA DE FLUORÊNCIA DE RAIO X.....	152
CAPÍTULO 6.....	154
6 -RESULTADOS E DISCUSSÕES - DADOS DE MONITORAMENTO DOS MACIÇOS E RETROANÁLISES.....	154
6.1 - MA01 - KM 578+500	154
6.2 - MA02 - KM 579+300	159
6.3 - MA03 – km 586+700.....	165
6.4 - MA04 - KM 590+175	167
6.5 - MA05 - km 590+400	171
CAPÍTULO 7.....	175
7 -CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	175
7.1 - CONCLUSÕES.....	175
7.2 - SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS	177
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento em solos residuais de filitos.....	22
Tabela 4.1 - Tempos mínimos t_f em função do tipo de solo.	64
Tabela 4.2 - Ensaio de cisalhamento direto e sua aplicação em casos práticos (Fonte: GeoRio, 2014).....	66
Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de granulometria das amostras (CD: com defloculante; SD: sem defloculante).	79
Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de limites de consistência e do peso específico dos sólidos (Gs).....	81
Tabela 5.3 - Coeficientes de permeabilidade AM01 a AM14.....	83
Tabela 5.4 - Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de Cisalhamento Direto.....	84
Tabela 5.5 - Intervalos da literatura e limites obtidos por regressão linear para c' e ϕ' de solos residuais de filito do Quadrilátero Ferrífero.....	126
Tabela 5.6 - Parâmetros de Resistência obtidos esnaio triaxial CID e CIU (Laranja).	132
Tabela 5.7 - Parâmetros de Resistência obtidos esnaio triaxial CID e CIU (Cinza).	137
Tabela 5.8 – Parâmetros de Resistência obtidos esnaio triaxial CID (Marrom)	140
Tabela 5.9 - Parâmetros de Sucção.	148
Tabela 5.10 - Erodibilidade (<i>Pinhole Test</i>).	149
Tabela 5.11 - Erodibilidade (Desagregação).....	150
Tabela 5.12 - Erodibilidade (Dispersão).	151
Tabela 5.13 - Erodibilidade (Inderbitzen).	151
Tabela 5.14 - Análises químicas por espectrometria por fluorescência de raios-X.	152
Tabela 6.1 - Cálculos de acordo com a norma ABNT NBR 11682:2009	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Quadro síntese da evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969; Marshak; Alkmim, 1989).....	9
Figura 2.2 - Feições estruturais do Quadrilátero Ferrífero (Baltazar; Zuchetti, 2007 modificado de Chemale JR. <i>et al.</i> , 1994).	10
Figura 2.3 - Filito encontrado no QF com planos de foliação bem definidos (Fonte: Gomes, 2021).....	17
Figura 2.4 - Processos erosivos na face do talude de corte localizado na BR-040 no QF.....	19
Figura 2.5 - Representação simplificada da influência da escala no modelo de comportamento de maciços rochosos (Fonte: Adaptado de Hoek, 1983).....	25
Figura 2.6 - Classificações dos movimentos de massa (Fonte: GEO-RIO,2014).	30
Figura 2.7 - Rupturas em taludes de filitos e xistos. A- tombamentos e quedas de blocos em quartzitos, filitos e xistos, 1- ação da água nas discontinuidades; 2- Quedas e tombamentos. B- escorregamento em taludes de xistos e filitos com cortes paralelos à xistosidade. (Fonte: Adaptado - Parizzi <i>et al.</i> 2011).	31
Figura 2.8 - Ruptura circular (sem controle estrutural) mobilizada em material muito alterado (Fonte: Adaptado de Hoek; Bray, 1981)	31
Figura 2.9 - Mecanismos de ruptura por tombamento (Fonte: Adaptado Hoek; Bray, 1977).	32
Figura 2.10 - Mecanismo de ruptura por flambagem: (a) flambagem por flexão; (b) flambagem com três charneiras. (Fonte: Cavers (1981) apud Silva;Lana (2014).)	32
Figura 3.1 - Vista geral do talude MA01 (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2020a).....	36
Figura 3.2 - Maciço de Amostragem MA02 (km 579+300, Pista Sul), registro fotográfico quando da ocorrência da ruptura no talude de corte.....	38
Figura 3.3 - Maciço de Amostragem MA02 (km 579+300, Pista Sul), registro após intervenção de terraplenagem no talude de corte.....	39
Figura 3.4 - Vista geral do talude MA03, evidenciando as diferenças cromáticas e zonas de erosão associadas a variações de intemperismo no solo residual de filito.	40
Figura 3.5 - Ruptura principal proporcionou ao talude uma geometria de configuração côncava, trincas e abatimentos, que favorecem a concentração de água (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2018).....	42
Figura 3.6 - Material deslizado com baixa inclinação muito próxima do ângulo de mergulho da foliação do filito, com resistência gradualmente reduzida pela ação da água (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2018).	43

Figura 3.7 - Trincas sucessivas remontantes ao longo do talude favorecem a infiltração de água, induzindo o aumento de poro-pressões nos poros e consequente movimentação (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2018).	43
Figura 3.8 - Bacia de contribuição com feições de movimentação de massa, destacando áreas de voçoroca (limites em amarelo) e processos de rastejo (limites em vermelho), além da ocorrência de trincas (Fonte: Silva; Costa; Ehrlich, 2020).	46
Figura 3.9 - Ruptura de estrutura de contenção composta por três lances de cortina ancorada (N1, N2 e N3). (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2020).	46
Figura 3.10 - Execução de solo grampeado na cicatriz da ruptura.	47
Figura 3.11 - Intervenções antrópicas nas próximas do MA05, incluindo mineração e barragem com talude de jusante superior a 50 m (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2020).....	47
Figura 3.12 - Ocorrência de cascalho a partir de aproximadamente 35 m de profundidade....	48
Figura 3.13 - Mobilização de trincas no pavimento.....	49
Figura 4.1 - Princípios de operação do inclinômetro (Fonte: Adaptado de Dunicliff, 1988; Gomes, 2021).	51
Figura 4.2 - Fases de instalação de um piezômetro Casagrande (Fonte: GeoRio, 2014).....	53
Figura 4.3 - Medidor de nível d'água INA (Fonte: GeoRio, 2024).....	54
Figura 4.4 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA01): solo residual maduro de filito (SRMF) e solo residual jovem de filito (SRJF) ensaiados em cisalhamento direto.....	55
Figura 4.5 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA01): solo residual jovem de filito (SRJF) ensaiado no triaxial (Fonte: Gomes, 2021).	56
Figura 4.6 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA02)	56
Figura 4.7 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA03)	57
Figura 4.8 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA04).	58
Figura 4.9 - Campanhas de retiradas de amostras de solos (MA05): solo residual de filito coletado no Pé do Talude de Montante (Pé de Montante) e no Pé da Cortina Ancorada para realização de ensaios de cisalhamento direto.	58
Figura 4.10 - Campanhas de retiradas de amostras de solos (MA05): solo residual de filito de cores laranja e cinza coletados para realização de ensaios triaxiais.....	59
Figura 4.11 – Etapas do ensaio de permeabilidade.	61
Figura 4.12 - Esquema de ensaio de cisalhamento direto (Fonte: GeoRio, 2014).....	61
Figura 4.13 - Curva tempo x deformação do método da raiz quadrada (Fonte: ASTM D2435)	62

Figura 4.14 - Métodos para medida de sucção: a) sem contato solo-papel (sucção total) e b) com contato solo-papel (sucção matricial) (Fonte: Riccio Filho, 2007).....	68
Figura 4.15 - Etapas do ensaio de papel filtro (Fonte: Silva, 2010).....	69
Figura 4.16 - Detalhe do corpo de prova para o ensaio de Pinhole (Fonte: ABNT, 2022).....	72
Figura 4.17 - Fluxograma de classificação da dispersibilidade conforme o ensaio de Pinhole (Fonte: ABNT, 2022).	73
Figura 4.18 - Ensaio de desagregação por inundação parcial (Fonte: Vieira, 2017).	75
Figura 4.19 - Inderbitzen Modificado: A) Gotejamento (Freire, 2001); B) Chuveiramento, (Grando,2011).	77
Figura 5.1 - Curvas de distribuição granulométrica das amostras AM01 a AM14 com uso de defloculante (CD).....	80
Figura 5.2 - Curvas de distribuição granulométrica das amostras AM01 a AM14 sem uso de defloculante (CD).....	80
Figura 5.3 - Carta de Plasticidade - SUCS.	82
Figura 5.4 - MA01, AM01, CP de solo residual maduro de filito (SRMF), condição natural.	85
Figura 5.5 - MA01, AM01, CP de solo residual maduro de filito (SRMF), condição inundada.	85
Figura 5.6 - Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM01 (SRMF).....	86
Figura 5.7 - MA01: Envoltórias de resistência, AM01 (SRMF).....	86
Figura 5.8 - MA01, AM02, CP de solo residual jovem de filito (SRJF), condição natural.	87
Figura 5.9 - MA01, AM02, CP de solo residual jovem de filito (SRJF), condição inundada.	87
Figura 5.10 - MA01: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM02 (SRJF). ...	88
Figura 5.11 - MA01: Envoltórias de resistência, AM02 (SRJF).....	88
Figura 5.12 - MA02, CP cisalhados do filito cinza na condição natural 25, 50, 200, 300 kPa.	92
Figura 5.13 - MA02: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM03-Condição Natural.	92
Figura 5.14 - MA02: Envoltórias de resistência, AM03 - Condição Natural.	93
Figura 5.15 - MA02, 3 CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 25 kPa. ..	93
Figura 5.16 - MA02, 3 CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 50 kPa. ..	93
Figura 5.17 - MA02, CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 100 kPa. ...	94
Figura 5.18 - MA02, CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 200 kPa. ...	94
Figura 5.19 - MA02, CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 300 kPa. ...	94

Figura 5.20 - Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM03 -Condição Embebida - Triplicatas.	95
Figura 5.21 - MA02: Envoltórias de resistência, AM03 - Condição Embebida - Triplicatas..	95
Figura 5.22 - Amostras Cisalhadas Amarelo CN (25, 50, 100 e 200 kPa).	98
Figura 5.23 - Amostras Cisalhadas Amarelo Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa).....	98
Figura 5.24 - MA03: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM04.	98
Figura 5.25 - MA03: Envoltórias de resistência, AM04.	99
Figura 5.26 - Amostras Cisalhadas Bege CN (25, 50, 100e 200 kPa).	99
Figura 5.27 - Amostras Cisalhadas Bege Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa).	100
Figura 5.28 - MA03-AM05: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal.	100
Figura 5.29 - MA03 - AM05: Envoltórias de resistência.....	100
Figura 5.30 - Amostras Cisalhadas Cinza CN (25, 50, 100e 200 kPa).	101
Figura 5.31 - Amostras Cisalhadas Cinza Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa).	101
Figura 5.32 - MA03: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM06.	102
Figura 5.33 - MA03: Envoltórias de resistência, AM06.	102
Figura 5.34 - MA03: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM07.	103
Figura 5.35 - Critério de Campos e Carrilho (1995).	103
Figura 5.36 - Amostras Cisalhadas Marrom Roseado CN (25, 50, 100e 200 kPa).....	104
Figura 5.37 - Amostras Cisalhadas Marrom Roseado Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa)....	104
Figura 5.38 - MA03: Envoltórias de resistência AM07.	104
Figura 5.39 - Amostras Cisalhadas Roxo CN (25, 50, 100e 200 kPa).....	105
Figura 5.40 - Amostras Cisalhadas Roxo Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa).	105
Figura 5.41 - MA03: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM08.	106
Figura 5.42 - MA03: Envoltórias de resistência AM08.	106
Figura 5.43 - MA04 -AM09: Gráfico de tensão cisalhante por deslocamento horizontal.	108
Figura 5.44 - MA04 -AM09: Envoltória de resistência em Condição Embebida realizados em paralelo e perpendicular as foliações.	108
Figura 5.45 - MA04 -AM10: Gráfico de tensão cisalhante por deslocamento, condição natural e embebida.....	109
Figura 5.46 - MA04 -AM10: Envoltória de resistência em Condição Natural e Embebida. .	109
Figura 5.47 - MA04 -AM14: Gráfico de tensão cisalhante por deslocamento, V1= 0,20 mm/min, V2 = 0,055 mm/min e V3 = 0,0055 mm/min.....	110
Figura 5.48 - MA04 -AM14: Envoltória de resistência de Pico e Pós-Pico em Condição Embebida V1= 0,20 mm/min, V2 = 0,055 mm/min e V3 = 0,0055 mm/min.....	111

Figura 5.49 - MA04 -AM14: Gráfico de tensão cisalhante por deslocamento (Embebida 1 = Resistência de Pico, embebida 6 = Resistência Residual).	112
Figura 5.50 - MA04 -AM14: Envoltórias de resistência de Pico e Residual (Embebida 1 = Resistência de Pico, Embebida 6 = Resistência Residual).....	112
Figura 5.51 – A) AM11: Pé de Montante e B) AM12: Pé da Cortina.	116
Figura 5.52 – Corpos de prova cisalhados da AM11: Pé de Montante (25, 50, 100 e 200 kPa).	116
Figura 5.53 – Corpos de prova cisalhados da AM12: Pé da Cortina, com planos na horizontal, direção paralela ao plano de cisalhamento (25, 50, 100 e 200 kPa).	117
Figura 5.54 – Corpos de prova cisalhados da AM12: Pé da Cortina, com planos na vertical, direção perpendicular ao plano de cisalhamento (25, 50, 100 e 200 kPa).	117
Figura 5.55 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos CP da AM11: Pé de montante.	117
Figura 5.56 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos CP da AM12: Pé da Cortina com as foliações paralelas ao plano de cisalhamento do ensaio.	118
Figura 5.57 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos CP da AM12:Pé da Cortina com as foliações perpendiculares ao plano de cisalhamento do ensaio.	118
Figura 5.58 – Pares de tensão cisalhante e tensão normal dos CP dos solos residuais de filito do Pé de Montante e Pé da Cortina.	119
Figura 5.59 – Envoltórias de Resistência, considerando os pares de tensões cisalhante e normal dos solos residuais de filito do Pé de Montante e Pé da Cortina.....	119
Figura 5.60 - Representação do ajuste linear por faixas percentílicas aplicado aos resultados integrados dos ensaios de cisalhamento direto.....	122
Figura 5.61 - Envoltórias de resistência obtidas para as amostras em condição natural-pico, apresentadas para os percentis 10%, 50% e 90%.....	123
Figura 5.62 - Envoltórias de resistência obtidas para as amostras em condição embebida-pico, apresentadas para os percentis 10%, 50% e 90%.....	124
Figura 5.63 - Envoltórias de resistência obtidas para o conjunto global de amostras, apresentadas para os percentis 5%, 50% e 95%.....	124
Figura 5.64 - Intervalos da literatura para c' e ϕ' nas condições natural (barras vermelhas) e embebida (barras azuis), com indicação das envoltórias inferior (p_{10}), média (p_{50}) e superior (p_{90}) obtidas por regressão linear.....	125
Figura 5.65 - Corpos de prova cisalhados (solo residual de filito/laranja).	127

Figura 5.66 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Laranja: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a).	127
Figura 5.67 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Laranja: deformação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial específica (ϵ_a).	128
Figura 5.68 - Ensaio CID - Solo Residual de Filito/Laranja: Envoltórias das trajetórias de tensões.	128
Figura 5.69 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Laranja: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a).	129
Figura 5.70 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Laranja: poro pressão (u) versus deformação axial específica (ϵ_a).	129
Figura 5.71 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Laranja: σ_1/σ_3 versus deformação axial específica (ϵ_a).	130
Figura 5.72 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Laranja: parâmetro A versus deformação axial específica (ϵ_a).	130
Figura 5.73 - Ensaio CIU: Envoltórias das trajetórias de tensões.	131
Figura 5.74 - Corpos de prova cisalhados (solo residual de filito/cinza).	132
Figura 5.75 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Cinza: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a).	133
Figura 5.76 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Cinza: deformação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial específica (ϵ_a).	133
Figura 5.77 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Cinza: Envoltórias das trajetórias de tensões.	134
Figura 5.78 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a).	135
Figura 5.79 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: poro pressão (u) versus deformação axial específica (ϵ_a).	135
Figura 5.80 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: σ_1/σ_3 versus deformação axial específica (ϵ_a).	136
Figura 5.81 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: parâmetro A versus deformação axial específica (ϵ_a).	136
Figura 5.82 - Ensaio triaxial drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: Envoltórias das trajetórias de tensões.	137
Figura 5.83 – Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Marron: Trajetória de tensões efetivas (Fonte: Gomes, 2021).	138

Figura 5.84 – Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Marrom: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a) (Fonte: Gomes, 2021).	139
Figura 5.85 – Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Marrom: Envoltórias das trajetórias de tensões (Fonte: Gomes, 2021).	139
Figura 5.86 – Corpos de prova após ruptura no ensaio de compressão triaxial (Fonte: Gomes, 2021).	141
Figura 5.87 – Superfície de ruptura do corpo de prova (Fonte: Gomes, 2021).	141
Figura 5.88 - Ruptura em solo com planos reliquias na Ferrovia de Integração Centro-Oeste, em Goiás: (A) ruptura planar associada à orientação da foliação; (B) talude oposto da mesma seção, sem registro de ruptura.	143
Figura 5.89 - MA01: Sucção vs. Teor de Umidade.	144
Figura 5.90 - MA02: Sucção vs. Teor de Umidade.	145
Figura 5.91 - MA03: Sucção vs. Teor de Umidade.	146
Figura 5.92 - MA04: Sucção vs. Teor de Umidade.	147
Figura 5.93 - MA01 a MA04: Sucção vs. Teor de Umidade.	148
Figura 6.1 - Modelo geológico interpretado a partir da campanha investigação geotécnica (Fonte: Gomes, 2021).	154
Figura 6.2 - Disposição dos instrumentos em planta com vetores de deslocamento horizontal dos inclinômetros (Fonte: Gomes, 2021).	155
Figura 6.3 - Verticais inclinométricas dos instrumentos I-1 e I-3 (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2020a).	157
Figura 6.4 - Verticais inclinométricas dos instrumentos I-2 e I-4 (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2020a).	157
Figura 6.5 - Relação entre instrumentação, investigações geofísicas e as trincas observadas na rodovia (Fonte: Gomes, 2021).	158
Figura 6.6 - Planta baixa MA02, condição logo após ruptura.	160
Figura 6.7 - Seção transversal S1, MA02 (seção em que ocorreu a ruptura do talude).	160
Figura 6.8 - Seção transversal S2, MA02 (seção preservada).	161
Figura 6.9 - Envoltória de resistência de acordo com a norma ABNT NBR 11682:2009.	162
Figura 6.10 - MA02: Retroanálise da ruptura: parâmetros de resistência da envoltória média, definida a partir dos ensaios de cisalhamento direto ($FS \approx 1$).	164
Figura 6.11 - MA02 (km 579+300): Análise de estabilidade da condição anterior à ruptura: parâmetros de resistência da envoltória de projeto proposta pela norma ($FS < 1$, inconsistente).	165

Figura 6.12 – Vista aérea do MA03, com registro dos processos erosivos mobilizando em solos com as colorações que foram ensaiados.....	166
Figura 6.13 - Relevo e indicação da língua de colúvio (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2018).....	168
Figura 6.14 - Perfil geotécnico do maciço (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2018).	168
Figura 6.15 - Modelo geológico-geotécnico do mecanismo de deslizamento do maciço MA04 (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2018).....	169
Figura 6.16 - Seção com N.A. máximo e mínimo, MNA de referência, inclinometria e a superfície de deslizamento (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2018).	170
Figura 6.17 - Resultado do estudo de retroanálise.	170
Figura 6.18 - Seção transversal com indicação do perfil geotécnico, inclinometria e nível d'água.	172
Figura 6.19 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial do filito (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2020b).....	172
Figura 6.20 – Resultados do estudo de retroanálise na seção adjacente à ruptura (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2020b).....	173
Figura 6.21 – Análise de estabilidade da solução de reforço da contenção (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2020b).....	174

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

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
FS.....	Fator de Segurança
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
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
Ω	Ohm
σ_n	Tensão normal
σ_d	Tensão desviadora ou desvio
σ_1	Tensão normal vertical
σ_3	Tensão de confinamento ou Tensão normal horizontal
γ_{nat}	Massa específica aparente natural
τ	Tensão cisalhante
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo

1 - INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero, localizado na região central de Minas Gerais, reúne uma longa tradição de exploração mineral, inicialmente marcada pelo ciclo do ouro e, a partir do século XX, consolidada como principal polo de produção de minério de ferro do país. Em sua área de cerca de 7.000 km², concentram-se municípios que respondem por aproximadamente 22% da população e 26,8% do PIB de Minas Gerais. Estima-se que, já no início do século passado, mais de 55 milhões de toneladas de minério de ferro eram anualmente extraídas (Castro *et al.*, 2015).

Segundo o Sumário Mineral do Ferro 2024, a produção mundial de minério de ferro beneficiado atingiu 2,53 bilhões de toneladas. O Brasil respondeu por 436,8 milhões de toneladas, o equivalente a 17,3% da oferta global, atrás apenas da Austrália. Minas Gerais foi responsável por 57,7% do volume nacional (ANM, 2024), o que pode ser estimado em cerca de 10% do volume mundial. A participação do estado está diretamente vinculada ao Quadrilátero Ferrífero, onde se concentram as maiores jazidas e empreendimento minerários do país.

Os dados da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) evidenciam a concentração da arrecadação em municípios inseridos no Quadrilátero Ferrífero e em seu entorno imediato. Em 2024, a receita estadual proveniente do minério de ferro ultrapassou R\$ 2,9 bilhões, dos quais a maior parcela foi recolhida em Conceição do Mato Dentro, Congonhas, Itabira, Itabirito, São Gonçalo do Rio Abaixo, Mariana, Nova Lima, Brumadinho, Belo Vale e Ouro Preto (ANM, 2024). Esse resultado está diretamente associado às características geológicas da região.

Nesse contexto, a compreensão do comportamento geotécnico dos maciços terrosos residuais que compõem o Quadrilátero Ferrífero torna-se essencial, sobretudo em áreas que apresentam obras de infraestrutura, ocupação antrópica e obras lineares. Os solos residuais jovens derivados de alteração de filito, doravante denominados simplesmente como solos residuais de filito, são marcados por anisotropia estrutural, sensibilidade à saturação e recorrência de instabilidades, e reforçam a necessidade de investigações específicas que considerem as particularidades geológicas e geotécnicas da região.

1.1 - MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado na porção central de Minas Gerais, constitui uma das províncias minerais mais importantes do Brasil e do mundo. Essa região abriga as principais jazidas de minério de ferro do país e responde por parcela expressiva do Produto Interno Bruto estadual e nacional. A intensa exploração mineral atrai, nas últimas décadas, grandes investimentos em infraestrutura, com a implantação e ampliação de rodovias, ferrovias, estradas de acesso, barragens para disposição de rejeitos, canais de drenagem e obras de estabilização de taludes e de encostas. Tais intervenções sustentam o escoamento da produção e o funcionamento de uma cadeia econômica que envolve milhares de empregos diretos e indiretos, tornando o QF um eixo de importância estratégica para a economia brasileira.

Entretanto, as condições geológico-geotécnicas do QF impõem desafios técnicos significativos à engenharia de infraestrutura. A região é dominada por unidades metassedimentares de baixo a médio grau metamórfico, nas quais predomina o filito, uma rocha anisotrópica e estruturalmente fraca, cuja presença condiciona o comportamento de maciços e solos residuais. Apesar de sua aparente resistência durante investigações à percussão, o filito apresenta baixa resistência ao cisalhamento quando solicitado paralelamente à foliação, revelando comportamento fortemente dependente da orientação estrutural. Essa discrepância entre a resposta à sondagem e o desempenho mecânico real tem levado a inúmeros casos de instabilidade em cortes, taludes e fundações ao longo de rodovias e ferrovias, além de problemas em barragens e escavações subterrâneas.

Apesar da ampla ocorrência do filito nos compartimentos geológicos do Quadrilátero Ferrífero, há notável escassez de estudos sistemáticos sobre o seu comportamento geotécnico. Os trabalhos existentes concentram-se, em geral, em análises locais de instabilidade ou retroanálises pontuais de taludes de mineração, frequentemente sem suporte em ensaios laboratoriais detalhados. São raros os estudos que abordam de forma integrada os efeitos mecânicos e hidráulicos da anisotropia, ou que relacionem os resultados de ensaios de campo, laboratório e monitoramentos *in situ*.

Essa lacuna científica é especialmente relevante considerando que o filito é amplamente interceptado por obras de infraestrutura, ferrovias, rodovias, barragens e escavações, e que seu comportamento, fortemente condicionado pela foliação e pelo grau de alteração, pode comprometer a segurança, o desempenho e a durabilidade dessas estruturas. Diante desse contexto, esta dissertação busca contribuir para o entendimento do comportamento dos solos residuais de filito por meio de uma abordagem experimental e analítica integrada, voltada à

quantificação dos efeitos da anisotropia e ao fornecimento de subsídios técnicos para o projeto e o monitoramento de obras em terrenos filíticos. Espera-se, assim, reduzir incertezas e apoiar práticas de engenharia em regiões de maior complexidade estrutural.

As causas dessa vulnerabilidade estão diretamente relacionadas à origem tectônica do Quadrilátero Ferrífero, cuja evolução geológica envolveu múltiplos eventos de dobramento e metamorfismo que transformaram rochas sedimentares em metassedimentares foliadas. No caso dos filitos, o tectonismo regional promoveu intensa reorientação mineral, resultando em planos de fraqueza contínuos e paralelos, que definem uma anisotropia mecânica acentuada. Essa anisotropia torna o comportamento do filito dependente da orientação de carregamento e das condições de saturação, podendo reduzir drasticamente sua resistência em direções específicas. A complexidade estrutural do QF é reforçada pela variabilidade espacial da foliação. Sua direção e mergulho podem variar em curtas distâncias, dificultando o mapeamento detalhado e o controle geotécnico de campo.

A instabilidade de taludes de cortes em solo residual de filito representa, portanto, não apenas um problema técnico, mas também um desafio socioeconômico, dado o custo elevado das intervenções corretivas e os riscos associados a deslizamentos em obras de infraestrutura, destacando-se as viárias e as minerárias. Compreender o comportamento mecânico e hidráulico desse material é essencial para o planejamento seguro de empreendimentos em uma das regiões mais produtivas do país.

A investigação foi conduzida a partir da caracterização detalhada de maciços representativos no Quadrilátero Ferrífero, associando ensaios de laboratório e de campo a programas de instrumentação geotécnica. Foram realizados ensaios de caracterização física, permeabilidade, cisalhamento direto, compressão triaxial, papel filtro, ensaio do furo de agulha (*pinhole test*), desagregação, dispersão, Inderbitzen modificado e fluorescência de raios X, permitindo analisar a influência da estrutura anisotrópica nas propriedades mecânicas e hidráulicas. Paralelamente, programas de monitoramento com inclinômetros, piezômetros Casagrande, medidores de nível d'água e registros pluviométricos foram implantados em diferentes maciços de amostragem, viabilizando a observação do comportamento *in situ* sob diferentes condições de umidade e recarga.

Os resultados obtidos revelam que a anisotropia é um fator determinante no desempenho geotécnico dos solos residuais derivados do filito, influenciando de forma integrada seu comportamento mecânico e hidráulico. A anisotropia condiciona a resistência ao cisalhamento, a deformabilidade, a condutividade hidráulica e os padrões de fluxo, além de modular a resposta do solo às variações do estado de umidade, especialmente pelos efeitos da sucção, que alteram

significativamente a rigidez e a resistência não saturada do maciço. A pesquisa demonstra, ainda, que, em materiais anisotrópicos, ensaios convencionais sofisticados, como o triaxial, podem não ser os mais representativos, enquanto métodos mais simples, como o cisalhamento direto, permitem melhor controle da orientação do plano de ruptura em relação à foliação. Esses achados reforçam a importância da observação das estruturas geológicas em campo e da integração entre ensaios, mapeamento e monitoramento.

Em síntese, esta dissertação busca não apenas contribuir para a compreensão do comportamento de um solo residual específico, mas também estabelecer diretrizes metodológicas aplicáveis a outros materiais anisotrópicos, ampliando o conhecimento sobre a interação entre estrutura geológica e desempenho geotécnico. A relevância científica e a prática do tema estão diretamente ligadas à segurança e à durabilidade das obras implantadas no Quadrilátero Ferrífero, uma região que concentra boa parte da infraestrutura crítica do país e cuja estabilidade é impactante para a economia nacional.

1.2 - OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o comportamento geotécnico de solos residuais derivados de alteração de filito no Quadrilátero Ferrífero, com ênfase nos efeitos da anisotropia estrutural sobre os parâmetros mecânicos e hidráulicos. Busca-se compreender a influência da foliação reliquiar nas respostas de resistência, deformabilidade e estabilidade de maciços terrosos e obras associadas.

Em relação aos objetivos específicos, pretende-se:

- Caracterizar o contexto geológico-geotécnico do Quadrilátero Ferrífero, destacando a ocorrência e as propriedades dos solos residuais de alteração de filitos;
- Apresentar resultados de ensaios laboratoriais de caracterização física, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e comportamento hidráulico, considerando diferentes orientações em relação à foliação;
- Avaliar a influência da anisotropia sobre os parâmetros de resistência obtidos em ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial;
- Correlacionar as propriedades laboratoriais com dados de instrumentação de campo (inclinômetros, piezômetros e medidores de nível d'água);
- Discutir o comportamento global dos maciços instrumentados, integrando resultados de ensaios, monitoramentos e observações estruturais;

1.3 - METODOLOGIA

A metodologia adotada compreende três etapas principais: (i) caracterização geológica e seleção dos maciços de estudo, (ii) investigação geotécnica de campo e laboratório, e (iii) análise e interpretação integrada dos resultados.

Na primeira etapa, foram selecionados maciços representativos localizados em trechos de rodovias inseridas no Quadrilátero Ferrífero, onde o filito ocorre em condições típicas de alteração. O levantamento geológico incluiu observações de campo, descrição estrutural e identificação das atitudes das foliações. Essa etapa permitiu relacionar a orientação estrutural dos planos de fraqueza às condições geomorfológicas locais e às obras existentes.

Na segunda etapa, foram realizados ensaios laboratoriais em amostras indeformadas e deformadas para determinação das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas, abrangendo os seguintes métodos: caracterização física, permeabilidade, cisalhamento direto, compressão triaxial, papel filtro, ensaio do furo de agulha, desagregação, dispersão, Inderbitzen modificado e espectrometria de fluorescência de raios X. Paralelamente, desenvolveu-se instrumentação geotécnica nos maciços, incluindo inclinômetros, piezômetros Casagrande, medidores de nível d'água e aquisição de dados pluviométricos, com o objetivo de monitorar deslocamentos, oscilações do lençol freático e correlações com a precipitação.

Os ensaios laboratoriais e as sondagens utilizados neste estudo foram executados em trabalhos anteriores, desenvolvidos por outros pesquisadores, cujos dados são aqui incorporados com a devida referência. Embora o autor não tenha executado os ensaios, todos os resultados empregados foram obtidos conforme metodologias consagradas e normas técnicas aplicáveis.

Na terceira etapa, os resultados de campo e de laboratório foram integrados, permitindo avaliar o papel da anisotropia na resistência ao cisalhamento e na permeabilidade do material. Essa abordagem combinada forneceu subsídios para compreender os mecanismos de instabilidade e para validar a aplicabilidade dos métodos de ensaio em materiais anisotrópicos de origem filítica.

1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em oito capítulos, estruturados de forma a conduzir o leitor da contextualização teórica e regional até a análise integrada dos resultados experimentais e observacionais, conforme descrito a seguir:

Capítulo 1 - Introdução: apresenta a motivação da pesquisa, o objetivo geral e específicos, a metodologia empregada e a estrutura da dissertação. Esse capítulo situa o leitor quanto à relevância técnica, científica e socioeconômica do estudo sobre o comportamento de solos residuais de filito no Quadrilátero Ferrífero.

Capítulo 2 - Revisão da Literatura e Fundamentação Teórica: reúne a base conceitual necessária à compreensão do tema, abordando a geologia e a geomorfologia do Quadrilátero Ferrífero, as formações litológicas predominantes, a origem e as propriedades dos filitos, bem como seus parâmetros geomecânicos e modos de ruptura.

Capítulo 3 - Caracterização dos Maciços em Estudo: descreve o contexto geológico-geotécnico dos locais analisados, situados em diferentes trechos do Quadrilátero Ferrífero. Apresenta as condições geomorfológicas, a estratigrafia local, as sondagens executadas e as observações de campo realizadas em cada maciço de amostragem (MA01 a MA05).

Capítulo 4 - Materiais e Métodos: detalha os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, incluindo a instrumentação geotécnica de campo, os métodos de monitoramento (inclinometria, piezometria, medição de nível d'água e dados pluviométricos) e os ensaios laboratoriais realizados (caracterização física, permeabilidade, cisalhamento direto, triaxial, papel filtro, pinhole, desagregação, dispersão, Inderbitzen modificado e espectrometria de fluorescência de raios X).

Capítulo 5 - Resultados e Discussões - Dados de Ensaio: reúne e analisa os resultados obtidos em laboratório e nas investigações de campo. Inclui dados de caracterização física e química, ensaios de resistência e permeabilidade, além de informações provenientes de sondagens e observações complementares. O capítulo discute o comportamento do solo residual de filito frente à anisotropia, destacando a influência da orientação da foliação sobre os parâmetros de resistência e deformabilidade.

Capítulo 6 - Resultados e Discussões - Dados de Monitoramento dos Maciços: apresenta e interpreta os resultados obtidos a partir da instrumentação geotécnica implantada nos maciços de amostragem. São analisados deslocamentos medidos por inclinômetros, oscilações do lençol freático, registros pluviométricos e correlações entre eventos de chuva e variação de pressões neutras. A integração desses dados permite compreender o comportamento real dos maciços sob condições naturais de campo.

Capítulo 7 - Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras: apresenta as principais conclusões obtidas e as contribuições do estudo para a compreensão dos materiais anisotrópicos do Quadrilátero Ferrífero. Indica recomendações para a prática geotécnica e propõe direções

para novas pesquisas voltadas à análise de estabilidade, durabilidade e monitoramento de obras em solos residuais derivados de rochas foliadas.

2 - REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura e a fundamentação teórica que embasam o desenvolvimento deste trabalho, estabelecendo os principais conceitos utilizados ao longo da dissertação.

2.1 - EVOLUÇÃO TECTÔNICA E UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

O Quadrilátero Ferrífero localiza-se na porção central de Minas Gerais no limite sudeste do Cráton do São Francisco. Trata-se de uma província geológica conhecida pela abundância de minério de ferro e ouro, onde afloram lado a lado rochas de idades Arqueanas e Paleoproterozóicas, evidenciando uma evolução geológica complexa com múltiplos eventos tectônicos superpostos. Essa evolução registrou a transição de um ambiente de alta mobilidade tectônica no Arqueano para condições crustais mais estáveis no Proterozóico. Em linhas gerais, a história geológica do QF iniciou-se com a formação de bacias vulcano-sedimentares no final do Arqueano, seguidas por bacias sedimentares no Paleoproterozóico (com pouco ou nenhum vulcanismo), que foram subsequentemente afetadas por orogenias com dobramentos e metamorfismo, resultando na formação de cadeias montanhosas. O soerguimento e a exposição dessas cadeias levaram a intensos processos erosivos, aplainando o relevo e fechando ciclos tectônicos que se repetiram em novas fases de bacia, orogênese e erosão. Conforme estudos de John V. N. Dorr (1969) e Stephen Marshak e Fernando Flecha de Alkmim (1989), essa sequência de eventos no QF reflete múltiplos ciclos de sedimentação e deformação ao longo do tempo geológico. As consequências são terrenos de idades e naturezas distintas justapostos no QF, produto de processos geológicos complexos e superpostos desde o Arqueano até o Proterozóico. A evolução estratigráfico-tectônica resumida por Dorr (1969) e por Marshak e Alkmim (1989) é apresentada na Figura 2.1, a qual destaca a passagem de bacias arqueanas para a sedimentação paleoproterozóica e as fases orogênicas subsequentes.

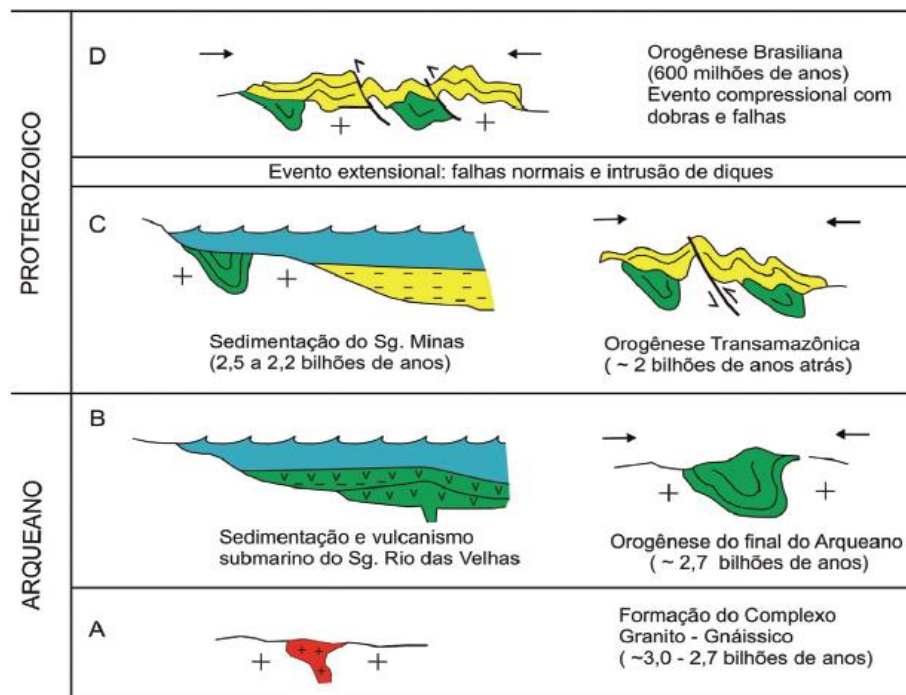
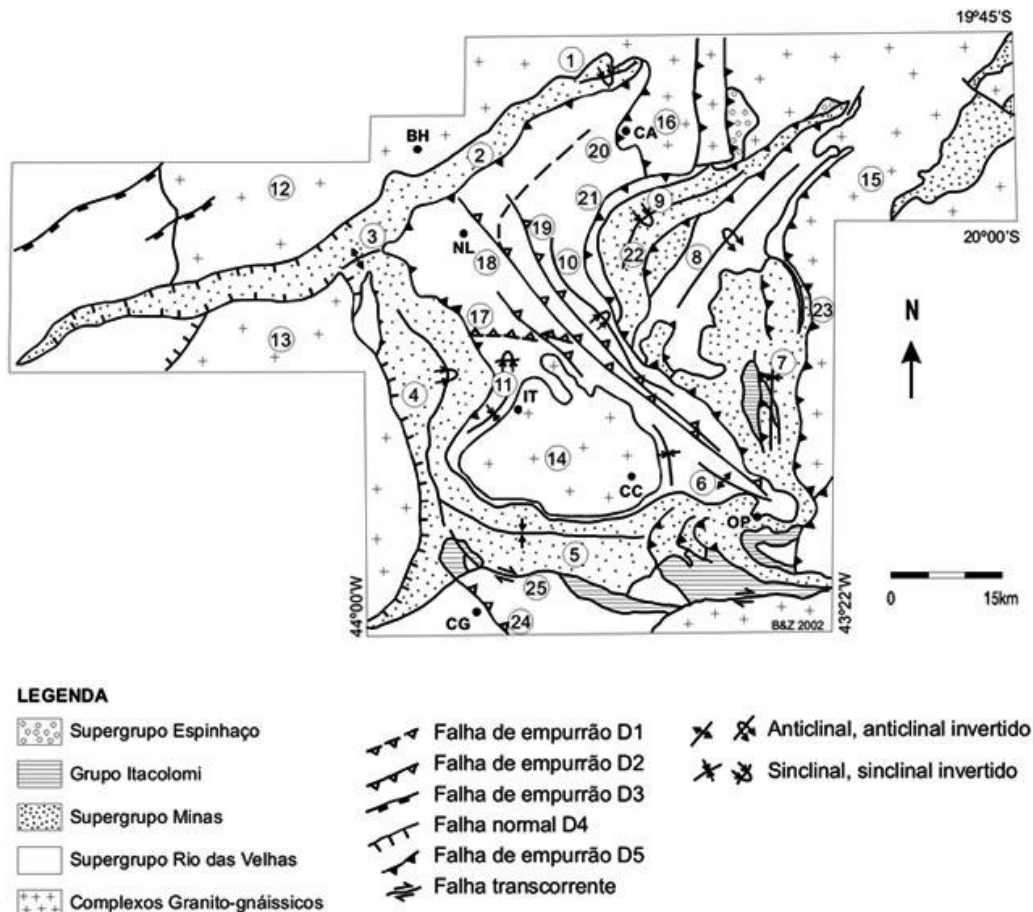


Figura 2.1 - Quadro síntese da evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969; Marshak; Alkmim, 1989)

Atualmente, as rochas da região são agrupadas em três unidades litoestratigráficas principais com base em suas características e idades: o Complexo Granito-Gnáissico, o Supergrupo Rio das Velhas (ambos de idade arqueana, ~3,0 a 2,5 Ga) e o Supergrupo Minas (idade paleoproterozóica, ~2,5 a 2,0 Ga). Essas unidades formadas em tempos distintos foram mais tarde aproximadas tectonicamente e parcialmente sobrepostas, compondo a colagem geológica observada na região. A Figura 2.2 ilustra de forma simplificada a distribuição dessas unidades e as principais feições tectônicas do Quadrilátero Ferrífero (dobras e falhas), conforme compilado por Sanglard *et al.* (2014). As rochas arqueanas (Complexo Granito-Gnáissico e Rio das Velhas) afloram preferencialmente nas porções centrais e no embasamento do QF, geralmente em áreas de relevo mais baixo devido à maior suscetibilidade à erosão. Já as rochas do Supergrupo Minas ocupam as serras e cristas proeminentes, pois incluem litologias mais resistentes ao intemperismo, como quartzitos e formações ferríferas bandadas (itabiritos).



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 Andaimes. Complexos granito-gnáissicos: 12 - Belo Horizonte, 13 - Bonfim, 14 - Bação, 15 - Santa Bárbara, 16 - Caeté. Falhas: 17 - Bem-Te-Vi, 18 - São Vicente, 19 - Raposas, 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 2.2 - Feições estruturais do Quadrilátero Ferrífero (Baltazar; Zuchetti, 2007 modificado de Chemale JR. *et al.*, 1994).

O Complexo Granito-Gnáissico constitui o embasamento cristalino do Quadrilátero Ferrífero, aflorando tanto em núcleos centrais quanto nas bordas da província. É formado predominantemente por gnaisses bandados de composição tonalítica a granodiorítica, geralmente migmatíticos, compostos por bandas claras, ricas em quartzo e feldspato, e bandas escuras, ricas em biotita, originadas por metamorfismo e deformação de rochas graníticas. Associam-se a esse conjunto intrusões graníticas arqueanas e diques máficos metamorfizados, representados por gabros e diabásios, que cortam as rochas mais antigas. Durante o Arqueano, esse embasamento sofreu soerguimentos e deformações que originaram domos gnáissicos

circundados por bacias vulcano-sedimentares, configurando uma típica província de “domos e quilhas” arqueanas (Hasui *et al.*, 2012).

O Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, é constituído por rochas vulcânicas e sedimentares, frequentemente de origem submarina, nas quais são observadas estruturas típicas de vulcanismo subaquático, como as *pillow*-lavas, formadas pelo resfriamento rápido do magma basáltico em contato com a água do mar. Essas sequências vulcanossedimentares foram posteriormente submetidas a processos orogênicos, resultando em metamorfismo e dobramentos que originaram diferentes tipos de xistos. O Supergrupo compreende duas unidades principais: o Grupo Nova Lima, basal, composto por rochas vulcânicas e sedimentares metamorfizadas em baixo grau, incluindo metaperidotitos, serpentinitos, enstatitos, basaltos, metapelitos e formações ferríferas bandadas; e o Grupo Maquiné, no topo da sequência, constituído predominantemente por quartzitos, metaconglomerados e filitos subordinados (Hasui *et al.*, 2012).

O Supergrupo Minas, de idade paleoproterozóica, corresponde a uma sequência sedimentar que recobre discordantemente as rochas arqueanas do Complexo Granito-Gnáissico e do Supergrupo Rio das Velhas. Essa sequência registra a transição de ambientes continentais clásticos na base para marinhos rasos e profundos no topo, refletindo importante evolução paleogeográfica durante o Paleoproterozóico. Segundo Dorr (1969), o Supergrupo Minas é subdividido, do mais antigo para o mais jovem, nos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. Contudo, alguns autores, como Hasui *et al.* (2012), englobam as unidades Tamanduá e Caraça sob a denominação Grupo Caraça. Em linhas gerais, o Supergrupo Minas compreende uma unidade clástica basal (Grupo Caraça), uma unidade química intermediária (Grupo Itabira) e uma unidade clástica de topo (Grupo Piracicaba). O contato entre os dois primeiros grupos é transicional, enquanto o limite inferior do Grupo Piracicaba é erosivo, indicando uma importante discordância intraformacional. A seguir, resumem-se seus principais grupos e formações, com ênfase nas ocorrências de filitos:

Os grupos Tamanduá e Caraça formam a base estratigráfica do Supergrupo Minas no Quadrilátero Ferrífero, registrando os estágios iniciais da sedimentação paleoproterozóica sobre o embasamento arqueano do Cráton do São Francisco. São compostos por arenitos quartzíticos e conglomerados basais (Grupo Caraça, Formação Moeda; e Grupo Tamanduá, onde reconhecido), que evoluem para filitos e itabiritos no topo (Formação Batatal e transição para o Grupo Itabira). Segundo Hasui *et al.* (2012), o Grupo Caraça apresenta, na base, quartzitos com intercalações de filito e níveis conglomeráticos, passando de modo transicional para a Formação Batatal, composta predominantemente por filitos sericíticos, localmente carbonosos

ou ferruginosos. Essas unidades correspondem a depósitos essencialmente clásticos (Dorr, 1969), acumulados em ambientes aluviais a marinhos rasos, associados à instalação de uma bacia de plataforma continental em contexto extensional (Alkmim e Marshak, 1998).

O Grupo Itabira sucede o Grupo Caraça e constitui a principal unidade de natureza química do Supergrupo Minas. É composto predominantemente por formações ferríferas obandadas (itabiritos) quartzosos e dolomíticos da Formação Cauê e por rochas carbonáticas da Formação Gandarela, compostas principalmente por dolomitos e mármore, com intercalações subordinadas de filitos sericíticos e ferruginosos (Dorr, 1969; Rosière e Chemale JR., 2000; Hasui *et al.*, 2012). O contato inferior é transicional, marcando a passagem dos depósitos clásticos do Grupo Caraça para os sedimentos químicos marinhos do Itabira. De acordo com Rosière e Chemale Jr. (2000), as litofácies do Grupo Itabira refletem um ambiente marinho de plataforma rasa a relativamente profunda, marcado por alternância de fácies deposicionais e influência de processos diagenéticos e metamórficos subsequentes.

O Grupo Piracicaba engloba as unidades de topo do Supergrupo Minas, correspondentes a sedimentos clásticos depositados após uma importante lacuna erosiva. Suas principais formações são a Formação Cercadinho, caracterizada pela alternância de quartzitos e filitos ferruginosos, e a Formação Fecho do Funil, composta por filitos quartzosos, filitos dolomíticos e lentes de dolomito puro. Essas unidades indicam deposição em ambientes de leques submarinos e plataforma marinha, com significativa participação de pelitos carbonosos e vulcano-sedimentares que, após o metamorfismo, originaram os filitos atualmente observados (Hasui *et al.*, 2012; Endo *et al.*, 2019). Acima do Grupo Piracicaba ocorre localmente o Grupo Itacolomi, de idade neoproterozóica, que marca a última fase de sedimentação pré-cenozóica da região.

2.2 - ARQUITETURA ESTRUTURAL E DEFORMAÇÃO REGIONAL

Do ponto de vista estrutural, o Quadrilátero Ferrífero apresenta uma arquitetura tectônica complexa, resultado principalmente da Orogenia Transamazônica (Paleoproterozóico, ~2,1 Ga) que deformou intensamente as sequências do Supergrupo Minas e as encaixou sobre o embasamento arqueano. Marshak e Alkmim (1989) identificaram pelo menos quatro fases de deformação, incluindo fases compressivas iniciais seguidas de eventos extensionais tardios, responsáveis por reativações de falhas e dobras anteriores na região sul do Cráton do São Francisco. Tais eventos resultaram em um empilhamento de camadas rochosas e zonas de cisalhamento de baixo ângulo que configuram um sistema de nappes no QF. Em termos gerais, as estruturas tectônicas do Quadrilátero são dominadas por dobras regionais de

grande porte, falhas reversas e transcorrentes, e zonas de cisalhamento sub-horizontais separando pacotes litológicos.

Dentre as dobras de primeira ordem, destaca-se a Sinclinal Moeda, uma megaestrutura sinformal aproximadamente N-S com cerca de 40 km de extensão, que se conecta ao alinhamento da Serra do Curral ao norte e à Sinclinal Dom Bosco ao sul. Essa dobradura envolve as formações basais do Grupo Caraça (quartzitos da Moeda e filitos do Batatal) e configura a típica estrutura em “barco” visível na paisagem regional. Segundo Dorr (1969), o núcleo da Sinclinal Moeda expõe as rochas arqueanas do Complexo Bação (Granito-Gnáissico) envoltas pelas rochas metassedimentares mais jovens nos flancos. Costa (2009) descreve que o flanco oeste da Sinclinal Moeda é bastante regular, com mergulhos de 40-55° para leste ao longo do eixo principal N-S, apresentando inflexões locais e uma série de falhas normais cortando o bandamento. Outras dobras regionais importantes incluem a Sinclinal Gandarela, Sinclinal Santa Rita, Anticlinal da Serra do Curral, Anticlinal Conceição, entre várias identificadas em mapeamentos estruturais. Em cortes de taludes e afloramentos, é comum observar dobras menores associadas a essas grandes estruturas, evidenciando a deformação em múltiplas escalas.

As falhas e zonas de cisalhamento também são recorrentes. O QF é cortado por importantes falhas de empurrão de baixo ângulo, que deslocaram blocos de rochas sobre outros durante a compressão paleoproterozóica. Essas superfícies de cisalhamento sub-horizontais separam, por exemplo, unidades do Supergrupo Minas do embasamento, caracterizando o empilhamento *nappe*. Um exemplo é a Nappe Curral, identificada na porção oeste do QF, onde camadas do Supergrupo Minas foram transportadas sobre o embasamento ao longo de soleiras de cisalhamento. Sanglard *et al.* (2014) argumentam que zonas de cisalhamento localizadas nos contatos litológicos, por exemplo, entre quartzitos e filitos, podem ser atribuídas a mecanismos de deslizamento flexural, em que, durante a curvatura das dobras, as camadas mais competentes deslizaram sobre as menos competentes, concentrando deformação nos flancos das dobras associadas a falhas de baixo ângulo. Em tais casos, a deformação tende a se concentrar nas camadas mais dúcteis (como filitos) nos flancos das dobras, aliviando tensão, enquanto o núcleo permanece relativamente menos deformado (Ramsay e Huber, 1987).

Cabe destacar que os dobramentos variam conforme a litologia envolvida. Em unidades de comportamento mais dúctil, como os itabiritos bandados, mármore e dolomitos da Formação Gandarela, as dobras tendem a ser apertadas a isoclinais, com comprimentos de onda menores e grandes amplitudes. Já em litologias mais competentes e resistentes, como os quartzitos espessos, como a Formação Moeda, predominam dobras de perfil mais aberto, com

ângulos de charneira maiores e menor encurtamento. Esse comportamento diferencia dobras fechadas localizadas em encostas de morros com rochas mais macias, de dobras amplas controlando serras quartzíticas, por exemplo (Castro *et al.*, 2020). Além disso, muitas das falhas regionais no QF, como a Falha do Paraopeba, Falha de Congonhas, Falha do Rio das Velhas, entre outras, apresentam componentes transcorrentes que segmentam as estruturas dobradas e influenciam a compartimentação dos terrenos. O resultado global é uma arquitetura em que mantos de rochas mais antigas e mais rígidas enquadram sinclínios preenchidos por rochas mais jovens, tudo intensamente deformado por dobras e falhas múltiplas.

Do ponto de vista prático, essa herança tectônica condiciona a anisotropia estrutural regional, criando famílias de planos preferenciais de fraqueza (foliações, estratificações, zonas de cisalhamento) que controlam diversos aspectos geotécnicos do terreno, como a estabilidade de encostas e a circulação de água subterrânea. Por exemplo, as dobras geram fraturas de tração e planos de cisalhamento reliquiar, que atuam como caminhos preferenciais para infiltração de água ou como superfícies predispostas a movimentos de massa.

2.3 - FILITOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Os filitos constituem uma litologia metamórfica de baixo grau bastante comum no Quadrilátero Ferrífero e ocorrem em diversas formações do Supergrupo Minas, como nos grupos Caraça, Itabira e Piracicaba, e em partes do Supergrupo Rio das Velhas. Petrográfica e estruturalmente, o filito é caracterizado por uma textura foliada fina a muito fina, com brilho acetinado, típica de metamorfismo regional de baixo grau, correspondente a fácies xisto verde. Sua foliação característica é resultado do alinhamento planar de minerais como sericita, muscovita, clorita e, ocasionalmente, filossilicatos como illita, além de quartzo muito fino. Essa descontinuidade metamórfica corresponde ao principal plano de fraqueza da rocha: superfícies paralelas ou levemente onduladas que refletem a deformação sofrida e a recristalização preferencial de minerais planos (Press, 2006).

Os filitos formam-se tipicamente pela metamorfização de protólitos pelíticos ou vulcanoclásticos finos, como argilitos, siltitos ou depósitos de cinzas vulcânicas finamente depositadas. No Quadrilátero Ferrífero, evidências sugerem as duas origens em diferentes unidades. Os filitos sericíticos, presentes, por exemplo, na Formação Batatal e em camadas do Grupo Sabará, indicam protólitos possivelmente derivados de cinzas vulcânicas ou tufos félsicos depositados em ambiente sedimentar. Já outros filitos, como os filitos grafíticos e filitos ferruginosos, apontam para protólitos sedimentares argilosos ricos em matéria orgânica ou óxidos de ferro, respectivamente, possivelmente lama orgânica depositada em ambiente

anóxico ou argilas ferríferas em plataforma rasa (Costa, 2009). Há ainda os filitos dolomíticos, encontrados na Formação Fecho do Funil e Gandarela, cuja composição mineral inclui carbonatos (dolomita, calcita) disseminados na matriz filítica, sob baixo grau de metamorfismo. Em termos mineralógicos gerais, os filitos do QF contêm predominantemente filossilicatos finos (micas como muscovita/sericita e clorita), quartzo muito finamente granulado e, dependendo do tipo, podem incluir grafita (grafitosos), hematita/goethita dispersa (ferruginosos, conferindo coloração avermelhada ou parda) e carbonatos microgranulares (dolomíticos). Essa mineralogia confere aos filitos sua coloração típica variando de cinza esverdeado a negro ou pardo-avermelhado, bem como a superfície foliada com brilho sedoso devido à mica.

A foliação define o principal plano de fraqueza nos filitos, controlando sua anisotropia. Além da foliação principal, filitos podem apresentar outras descontinuidades geradas por deformação: planos de fratura subverticais e bandamento composicional herdado. Entretanto, como a granulação é fina, geralmente a anisotropia intrínseca está dominada pelos planos de foliação. Os filitos exibem uma anisotropia transversalmente isotrópica aproximada, ou seja, propriedades muito diferentes paralelamente *versus* perpendicularmente aos planos foliados. No contexto geológico-geotécnico do QF, é relevante distinguir dois tipos de filitos quanto à homogeneidade interna: (a) Filitos homogêneos, que possuem composição e textura relativamente uniformes em toda a massa (por exemplo, um filito sericítico puro, de granulação uniforme); e (b) Filitos heterogêneos, nos quais há variações composicionais ou estruturais internas, como finas camadas ou lentes de quartzo, óxidos de ferro, veios carbonáticos ou mudanças graduais de mineralogia. Os filitos heterogêneos, frequentemente resultantes de variações sedimentares primárias ou fluxos vulcanoclásticos diferenciados, tendem a apresentar anisotropia mecânica mais pronunciada, pois, além da foliação metamórfica, há superfícies de contraste de competência interna. Em contraste, filitos homogêneos respondem de maneira mais uniforme, embora ainda anisotrópica, já que todos os planos paralelos compartilham propriedades semelhantes.

Na literatura regional, diversos autores caracterizaram os filitos do Quadrilátero Ferrífero. Hasui *et al.* (2012), ao tratarem da geologia de Minas Gerais, descrevem que formações como Cercadinho e Batatal abrigam filitos finamente laminados, produto de metamorfismo baixo, frequentemente exibindo clivagem bem definida a olho nu. Luís Otávio R. Santiago (2008) identificou que os filitos residuais do QF apresentam texturas de grãos majoritariamente siltosos, com menores porções de areia fina e argila. Essa granulometria residual reflete a mineralogia de origem e implica em certas características de permeabilidade

e coesão. Leão *et al.* (2017) realizaram caracterização mineralógica e física de filitos da região, constatando a presença de famílias de fraturas aproximadamente ortogonais entre si e paralelas às foliações existentes na rocha intacta. Essas descontinuidades tendem a aumentar conforme o grau de alteração avança: com o intemperismo, o espaçamento entre fraturas diminui e a abertura e a persistência delas aumentam. Muitas dessas fraturas acabam preenchidas por precipitados tardios, como óxidos e hidróxidos de ferro ou quartzo recristalizado, o que indica circulação de fluidos ao longo dos planos de fraqueza. Em última instância, a combinação de foliação original e fraturamento secundário leva o filito a se fragmentar em lâminas conforme a alteração química e mecânica progride. Isso explica por que, em campo, blocos de filito intemperizado muitas vezes se partem facilmente em folhas finas paralelas.

No local de estudo específico desta dissertação, por exemplo, observa-se um solo originado de filito, residual jovem, com foliação reliquiar bem desenvolvida. A Figura 2.3 apresenta uma amostra desse solo residual de filito, onde se notam claramente os planos de foliação destacados e a facilidade com que o material pode ser escavado devido a essa estrutura planar. Durante a extração de blocos indeformados no campo, verificou-se que o solo filítico intemperizado tende a descolar ao longo dos planos folhados com mínimo esforço, exigindo muito cuidado na moldagem de corpos de prova cilíndricos, em diversas ocasiões as amostras se partiam espontaneamente seguindo um plano de fraqueza, mesmo sob manuseio moderado. Essa característica reflete a herança estrutural do filito no solo residual: embora seja tecnicamente um solo, ele mantém a anisotropia e estrutura laminar do protólito metamórfico. Conforme a classificação de grau de intemperismo de maciços proposta pela ISRM (2015), o material observado se enquadra como solo residual completo, toda a rocha original converteu-se em solo, já não produz som claro sob percussão de martelo geológico e pode ser facilmente riscado em profundidade pela ponta do martelo. Em suma, os filitos da região, mesmo quando alterados, guardam a assinatura de foliação e devem ser descritos cuidadosamente em termos de orientação desses planos, pois disso decorrem propriedades distintas no sentido paralelo ou perpendicular a eles.



Figura 2.3 - Filito encontrado no QF com planos de foliação bem definidos (Fonte: Gomes, 2021).

2.4 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS FILITOS E SOLOS RESIDUAIS DERIVADOS

Do ponto de vista geomecânico, os filitos e seus solos residuais no Quadrilátero Ferrífero exibem um comportamento marcado pela anisotropia e pela influência do intemperismo. A presença da foliação metamórfica impacta diretamente propriedades como resistência, deformabilidade e durabilidade do material exposto. Ensaio geotécnicos realizados em filitos da região comprovam a forte influência da orientação da foliação nas propriedades de resistência e rigidez. Por exemplo, Pimentel (2005) observou que a capacidade de suporte de maciços filíticos pode ser baixa quando solicitada paralelamente à foliação, mas elevada quando a carga atua perpendicularmente aos planos foliados. Isso significa que taludes ou fundações orientados de modo a cortar perpendicularmente o bandamento foliado encontram maior resistência, ao passo que solicitações ao longo das camadas podem provocar planos de

ruptura mais facilmente. O mesmo autor ressalta que a escavabilidade dos filitos varia de fácil a difícil dependendo da orientação dos planos: quando a escavação se dá paralelo à foliação, o material é facilmente removido; já se a escavação tentar cortar vários planos, a resistência aumenta.

Os filitos, por sua própria natureza mineralógica e pela presença de foliações, possuem uma certa vulnerabilidade à ação da água. Santiago (2008), em sua tese de doutorado, verificou que, ao serem expostos a ciclos de umedecimento e secagem, os filitos do QF sofrem degradação significativa de suas características físicas e mecânicas. Em ensaios de laboratório envolvendo imersão, o autor constatou uma redução expressiva da resistência ao cisalhamento com o aumento da absorção de água e da porosidade, acompanhada de decréscimo da densidade aparente do material. Uma boa correlação foi verificada entre a perda de resistência e o aumento do teor de água/poros, indicando que a umidade é um fator crítico de instabilização para esses solos residuais. No entanto, é interessante notar que, apesar de sensíveis à umidade, os filitos estudados por Santiago (2008) não apresentaram tendências significativas de colapso ou expansividade volumétrica em contato com água. Ensaio edométrico mostraram variações de adensamento praticamente imperceptíveis ao saturar as amostras, sugerindo ausência de comportamento colapsível ou expansivo apreciável. A análise mineralógica de apoio (DRX e MEV) confirmou que não há argilominerais expansivos na composição do filito residual, explicando a inexistência de fenômenos de inchamento ou colapso por molhagem.

No campo, esses efeitos se traduzem em problemas geotécnicos característicos. Parizzi et al. (2011), ao avaliarem a estabilidade de taludes em Belo Horizonte, observaram que, quando os filitos estão muito alterados, tornam-se bastante suscetíveis à erosão superficial e a movimentos de massa rasos. A erosão frequentemente progride preferencialmente ao longo dos planos de descontinuidade, sejam eles planos de foliação, de fratura ou interfaces entre camadas. A Figura 2.4 ilustra um exemplo real de processos erosivos intensos na face de um talude em solo residual de filito poucos dias após sua escavação e exposição, onde surgiram sulcos profundos acompanhando a estrutura foliada. Dilásccio (2005) nota que taludes escavados em filitos no QF frequentemente exibem mecanismos de instabilização não usuais, diferindo de um escorregamento circular clássico, eles tendem a apresentar rupturas planas ao longo de superfícies folheadas, deslizem em cunha na interseção de dois planos de fraqueza, ou escoamentos superficiais rápidos de material detrítico fino após chuvas intensas. Esses modos de falha peculiares reforçam a necessidade de se considerar a anisotropia e o grau de alteração nos estudos de estabilidade.



Figura 2.4 - Processos erosivos na face do talude de corte localizado na BR-040 no QF.

Parizzi (2011) destaca que rochas pouco resistentes ao intemperismo, como filitos e certos dolomitos, dão origem a relevos deprimidos ou aplainados ao longo do tempo, ou seja, áreas de vale e baixadas, onde tendem a se concentrar solos espessos e mais instáveis. Pimentel (2005) complementa que os depósitos de solo residual de filito, comumente encontrados ao pé de encostas ou em fundos de vale no QF, são altamente suscetíveis à erosão e a escorregamentos, justamente por se tratar de materiais já enfraquecidos cujas estruturas herdadas da rocha (foliações, fraturas) atuam como controladores dos processos de instabilização.

A compreensão integrada dessas características geológico-geotécnicas é essencial para o planejamento urbano e minerário na região do Quadrilátero Ferrífero. Intervenções em maciços constituídos por solos residuais de filito devem considerar a orientação de cortes em relação à foliação, a necessidade de sistemas de drenagem eficientes para minimizar a infiltração, e eventuais técnicas de reforço ou proteção superficial para controlar a erosão.

2.5 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Diversos autores investigaram solos residuais de filito por meio de ensaios de cisalhamento direto e triaxial no Quadrilátero Ferrífero, contribuindo para compreender como a foliação e o grau de intemperismo influenciam a resistência ao cisalhamento. Destacam-se os trabalhos de Eric Medeiros Silva (2006), Maria Bernadete Luciano Lopes (2006), Edicinéia Pinto Soares (2008), Luís Otávio R. Santiago (2008), Thiago Brienne G. Gomes (2021) e Sabine Rodrigues *et al.* (2023), que obtiveram parâmetros representativos das condições geotécnicas típicas da região.

Silva (2006) investigou solos residuais de filito dolomítico e sericítico da Mina do Pico, por meio de ensaios de cisalhamento direto realizados em umidade natural e condição inundada, além de ensaios triaxiais CIU. Os resultados mostraram variação dos parâmetros de resistência conforme a orientação da foliação. A coesão efetiva variou de 23 a 100 kPa e o ângulo de atrito efetivo (ϕ') de 23° a 46° no cisalhamento direto, enquanto no ensaio triaxial CIU foram obtidos valores de c' entre 30 e 67 kPa e ϕ' entre 27° e 32°.

Lopes (2006) investigou a influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual jovem de filito micáceo proveniente da região de Belo Horizonte, por meio de ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada em amostras indeformadas. Em condição inundada ($\sigma - u_a = 0$ kPa), a autora obteve $c' = 26,6$ kPa e $\phi' = 15,3^\circ$. Com o aumento da sucção mátrica, observou-se acréscimo progressivo da resistência, atingindo $c' = 226$ kPa e $\phi' = 32,3^\circ$ para $(u_a - u_w) = 200$ kPa.

Soares (2008) avaliou a influência da sucção na resistência ao cisalhamento de solos residuais de filito dolomítico provenientes das minas do Pico (Itabirito) e Capitão do Mato (Nova Lima), ambas no QF. Os ensaios foram realizados em amostras indeformadas, submetidas a cisalhamento direto e triaxial, conduzidos com o mergulho natural dos corpos de prova, sem variação na orientação em relação à foliação. Em condição natural, obteve c' variando de 23 a 138 kPa e ϕ' entre 30° e 45° no pico, e c' de 6 a 98 kPa e ϕ' entre 25° e 39° no pós-pico. Nas amostras inundadas, os valores reduziram para c' variando de 0 a 97 kPa e ϕ' entre 30° e 38° no pico, e c' de 0 a 59 kPa e ϕ' entre 19° e 34° no pós-pico. Nos ensaios triaxiais CIU, foram determinados c' entre 30 e 96 kPa e ϕ' entre 13° e 37°.

Santiago (2008) avaliou o comportamento de solos residuais de filito sericítico da Mina do Pico, por meio de ensaios triaxiais CIU em amostras indeformadas, conduzidos nas direções paralela e perpendicular à foliação. Os resultados indicaram c' variando de 45 a 73 kPa e ϕ' entre 14° e 40°.

Gomes (2021) realizou ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial em amostras indeformadas de solo residual de filito no QF. Em condição natural, os ensaios de cisalhamento direto apresentaram c' variando de 36 a 60 kPa e ϕ' entre 27° e 32° no pico, e c' de 24 a 45 kPa e ϕ' entre 24° e 32° no pós-pico. Em condição inundada, os parâmetros reduziram para c' variando de 28 a 34 kPa e ϕ' entre 26° e 27° no pico, e c' de 22 a 30 kPa e ϕ' entre 25° e 26° no pós-pico. No ensaio triaxial CID, foram obtidos $c' = 18$ kPa e $\phi' = 25$. O maciço avaliado por Gomes (2021) corresponde a um dos maciços analisados nesta dissertação.

Rodrigues *et al.* (2023) caracterizaram solos de alteração de filito dolomítico da Formação Fecho do Funil, localizada na Sinclinal Moeda (QF), por meio de ensaios CIUsat em

amostras indeformadas. Os resultados indicaram c' variando de 5,8 a 45 kPa e ϕ' entre 14° e 33°, conforme o grau de alteração. O solo residual apresentou c' entre 26 e 30 kPa e ϕ' entre 26° e 27°, enquanto o solo residual mole registrou c' de 27 a 45 kPa e ϕ' entre 14° e 26°, comportamento que reflete a redução do ângulo de atrito com o aumento do grau de alteração.

De forma geral, os resultados obtidos nos estudos conduzidos no Quadrilátero Ferrífero mostram faixas de resistência consistentes, com c' variando aproximadamente entre 20 e 100 kPa e ϕ' entre 20° e 45°, o que destaca o papel da foliação, da saturação e do grau de alteração na redução da resistência ao cisalhamento dos solos residuais de filito.

Fora do Quadrilátero Ferrífero, diversos estudos também analisaram solos residuais e saprolíticos derivados de filito, permitindo comparações entre diferentes contextos geológicos. Em São Paulo, Pinto *et al.* (1993) e Pellogia (1997) ensaiaram amostras indeformadas nas direções paralela e perpendicular à foliação, obtendo ϕ' entre 24° e 32° e c' de 5 a 60 kPa para o primeiro autor, e ϕ' entre 29° e 30° e c' entre 15 e 44 kPa para o segundo, indicando diferenças moderadas de resistência entre as direções de cisalhamento. Garcia e Iyomasa (2025), ao estudarem filitos da Formação Serra de Itaberaba, na Região Metropolitana de São Paulo, realizaram ensaios de cisalhamento direto e triaxial CIU em amostras indeformadas com cisalhamento paralelo à foliação, obtendo ϕ' entre 22° e 30° e c' entre 44 e 72 kPa em umidade natural, e ϕ' entre 21° e 31° e c' entre 30 e 82 kPa em condição inundada. No ensaio triaxial saturado (CIUsat), os autores determinaram $\phi' = 24^\circ$ e $c' = 36$ kPa.

Pires e Ribeiro Júnior (2016) estudaram um solo residual saprolítico de filito da Baixada Cuiabana (MT), pertencente à Formação Miguel Sutil, por meio de ensaios de cisalhamento direto drenado em amostras indeformadas, nas condições de umidade natural e saturada. Em condição natural, foram obtidos $c' = 31$ kPa e $\phi' = 43^\circ$ no plano paralelo e $c' = 89$ kPa e $\phi' = 46^\circ$ no plano perpendicular à foliação. Sob condição saturada, os valores foram $c' = 38$ kPa e $\phi' = 28^\circ$ no plano paralelo e $c' = 126$ kPa e $\phi' = 26^\circ$ no plano perpendicular. Os autores destacaram anisotropia acentuada e redução da resistência sob saturação, comportamento também observado em filitos de outras regiões do país.

De modo geral, os resultados obtidos em regiões fora do Quadrilátero Ferrífero apresentam faixas de resistência semelhantes às observadas nos estudos realizados no QF. Assim como nos solos do Quadrilátero, a anisotropia estrutural faz com que os esforços de cisalhamento mobilizem envoltórias distintas, conforme a orientação do plano de ruptura, enquanto a redução da sucção durante o processo de saturação diminui a resistência ao cisalhamento. A Tabela 2.1 apresenta os parâmetros de resistência obtidos na literatura especializada, abrangendo estudos realizados dentro e fora do Quadrilátero Ferrífero.

Tabela 2.1 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento em solos residuais de filitos.

Autores	Locais de Estudo	Cisalhamento Direto								Compressão Triaxial			
		Natural				Embebido				CIU		CID	
		Pico		Pós-Pico		Pico		Pós-Pico		c'	φ'	c'	φ'
Pinto et al. (1993)	Interior de SP	5kPa	24°										
		a	a										
Pellogia (1997)	Tremembé, SP	60kPa	32°										
		15kPa	29°										
Silva (2006)	Mina do Pico, MG	a	a			23kPa	28°			30 kPa	27°		
		44kPa	30°			a	a			a	a		
Lopes (2006)	Região metropolitana de Belo Horizonte	27kPa	23°			24kPa	33°			67 kPa	32°		
		100kPa	46°			26,2kPa	15,4°						
Soares (2008)	Mina do Pico, MG	23kPa	30°	6kPa	25°	0kPa	30°	0kPa	19°	0 kPa	13°		
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	a		
Santiago (2008)	Mina do Pico, Itabirito e Mina do Tamandua, MG	138kPa	45°	98kPa	39°	97kPa	37°	59kPa	34°	45 kPa	14°		
										a	a		
Garcia e Iyomasa (2025)	Região metropolitana de São Paulo	71kPa	30°			30kPa	21°			36 kPa	24°		
		a	a			a	a						
Gomes (2021)	BR 040, QF, MG	36kPa	27°	24kPa	24°	28kPa	26°	22kPa	25°			18 kPa	25°
		a	a	a	a	a	a	a	a				
Rodrigues et al. (2023)	Sinclinal Moeda Formação Fecho do Funil, MG	60kPa	32°	45kPa	32°	34kPa	27°	30kPa	26°	5,8 kPa	14°		
										a	a		
Silva et al. (2018)	Sinclinal Moeda, MG					29kPa	20,3°	3kPa	19,5kPa	45kPa	33°		
						a	a	a	a				
Silva et al. (2020)	Sinclinal Moeda, MG	29,8kPa	22,1°			49,2kPa	25,6°	21,2kPa	21,9kPa				
		a	a			23,9kPa	25,5°						
Silva et al. (2020)	Sinclinal Moeda, MG	57,5kPa	27,1°			29,8kPa	25,9°					0 kPa	39,2°
												a	a
												25,8 kPa	46,6°

A análise conjunta dos resultados disponíveis na literatura revela uma significativa dispersão dos parâmetros de resistência dos solos residuais de filito, mesmo para um mesmo tipo de ensaio e sob condições semelhantes de umidade ou saturação. Considerando apenas os estudos conduzidos no Quadrilátero Ferrífero, observa-se que a coesão efetiva (c') varia, de modo geral, entre 20 e 100 kPa, enquanto o ângulo de atrito efetivo (ϕ') se distribui entre 20° e 45°. Essa amplitude, superior à esperada para materiais de mesma origem litológica, reflete não apenas diferenças metodológicas entre os autores, mas, sobretudo, a forte heterogeneidade e anisotropia estrutural dos solos derivados de filito, além do grau variável de intemperismo e da condição de saturação. Se fosse adotado um tratamento estatístico preliminar desses valores (por exemplo, médias e desvios padrão para ensaios do tipo CIU e cisalhamento direto em condição natural), a alta variabilidade indicaria coeficientes de variação superiores a 30%, o que por si só evidencia a baixa representatividade de parâmetros únicos para esse tipo de solo e a necessidade de uma interpretação contextual.

Um aspecto de destaque nos estudos revisados é a diferença entre as resistências de pico e pós-pico, frequentemente negligenciada em análises simplificadas. Resultados como os de Soares (2008) e Gomes (2021) evidenciam que o comportamento desses solos é

acentuadamente frágil, com reduções expressivas de resistência após o pico, em alguns casos, superiores a 50% na coesão e 20% no ângulo de atrito. Essa característica é atribuída à estrutura foliada e parcialmente cimentada dos solos residuais de filito, cuja resposta mecânica combina atrito entre partículas e resistência aparente derivada de ligações interlaminares. Pequenos deslocamentos ou variações de sucção são suficientes para provocar a ruptura dessas ligações, resultando em queda abrupta de resistência. Esse comportamento tem implicações práticas diretas: em obras de escavação e taludes, o solo pode mobilizar altas resistências iniciais (pico), mas sofrer colapso repentino após pequenas deformações, sem prévia redistribuição de tensões ou aviso, configurando um modo de ruptura progressiva e potencialmente instável.

A comparação entre os ensaios de cisalhamento direto e triaxial também merece destaque. Enquanto o cisalhamento direto impõe um plano de ruptura definido permitindo, inclusive, ensaios com orientação controlada em relação à foliação, o ensaio triaxial oferece maior controle de tensões, mas não garante a coincidência entre o plano de ruptura e os planos de fraqueza do material. Nos solos residuais de filito, cuja anisotropia é marcante, essa diferença metodológica pode resultar em subestimação ou superestimação da resistência, a depender da orientação do corpo de prova e do tipo de confinamento. Diversos estudos (Silva, 2006; Santiago, 2008; Ehrlich e Silva, 2015) mostram que o cisalhamento direto tende a registrar menores ângulos de atrito e maior dispersão nos valores de coesão, o que está associado à possibilidade de cisalhamento paralelo à foliação, condição mais crítica e representativa do comportamento *in situ*. Por outro lado, o ensaio triaxial, especialmente em condições saturadas e com confinamento elevado, tende a mobilizar planos intermediários e refletir um comportamento mais isotrópico, o que mascara a anisotropia natural do material.

Essa constatação torna complexa a tentativa de estabelecer tratamentos estatísticos globais para os parâmetros de resistência, pois a representatividade dos resultados depende do controle da orientação da foliação e da condição de saturação. Mesmo quando a direção de cisalhamento é conhecida (como nos ensaios diretos), pequenas variações angulares entre o plano de ruptura e o plano de fraqueza podem gerar variações significativas nos valores obtidos. Assim, qualquer análise estatística ou comparação entre diferentes autores deve considerar a orientação relativa entre o plano de cisalhamento e a foliação, sob pena de se perder a interpretação geotécnica essencial do problema.

De modo geral, a literatura especializada aponta que a resistência ao cisalhamento dos solos residuais de filito é fortemente condicionada por fatores estruturais, sendo o grau de anisotropia o principal responsável pelas diferenças entre ensaios e entre regiões. O comportamento de pico e pós-pico, a resposta diferenciada em função da sucção e a

sensibilidade à orientação da foliação indicam que a resistência mobilizada *in situ* não pode ser tratada como um valor único, mas sim como uma faixa dependente do estado de tensões e do caminho de deformação. Esse conjunto de evidências reforça a importância de se considerar a estrutura anisotrópica e o histórico de intemperismo nos modelos constitutivos e nas análises numéricas, sob pena de se subestimar a possibilidade de rupturas frágeis e localizadas.

2.6 - EFEITO DE ESCALA EM SOLOS RESIDUAIS

Victor De Mello (1972) ressalta que a significância das heterogeneidades e descontinuidades em solos residuais depende da escala de análise, diferenciando uma escala reduzida, associada a sondagens e ensaios laboratoriais, e uma escala maior, correspondente às dimensões típicas de obras de engenharia, como fundações e taludes. Nesse sentido, entende-se que os parâmetros obtidos em sondagens e ensaios laboratoriais refletem predominantemente a matriz do solo, enquanto em escala de campo a resposta do maciço é majoritariamente governada pela interação das descontinuidades.

Hoek (1983) demonstra que a resistência de maciços rochosos não pode ser determinada apenas a partir de corpos de prova de rocha intacta. O autor apresenta uma representação simplificada do efeito de escala (Figura 2.5), indicando que o modelo de comportamento adotado depende da dimensão considerada: em pequena escala, prevalece o comportamento da rocha intacta; em escala intermediária, o maciço deve ser tratado como descontínuo; e em escala ainda maior, pode se comportar como um meio fragmentado. Esse conceito pode ser estendido aos solos residuais de filito, nos quais os planos reliquiares condicionam tanto o comportamento mecânico quanto hidráulico.

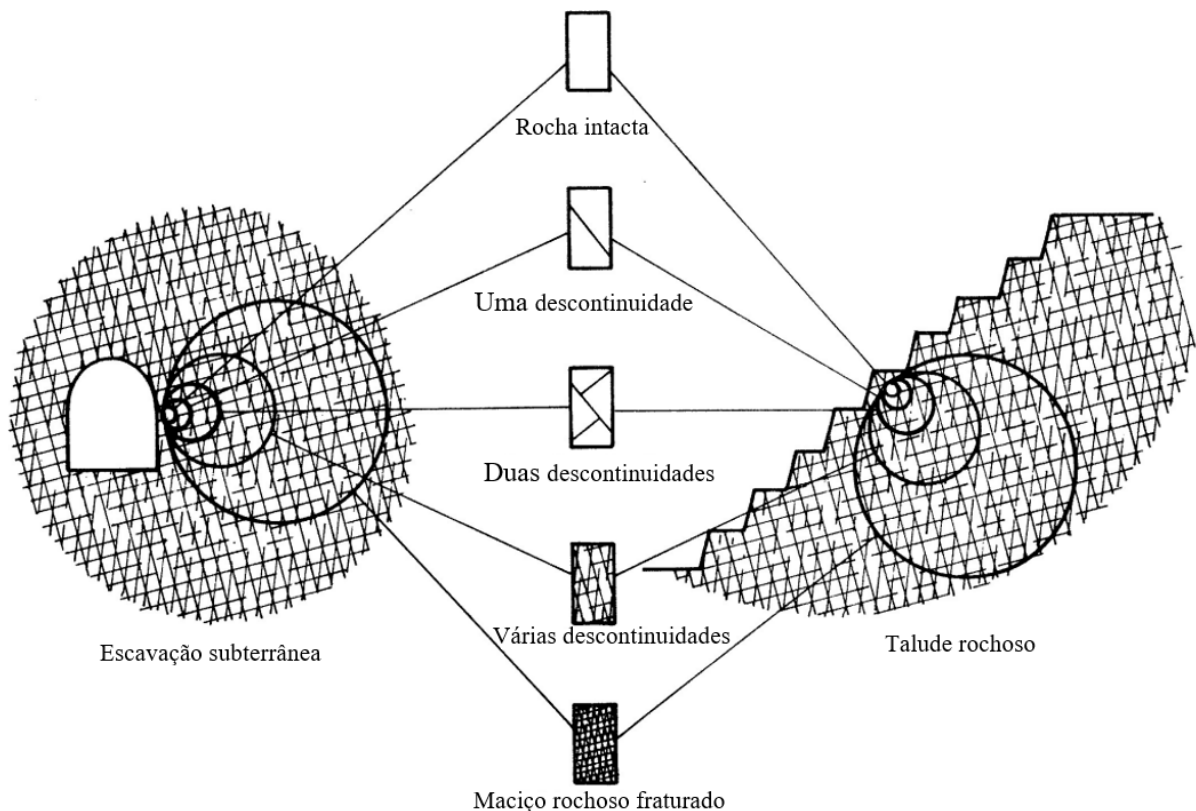


Figura 2.5 - Representação simplificada da influência da escala no modelo de comportamento de maciços rochosos (Fonte: Adaptado de Hoek, 1983).

Segundo Philip C. Lambe (1993), em solos residuais, os saprolitos preservam descontinuidades da rocha de origem que influenciam tanto a permeabilidade quanto a resistência ao cisalhamento. Em alguns casos, corpos de prova de pequenas dimensões podem fornecer valores enganosos desses parâmetros, pois não representam adequadamente a presença e a distribuição das descontinuidades. Com isso, destaca-se que análises em escala reduzida devem ser complementadas por interpretações que considerem a heterogeneidade estrutural do maciço.

Gofar, Kassim e Lee (2008) verificam que a introdução de juntas artificiais em amostras de solo residual saprolítico eleva a permeabilidade em quase uma ordem de grandeza, efeito mais significativo em espaçamentos inferiores a 300 mm. Talib, Kassim e Yunusa (2016) confirmam que a presença de múltiplas juntas reliquias em solos residuais graníticos pode aumentar a permeabilidade em até duas ordens de grandeza, dependendo do espaçamento e da orientação das estruturas.

Com isso, torna-se evidente que a consideração do efeito de escala é essencial na avaliação de maciços rochosos e de solos residuais com estrutura preservada da rocha de

origem, uma vez que os resultados obtidos em ensaios reduzidos não traduzem integralmente o comportamento mecânico, hidráulico e hidromecânico do maciço.

2.7 - SUPERFÍCIES DE FRICÇÃO

As superfícies de fricção, conhecidas pelo termo *slickensides* na literatura geotécnica e geológica, são planos de deslizamento caracterizados por aspecto liso, polido e frequentemente estriado. Em geologia estrutural, *slickensides* referem-se tipicamente a superfícies rochosas polidas e marcadas por ranhuras lineares, geradas pelo atrito entre dois blocos ao longo de uma falha, evidenciando o movimento relativo ocorrido. Em solos, formações análogas ocorrem em certas condições: por exemplo, em argilas expansivas, a repetida expansão e contração pode produzir planos lisos e lustrosos com estriamentos devido ao deslocamento interno da massa de solo. Tais superfícies *slickensides* em solo são inclinadas no perfil e resultam do deslizamento por atrito, apresentando aspecto espelhado e muito liso. Em resumo, seja em rocha, seja em solo, um *slickenside* indica que houve movimento cisalhante suficiente para polir e alinhar as irregularidades da superfície de ruptura.

Em escala de taludes naturais ou cortes, a presença de superfícies *slickensides* é evidência de movimentações prévias ao longo de planos de cisalhamento. Em escorregamentos de encostas ou em argilas superconsolidadas fissuradas, é comum identificar planos de ruptura polidos e estriados resultantes do cisalhamento passado. A formação de um *slickenside* geralmente indica que o solo ou rocha atingiu sua resistência residual naquele plano. Estudos clássicos mostram que, após ocorrer uma ruptura inicial e desenvolver-se uma superfície de cisalhamento bem definida (*slickenside*), a resistência disponível ao longo desse plano cai para um valor residual baixo e praticamente constante.

A. W. Skempton (1985) destacou que, uma vez formada a superfície lisa de ruptura em argilas duras, a resistência mobilizável subsequente é apenas a resistência residual drenada do material. Esse comportamento decorre do realinhamento das partículas ao longo do plano de deslizamento e da perda de intertravamento mecânico. Em termos práticos, um talude que já deslizou tenderá a deslizar novamente com muito menos resistência, pois o atrito drenado ao longo da superfície polida (Ângulo de atrito residual, ϕ_r) é significativamente menor que o ângulo de atrito de pico original. Por exemplo, Duncan e Wright (2005) relatam que o ângulo de atrito medido em superfícies *slickensides* corresponde justamente ao ângulo de atrito residual do solo. Assim, na análise de estabilidade de taludes reativados deve-se empregar parâmetros residuais, já que a superfície de ruptura existente atua como um plano de baixo atrito.

Cabe notar que *slickensides* podem surgir não apenas por escorregamentos rápidos, mas também em movimentos graduais. Em climas tropicais, solos argilosos estruturados podem desenvolver planos polidos por deformação lenta (rastejo) ao longo de descontinuidades geológicas ou pedológicas. Nesses casos, a superfície slickenside formada impõe um controle na resistência ao cisalhamento de longo prazo do maciço.

Em ensaios resistência de cisalhamento de laboratório também se observa a formação de *slickensides* em alguns solos, notadamente argilas de alta plasticidade ou solos estruturados. Quando uma amostra é cisalhada até grandes deformações, frequentemente ocorre a localização de deformações em uma faixa estreita que se transforma na superfície de ruptura principal. Nessa superfície cisalhada, os grãos e partículas tendem a se alinhar na direção do movimento, e minerais lamelares giram paralelamente ao plano de cisalhamento, criando uma face lisa e brilhante, praticamente um espelho de cisalhamento. Essa superfície polida resultante indica que o material atingiu sua condição residual, mobilizando a menor resistência possível além daquele ponto. Em solos com alto teor de finos (argila/silte), essa transição para um estado residual é marcada pela queda acentuada da tensão de cisalhamento após o pico, caracterizando um comportamento *tension softening* (amolecimento por deformação) ou frágil. De fato, ao atingir grandes deslocamentos, a resistência cai até estabilizar em um patamar praticamente constante, a resistência residual, associada ao atrito na superfície slickenside formada.

A magnitude da queda de resistência do pico até o residual depende da mineralogia e estrutura do solo. Solos com fração de argila elevada (>50%) apresentam as maiores reduções, pois a resistência residual fica controlada pelo atrito dos minerais plásticos alinhados. Além disso, a estrutura inicial do solo influencia: solos intemperizados homogêneos ou normalmente adensados muitas vezes não exibem um pico marcante, ao passo que solos rígidos, cimentados ou fissurados geralmente manifestam um pico bem definido seguido de queda pós-pico (comportamento frágil). Esse contraste se deve ao fato de materiais estruturados concentrarem a deformação em um plano preferencial, enquanto materiais mais homogêneos dissipam a deformação em volume maior, atrasando ou suavizando a formação de um plano único de ruptura.

Um indicador visual importante é a observação direta da amostra pós-ensaio: em muitos casos nota-se a presença de um plano de ruptura claramente definido e liso atravessando o corpo de prova. Essa superfície brilhante é a evidência física do slickenside formado no laboratório, confirmando que o material atingiu estado residual naquele plano. Por outro lado, em solos de comportamento dúctil, a amostra pós-ensaio pode não apresentar um plano único evidente, mas

sim zonas de cisalhamento difusas ou múltiplas, correspondendo à ausência de uma superfície de cisalhamento bem definida.

A formação de *slickensides* está ligada à diferença entre resistência de pico e resistência residual em solos. Antes do desenvolvimento de uma superfície de cisalhamento contínua, o solo pode mobilizar coesão aparente e altos ângulos de atrito devido ao intertravamento de partículas e à estrutura. Depois que a deformação se concentra e forma um plano *slickenside*, grande parte do intertravamento é perdido e a coesão efetiva reduz, restando essencialmente o atrito residual entre partículas alinhadas. Por consequência, verifica-se uma queda pós-pico significativa na curva tensão-deformação, atingindo um patamar residual mais baixo.

Diversos autores clássicos descreveram esse fenômeno. Skempton (1964, 1985), por exemplo, demonstrou que em argilas duras a resistência drenada diminui drasticamente após pequenas deformações pós-pico até um valor residual constante, atribuindo tal queda à reorientação das partículas ao longo do plano de deslizamento. Adicionalmente, observações de campo e laboratório concordam que a resistência residual de superfícies naturais de deslizamento é próxima daquela medida em ensaios de laboratório de grande deformação nos mesmos solos.

Devido à textura lamelar do filito (rico em mica e outros minerais folhosos), seus solos residuais e coluvionares tendem a apresentar anisotropia estrutural marcante. Planos de foliação oriundos da rocha mãe podem permanecer como zonas preferenciais de fraqueza no solo residual jovem (pouco intemperizado). Assim, quando ocorre cisalhamento nesses solos, é comum que a ruptura se dê ao longo dessas superfícies alinhadas, produzindo planos de falha lisos correspondentes às foliações. Mesmo amostras indeformadas de solo residual filítico podem fraturar preferencialmente segundo as foliações sob tensões relativamente baixas, exibindo faces lisas e brilhantes pós-ruptura semelhantes a *slickensides* de campo.

2.8 - MOVIMENTOS DE MASSA

Segundo Varnes (1978), o termo *landslide* (movimento de massa) refere-se ao deslocamento descendente e lateral de materiais que compõem encostas, podendo envolver rochas naturais, solos, aterros artificiais ou suas combinações.

Guidicini e Nieble (1984) diferenciam os termos agente e causa, definindo o agente como o fator atuante sobre o maciço e a causa como o modo específico dessa atuação. Os agentes envolvidos nos movimentos de massa são chamados predisponentes e efetivos. Os predisponentes configuram o cenário em que o movimento pode se desenvolver, abrangendo complexo geológico, complexo morfológico, complexo climático-hidrológico, gravidade, calor

solar e vegetação original. Já os efetivos estão diretamente ligados ao desencadeamento do movimento e se dividem em dois grupos: os preparatórios, relacionados à atuação progressiva de fatores como intervenção humana, atividade de animais, pluviosidade e erosão por água ou vento; e os imediatos, associados a eventos de curta duração e grande intensidade, entre os quais se destacam chuvas concentradas, erosões intensas, terremotos e ações antrópicas diretas, como uso de explosivos.

As causas dos movimentos de massa podem ser classificadas, segundo Guidicini e Nieble (1984), em internas, externas e intermediárias. As internas estão associadas à redução da resistência do material, como o aumento da pressão hidrostática, a diminuição da coesão ou a redução do ângulo de atrito por alteração. As externas, por sua vez, relacionam-se ao acréscimo das solicitações sobre o maciço, incluindo o aumento da declividade do talude, a deposição de material em sua porção superior, abalos sísmicos e vibrações. Já as intermediárias refletem efeitos de agentes externos no interior do talude, a exemplo de liquefação espontânea, rebaixamento rápido do nível d'água e erosão retrogressiva.

Segundo Gerscovich (2016), diversos autores propuseram classificações para os movimentos de massa (Varnes, 1958, 1978; Hutchinson, 1968; Guidicini e Nieble, 1984), destacando-se a de Varnes (1978) como a mais utilizada internacionalmente. No Brasil, a ABNT NBR 11682:2009 - Estabilidade de encostas apresenta uma sistematização simplificada, que reúne os movimentos em quatro grupos básicos: queda/rolamento, tombamento, escorregamento e escoamento. Dentre as classificações nacionais, o Manual Técnico de Encostas da GEO-RIO apresenta uma adaptação baseada em Varnes (1978) e Augusto Filho (1992), sintetizada na Tabela 2.1, a qual organiza os movimentos considerando o material predominante, a cinética e a geometria do processo.

Tipo de movimento		Material predominante	Cinética e geometria
Quedas		Lascas de rocha, blocos de rocha fraturada ou solo em margens de corpos d'água.	Queda livre ou sem repique em planos inclinados.
Tombamentos		Lascas de rocha com fraturamento subvertical.	Basculamento e posterior queda de lascas de rochas.
Rolamentos		Blocos de rocha e/ou matacões.	Rolamentos de blocos de rocha/matacões aflorantes em taludes de solo.
Escorregamentos	Rotacionais	Rochas muito fraturadas ou solos espessos sem anisotropia relevante ou resíduo sólidos urbanos (lixo).	Movimentos rápidos ou lentos ao longo de superfícies aproximadamente conchoiadas ou cilíndricas.
	Translacionais ou planares	Blocos de rocha ao longo das foliações ou descontinuidades, solos rasos sobre rocha ou camada resistente, resíduos sólidos urbanos sobre material mais resistente.	Movimentos rápidos ou lentos ao longo de superfícies aproximadamente planas.
	Em cunha	Blocos de rocha.	Ocorre quando há dois planos de descontinuidade cuja interseção é uma linha de orientação desfavorável, na direção do movimento
Fluxos (ou escoamentos)	Corridas	Detritos (mistura de solo com blocos de rocha, vegetação etc.) ou lama.	Movimento semelhante ao de um líquido viscoso, desenvolvimento ao longo dos fundos de vale. Velocidades altas (> 20 km/h). Extenso alcance.
	Rastejo ou fluência (creeps)	Solo coluvionares ou massa de tálus.	Velocidades muito baixas (mm a cm/ano). Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes, com nível d'água do lençol freático próximo à superfície. O movimento obedece à elevação do lençol d'água. Superfície de escorregamento aproximadamente paralela à superfície do terreno.
Complexos		Materiais diversos.	Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimento.

Figura 2.6 - Classificações dos movimentos de massa (Fonte: GEO-RIO,2014).

Segundo Rafael Cerqueira Silva, Douglas Pereira da Costa e Mauricio Ehrlich (2018), os taludes em áreas de substrato rochoso constituídos por filitos apresentam movimentos e rupturas que variam de acordo com a relação geométrica entre os cortes e as descontinuidades dos maciços (Figura 2.7A). Nos taludes de filito, cortes paralelos à xistosidade favorecem que as foliações atuem como planos de fraqueza, os quais podem evoluir para escorregamentos planares (Figura 2.7B). Quando muito alterados podem comportar-se como solos e escorregar, mobilizando rupturas rotacionais, Figura 2.7. (Silva, Costa, Ehrlich, 2018).

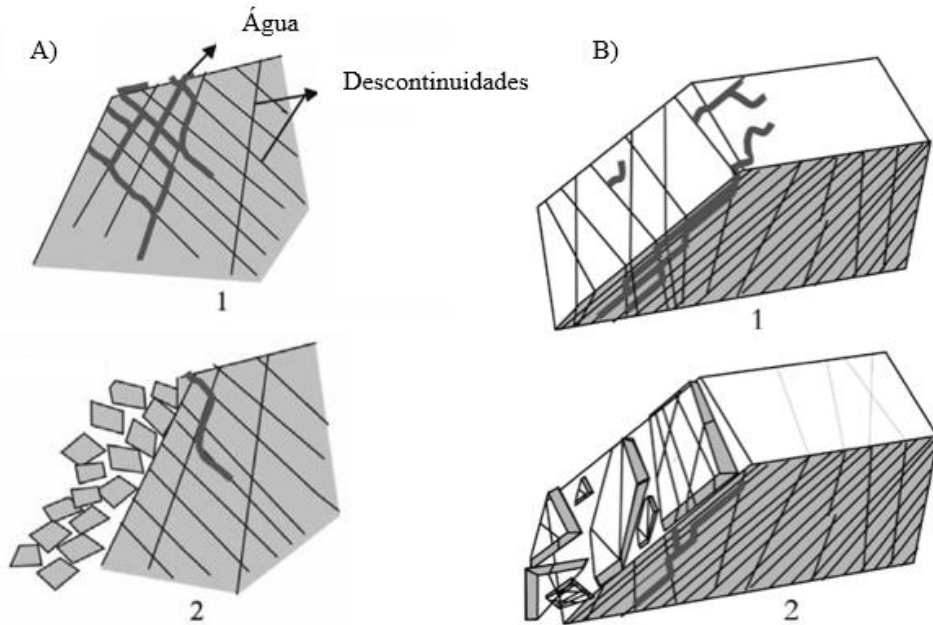


Figura 2.7 - Rupturas em taludes de filitos e xistos. A- tombamentos e quedas de blocos em quartzitos, filitos e xistos, 1- ação da água nas descontinuidades; 2- Quedas e tombamentos. B- escorregamento em taludes de xistos e filitos com cortes paralelos à xistosidade. (Fonte: Adaptado - Parizzi *et al.* 2011).

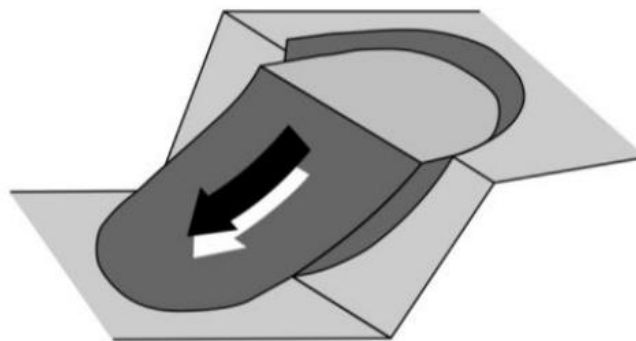


Figura 2.8 - Ruptura circular (sem controle estrutural) mobilizada em material muito alterado (Fonte: Adaptado de Hoek; Bray, 1981)

Em taludes rochosos escavados em filito, a anisotropia associada à foliação tende a compartimentar o maciço em lâminas ou placas, controlando a deformabilidade e a resistência ao longo de planos preferenciais. Nesse contexto, pode ocorrer tombamento, em especial o tombamento flexural, Figura 2.9, no qual placas foliadas se deformam por flexão e evoluem para rotação progressiva em direção ao vazio, conforme discutido por Dilásccio (2005) e. Já a flexo-flambagem, Figura 2.10, pode se desenvolver quando essas lâminas tornam-se instáveis sob um estado de compressão e confinamento parcial, com deformações por flexão e possível

abaulamento do paramento, mecanismo analisado por Silva e Lana (2014) no talude da Mina Pau Branco, no Quadrilátero Ferrífero (MG). Em perfis de alteração, solos residuais jovens de filito que preservam foliações relictuais podem manter comportamento estruturado do tipo pseudo-rocha, de modo que, em determinadas condições geométricas e estruturais, possam se desenvolver cinemáticas análogas de tombamento e flexo-flambagem, sobretudo quando a ação da água reduz a resistência efetiva ao longo desses planos.

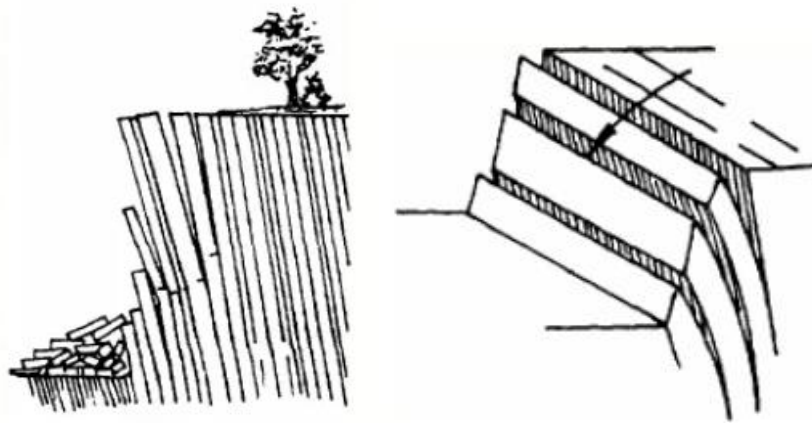


Figura 2.9 - Mecanismos de ruptura por tombamento (Fonte: Adaptado Hoek; Bray, 1977).

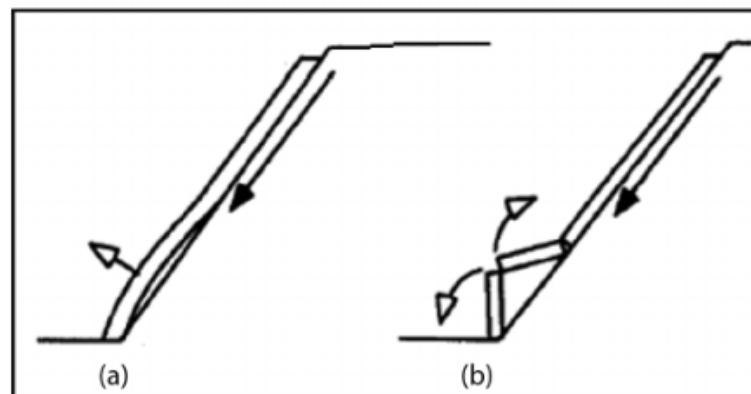


Figura 2.10 - Mecanismo de ruptura por flambagem: (a) flambagem por flexão; (b) flambagem com três charneiras. (Fonte: Cavers (1981) apud Silva;Lana (2014).)

3 - CARACTERIZAÇÃO DOS MACIÇOS EM ESTUDO

A área de estudo insere-se no setor sul do Quadrilátero Ferrífero, região de expressiva importância geológica, geotécnica e econômica do estado de Minas Gerais. Essa porção do QF apresenta relevo acidentado e intensa tectonização, com afloramentos dominados por rochas metassedimentares, especialmente filitos e quartzitos, resultantes de processos metamórficos de baixo a médio grau. O intemperismo desses litotipos origina solos residuais anisotrópicos que preservam, em diferentes intensidades, estruturas reliquiares da rocha matriz, notadamente as superfícies de foliação. A orientação dessas descontinuidades exerce influência marcante sobre o comportamento geotécnico dos maciços, condicionando a estabilidade de taludes naturais, cortes rodoviários e encostas mineradas.

Os maciços investigados situam-se ao longo da rodovia BR-040, entre os municípios de Itabirito e Congonhas, em um trecho que abrange o contato entre as Serras da Moeda e das Almas. A seleção dos pontos de amostragem baseou-se na presença de feições representativas dos solos residuais de filito e na ocorrência de diferentes manifestações de instabilidade. Essa região é influenciada por estruturas de grande porte do Quadrilátero Ferrífero, como dobras, falhas de empurrão e zonas de cisalhamento de baixo ângulo, que conferem às encostas elevado grau de anisotropia estrutural. A interação entre a geologia, o intemperismo e as intervenções antrópicas, sobretudo as escavações rodoviárias e as alterações no regime de drenagem superficial, tem contribuído para o desenvolvimento de deformações progressivas e movimentos de massa de pequena a média magnitude.

Foram selecionados cinco maciços terrosos (MA01 a MA05), representativos dos diferentes comportamentos apresentados pelos solos residuais de filito da região. Cada maciço possui particularidades geológicas, estruturais e geotécnicas que permitem analisar comparativamente o papel da anisotropia herdada do filito na estabilidade dos taludes e no desenvolvimento de processos de ruptura e deformação. Os maciços de estudo são apresentados em detalhe, abrangendo suas características geológicas, estruturais, geotécnicas e o histórico evolutivo dos processos observados, com base em observações de campo, resultados de ensaios laboratoriais e análises de estabilidade.

O Maciço MA01 (km 578+500) corresponde a um corte profundo implantado durante a duplicação da BR-040, em área próxima às cavas de mineração ativas. O talude apresenta movimentação muito lenta (da ordem de 0,05 m/ano), sem superfície de ruptura bem definida, indicando deformação progressiva em grande profundidade. As evidências de campo, trincas

persistentes no pavimento, abatimentos diferenciais e escorregamentos discretos, sugerem a atuação combinada de tensões regionais, vibrações provenientes das detonações de mina e efeitos de anisotropia estrutural dos solos residuais de filito. Esses solos, derivados de filito cinza pouco intemperizado, preservam foliações reliquiárias que controlam a drenagem, a resistência e a deformabilidade do maciço, tornando-o um caso representativo do comportamento de materiais fortemente anisotrópicos do Quadrilátero Ferrífero (Gomes, 2021).

O Maciço MA02 (km 579+300) corresponde a um talude de corte escalonado, executado durante a duplicação da BR-040, que apresentou duas rupturas sucessivas em períodos distintos. A primeira ocorreu em uma configuração anterior do talude, quando a superfície de ruptura interceptou uma camada de filito subjacente, inicialmente oculta sob uma capa de solo residual argiloso típico de canga ferruginosa. Essa camada superficial, de aparência homogênea e aspecto de solo maduro, mascarava a transição para o filito menos intemperizado em profundidade. Após o primeiro evento, o talude foi reconfigurado e estabilizado por meio de novo escalonamento; contudo, o avanço da escavação interceptou novamente o filito, provocando nova ruptura de maior abrangência. O material amostrado revelou um filito intensamente intemperizado, similar aos encontrados em outros maciços da região, mas em estágio mais avançado de alteração, permitindo avaliar de forma comparativa a influência do grau de intemperismo no comportamento geotécnico. O talude não foi instrumentado, tendo sido acompanhado apenas por inspeções visuais e por ensaios laboratoriais realizados nas amostras coletadas.

O Maciço MA03 (km 586+700) corresponde a um talude de corte escalonado, implantado na BR-040, cuja face exposta apresenta contraste cromático acentuado entre faixas de solo vermelho-escuro, marrom e amarelado. Essa diferenciação reflete variações mineralógicas e de grau de intemperismo nos solos residuais de filito, que compõem o maciço. O setor central e amarelado, mais erodido, evidencia a presença de zonas com maior teor de mica e menor coesão, nas quais se concentram processos erosivos e pequenas rupturas superficiais. A estrutura foliada herdada da rocha matriz permanece parcialmente preservada, resultando em anisotropia de resistência e drenagem, típica dos solos derivados de filito. Esse maciço foi selecionado para estudo por representar a transição entre diferentes estágios de alteração e a heterogeneidade natural dos solos residuais do Quadrilátero Ferrífero.

O Maciço MA04 (BR-040, km 590+175) consiste em um talude rodoviário em solo residual de filito, instrumentado com inclinômetros em diferentes anos. Esse maciço apresentou movimentações do tipo rastejo com velocidades distintas ao longo do tempo, desde

deslocamentos extremamente lentos e constantes até episódios de aceleração associados a chuvas intensas. Essas variações na taxa de deslocamento influenciaram os parâmetros de resistência obtidos por retroanálise da estabilidade. Silva *et al.* (2018) reportaram ângulos de atrito mobilizados variando de cerca de 19° a 25°, com coesão praticamente nula, conforme a velocidade do movimento e a posição do nível d'água. Observou-se que movimentos mais rápidos (durante níveis d'água elevados) mobilizaram resistência ao cisalhamento ligeiramente maior (ϕ próximo de 25°), enquanto no *creep* lento e contínuo bastou um ângulo menor (próximo de 19°) para equilibrar o maciço. Para verificar e validar essas observações de campo, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em laboratório com diferentes velocidades de deslocamento, de modo a avaliar a influência da taxa de cisalhamento na resistência mobilizada.

O MA05 situa-se na vertente da Serra das Almas (base da Serra da Moeda), em área onde predominam solos residuais de filito com foliação marcante e mergulhos voltados para o fundo do vale. As coberturas são muito espessas e, nas sondagens executadas, não se identificou rocha sã; o filito mostrou elevada resistência à perfuração, exigindo procedimento típico de investigações em maciços rochosos. Na montante, a presença de intervenções minerárias sugere alterações do regime freático regional; no entorno da base observam-se feições de movimentação em encostas. Perfurações de drenos na montante interceptaram, a ~35 m de profundidade e com >20 m de espessura, um horizonte de cascalho interpretado como depósito coluvionar, o que ajuda a explicar caminhos preferenciais de fluxo e zonas de perda de resistência no contato com o solo residual de filito. O histórico de instabilidades no trecho é, portanto, melhor entendido como consequência direta dessa geologia e hidrogeologia locais.

3.1 - Maciço MA01 (km 578+500 - BR-040/MG)

O Maciço MA01 localiza-se no km 578+500 da BR-040, Figura 3.1, em trecho de corte pleno implantado durante a duplicação da rodovia, entre os municípios de Itabirito e Congonhas. A área situa-se nas proximidades de uma cava de mineração, cuja escavação profunda alterou as condições de equilíbrio natural do terreno. A geometria atual do talude, a presença de vibrações decorrentes das detonações na mina e o histórico de interferência antrópica indicam que o comportamento observado é consequência da combinação entre fatores estruturais, geotécnicos e dinâmicos (Gomes, 2021).



Figura 3.1 - Vista geral do talude MA01 (Fonte: Silva *et al.*, 2020a).

A seção de corte apresenta altura aproximada de 35 m e inclinação média de 60°, composta por solos residuais jovens derivados de filito cinza. Esses solos preservam as foliações reliquias da rocha matriz, definindo planos sub-horizontais a levemente mergulhantes para SE, que controlam tanto a drenagem interna quanto a resistência ao cisalhamento. Observa-se ainda a presença de bandamentos micáceos e níveis arenosos intercalados, resultando em uma estrutura heterogênea e anisotrópica. De acordo com o mapeamento estrutural realizado por Gomes (2021), a foliação principal apresenta direções N70E-N80E e mergulhos suaves entre 15° e 25° para SE, subparalelos ao talude.

As trincas longitudinais identificadas ao longo da plataforma e do bordo da pista possuem aberturas de até 10 cm e persistência lateral superior a 100 m, formando um padrão *en échelon* com direção média N70E. Tais feições, associadas a abatimentos diferenciais e escorregamentos superficiais discretos, evidenciam um mecanismo de deformação progressiva de grande profundidade, coerente com a orientação da foliação e com o campo de tensões regionais.

Os resultados de instrumentação geotécnica apresentados por Gomes (2021) reforçam essa interpretação. Os inclinômetros instalados no maciço indicaram movimentos extremamente lentos, da ordem de 0,05 m/ano, sem uma superfície de ruptura bem definida. As

leituras de nível d'água registraram lençol freático profundo (abaixo de 30 m), o que evidencia que a saturação tem papel secundário no processo, com o comportamento dos materiais influenciado pela condição não saturada. Assim, o deslocamento está mais relacionado a ajustes estruturais induzidos por vibrações e à reorientação de tensões em resposta ao desmonte mecânico promovido pela cava de mineração.

Os ensaios de campo e laboratório permitiram caracterizar dois materiais principais: o solo residual jovem de filito (SRJF) e o solo residual maduro de filito (SRMF). O SRJF apresenta coloração cinza-claro, textura fina e marcante anisotropia hidráulica, com permeabilidade cerca de uma ordem de grandeza menor na direção perpendicular às foliações (Gomes, 2021). Já o SRMF, mais intemperizado e homogêneo, mostra coloração amarelada e permeabilidade média da ordem de 10^{-5} cm/s.

Nos ensaios de cisalhamento direto, o SRJF apresentou coesão entre 30 e 60 kPa e ângulo de atrito de 24° a 27° , enquanto o SRMF variou entre 22 e 36 kPa e 26° a 32° , respectivamente. Ambos exibiram redução de resistência sob saturação, especialmente o SRJF, confirmando o papel das superfícies foliadas como planos de fraqueza preferenciais.

Nos ensaios triaxiais drenados (CID), o SRJF revelou comportamento não linear, com tendência à redução da resistência ao cisalhamento para maiores tensões de confinamento. Esse resultado, interpretado por Gomes (2021) como consequência do deslizamento ao longo de lamelas micáceas, reforça a importância da estrutura mineralógica orientada na resposta mecânica. Observou-se que o corpo de prova consolidado a 400 kPa exibiu menor resistência que o de 200 kPa, comportamento atribuído à anisotropia, motivo pelo qual esse ponto não foi considerado na definição da envoltória e dos parâmetros. Os parâmetros de resistência coesão e ângulo de atrito foram de 18 kPa e 25° . As superfícies de ruptura seguem planos de fraqueza associados à foliação, reforçando que, em filitos residuais, o aumento do confinamento não garante maior resistência quando a ruptura se dá em planos específicos.

A combinação das análises geotécnicas e estruturais demonstra que o Maciço MA01 se encontra em processo de acomodação lenta e profunda, governado por anisotropia estrutural, vibrações antrópicas e redistribuição de tensões regionais. Trata-se, portanto, de um caso representativo da instabilidade progressiva em solos residuais jovens de filito, fenômeno típico das encostas filíticas do Quadrilátero Ferrífero.

3.2 - Maciço MA02 (km 579+300 - BR-040/MG)

O Maciço MA02, Figura 3.2, localiza-se a aproximadamente 800 m a jusante do MA01, no km 579+300 da BR-040, em trecho de relevo fortemente dissecado, onde a rodovia cruza o

contato entre as formações Batatal e Cauê. O talude apresenta geometria escalonada com banquetas intermediárias, atingindo cerca de 28 m de altura total. A configuração original foi executada em corte simples, sobre material aparentemente homogêneo e argiloso, posteriormente identificado como solo residual derivado de canga ferruginosa, com espessura variável entre 2 e 4 m.

Durante o primeiro episódio de instabilidade, observou-se o escorregamento do conjunto solo-rocha, com ruptura superficial inicial que evoluiu para o destacamento de um bloco alongado, limitado inferiormente por uma camada de filito cinza parcialmente intemperizado. Essa superfície de deslizamento mostrou-se aproximadamente paralela à foliação do filito, evidenciando o papel estrutural do material subjacente na instabilidade. Após o evento, executou-se um projeto de estabilização com o rebaixamento e reconfiguração do corte, adotando-se novo sistema de banquetas mais estreitas e inclinações suavizadas.



Figura 3.2 - Maciço de Amostragem MA02 (km 579+300, Pista Sul), registro fotográfico quando da ocorrência da ruptura no talude de corte.

Entretanto, com o avanço da escavação para atingir a nova geometria, foi exposta uma porção mais intemperizada e desagregada do filito, caracterizada por coloração amarelada, textura siltosa e presença de fragmentos micáceos orientados segundo a antiga foliação. A redução do suporte lateral e a ocorrência de chuvas intensas durante o período de obras favoreceram o deslizamento de uma massa maior de solo e rocha, configurando um segundo episódio de ruptura, mais profundo e de maior extensão que o anterior.



Figura 3.3 - Maciço de Amostragem MA02 (km 579+300, Pista Sul), registro após intervenção de terraplenagem no talude de corte.

A caracterização geotécnica das amostras coletadas indicou um filito muito intemperizado, com estrutura parcialmente obliterada e comportamento semelhante ao dos solos residuais maduro intemperizados de outros maciços. Ensaios de cisalhamento direto mostraram coesão aparente entre 20 e 35 kPa e ângulo de atrito interno entre 25° e 30°, com significativa redução de resistência após saturação, comportamento típico de materiais micáceos com planos preferenciais de fraqueza. Ensaios de limites de Atterberg indicaram plasticidade média (IP variando de 18% a 22%) e densidade aparente úmida em torno de 1,9 Mg/m³, coerentes com o estágio avançado de decomposição mineralógica do filito.

As observações de campo confirmam que o mecanismo de ruptura foi controlado pela interceptação da camada filítica durante a reescavação, a qual se comportou como uma superfície anisotrópica de baixa resistência, permitindo o escorregamento da massa superior de solo residual e canga. A ausência de instrumentação impossibilitou a quantificação das deformações ao longo do tempo, mas a evolução geomorfológica e as evidências visuais indicam movimento rápido a semilento, associado a chuvas intensas e saturação localizada.

Do ponto de vista geotécnico, o Maciço MA02 destaca-se por representar a transição entre o comportamento típico de solos residuais e de materiais saprolíticos derivados de filito, revelando a influência direta do grau de intemperismo e da herança estrutural no desempenho dos taludes do Quadrilátero Ferrífero. O caso ilustra a importância do reconhecimento prévio da camada de filito sob coberturas de canga ou solos ferruginosos antes da execução de cortes e rebaixamentos.

3.3 - Maciço MA03 (km 586+700 - BR-040/MG)

O Maciço MA03 situa-se no km 586+700 da BR-040, entre os municípios de Itabirito e Congonhas, em área de relevo acidentado, marcada por cortes rodoviários que interceptam rochas filíticas e cangas ferruginosas. O talude apresenta perfil escalonado, com três níveis principais e altura total aproximada de 25 m. A imagem de campo do MA03., Figura 3.4, evidencia nítida variação de coloração nos diferentes patamares, alternando tonalidades avermelhadas, marrons e amareladas, relacionadas a diferenças mineralógicas e de grau de intemperismo no solo residual derivado do filito.



Figura 3.4 - Vista geral do talude MA03, evidenciando as diferenças cromáticas e zonas de erosão associadas a variações de intemperismo no solo residual de filito.

O nível superior, de coloração vermelha intensa, corresponde a um solo residual argiloso rico em óxidos de ferro, semelhante à canga laterítica típica da região. Esse horizonte superficial, de comportamento coesivo e relativamente homogêneo, encobre camadas mais frágeis e anisotrópicas subjacentes. O nível intermediário, de coloração marrom-escura, representa a zona de transição entre o solo ferruginoso e o solo filítico, com presença de fragmentos micáceos e planos de foliação parcialmente preservados. Já o nível inferior, de tonalidade amarelada e aspecto mais siltoso, corresponde ao solo residual jovem de filito, material friável, de baixa coesão e elevada anisotropia.

Durante as inspeções de campo, observaram-se pequenas rupturas superficiais e ravinas concentradas nas faixas amareladas, coincidindo com as zonas de menor grau de cimentação e maior orientação estrutural. Nessas áreas, a infiltração de água se dá preferencialmente ao longo de planos sub-horizontais, possivelmente coincidentes com a foliação reliquiar do filito de origem. A combinação entre heterogeneidade composicional, anisotropia herdada e contraste

hidráulico entre os níveis favorece o desenvolvimento de mecanismos erosivos localizados e instabilidades superficiais.

A coleta de amostras para investigação geotécnica permitiu caracterizar materiais de diferentes estágios de alteração. Os ensaios laboratoriais indicaram que os solos mais intemperizados (zona amarelada) apresentam maior teor de silte, menor coesão aparente (15 - 25 kPa) e ângulo de atrito interno médio (25° - 28°), enquanto os solos ferruginosos superiores mostraram maior coesão (40 - 60 kPa) e menor permeabilidade, atribuída à presença de óxidos de ferro e ao maior grau de cimentação. Os limites de Atterberg sugerem plasticidade média a baixa (IP entre 15 % e 22 %), coerente com a mineralogia essencialmente quartzo-mica-caulinita.

A interpretação geotécnica do maciço indica que as diferenças visuais de cor refletem zonas de intemperismo diferencial, provavelmente controladas pela composição mineral e pela estrutura da rocha matriz. Em setores onde a foliação está mais preservada, o solo residual mantém comportamento anisotrópico e tende a apresentar erosões laminares e rupturas rasas; já nas zonas ferruginosas, o endurecimento por oxidação reduz a drenagem e aumenta a rigidez superficial, criando um contraste mecânico com as camadas subjacentes.

Em síntese, o Maciço MA03 representa um exemplo típico de heterogeneidade e anisotropia em solos residuais de filito, combinando feições lateríticas superficiais e horizontes micáceos em diferentes estágios de decomposição. O caso é especialmente relevante para o entendimento da influência do intemperismo e da estrutura reliquiar no comportamento de encostas filíticas do Quadrilátero Ferrífero.

3.4 - Maciço MA04 (km 590+175 - BR-040/MG)

O caso de estudo refere-se ao Maciço MA04, localizado no km 590+175 da rodovia BR-040, na base da Serra da Moeda, região inserida no Quadrilátero Ferrífero (MG). Trata-se de um talude de corte em solo residual de filito altamente foliado, cuja foliação apresenta orientação subparalela à face do talude, com mergulho da ordem de 30°. O maciço corresponde a um depósito coluvial de filito com inclinação média moderada, em torno de 20°, e comprimento aproximado de 40 m. Esse talude foi escavado durante a implantação da rodovia, o que modificou as condições de equilíbrio do terreno.

Embora o maciço MA04 seja geneticamente classificado como coluvionar, o material não corresponde a um colúvio clássico desestruturado. De acordo com a tipologia de depósitos coluvionares apresentada por Willy A. Lacerda (2004), o material do maciço MA04 pode ser enquadrado como um depósito coluvionar resultante da formação de uma superfície de

deslizamento no interior do solo residual. Nessa condição, observa-se a preservação da estrutura reliquiar e da anisotropia herdadas do solo residual de alteração de filito.

A combinação de fatores predisponentes, como a estrutura foliada do solo residual de filito e a presença de um lençol freático relativamente raso, e de fatores deflagradores, como os cortes de grande porte na encosta e a elevação do nível d'água em períodos chuvosos, contribuiu para a ocorrência de instabilidades no maciço. Inicialmente, verificou-se um pequeno deslizamento no pé do corte, Figura 3.5, cujo material foi removido da sarjeta da rodovia. Após esse evento, o talude passou a apresentar deslocamentos lentos, caracterizando um processo de rastejo, com deformações progressivas e contínuas em direção a uma nova condição de equilíbrio. O material deslizado apresenta baixa inclinação, Figura 3.6, muito próxima ao ângulo de mergulho da foliação do filito, com resistência progressivamente reduzida pela ação da água.

Fissuras longitudinais sucessivas foram mapeadas na superfície do terreno, Figura 3.7, indicando deformações cumulativas. Essas trincas favorecem a infiltração de água pluvial no interior do maciço, o que eleva localmente a pressão neutra e reduz a resistência ao cisalhamento do solo durante os períodos chuvosos. Em eventos de precipitação intensa, o nível d'água pode se elevar significativamente; medições realizadas indicaram que o lençol freático chegou a aflorar próximo ao pé do talude, agravando as condições de estabilidade.

Por outro lado, intervenções antrópicas na região, como escavações e rebaixamento induzido do lençol freático, também alteraram o regime de fluxos subterrâneos, podendo manter o nível d'água rebaixado por longos intervalos. Esse contexto geológico e geotécnico complexo confere ao maciço MA04 um comportamento singular, controlado pela interação entre fatores estruturais, litológicos e hidrogeológicos.



Figura 3.5 - Ruptura principal proporcionou ao talude uma geometria de configuração côncava, trincas e abatimentos, que favorecem a concentração de água (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2018).



Figura 3.6 - Material deslizado com baixa inclinação muito próxima do ângulo de mergulho da foliação do filito, com resistência gradualmente reduzida pela ação da água (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2018).



Figura 3.7 - Trincas sucessivas remontantes ao longo do talude favorecem a infiltração de água, induzindo o aumento de poro-pressões nos poros e conseqüente movimentação (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2018).

Para compreender o comportamento desse maciço, foi instalado inclinômetro, realizando campanhas de monitoramento ao longo do tempo, além de piezômetros e medidores de nível d'água. A instrumentação inclinométrica possibilitou identificar a profundidade e magnitude dos deslocamentos. Os resultados desse monitoramento inicial indicaram que a massa de solo se movia predominantemente nos primeiros metros de profundidade: o perfil de deslocamentos medido pelo inclinômetro atingiu cerca de 7 m de profundidade, sugerindo uma superfície de cisalhamento rasa confinando a zona ativa do deslizamento. Durante esse primeiro período de monitoramento, a movimentação observada caracterizou-se como lenta e progressiva, porém com evidências de sazonalidade. Nos meses secos, os deslocamentos acumulavam-se em ritmo muito baixo, enquanto nos períodos chuvosos observou-se uma

aceleração temporária do movimento. Em particular, registrou-se uma reativação da massa coluvial associada à elevação do lençol freático: quando o nível d'água atingiu seu patamar máximo (aflorando na base do talude), a velocidade de deslocamento medida aumentou para cerca de 4 mm/dia, valor significativamente superior ao verificado em condições de lençol baixo. Visualmente, nessa ocasião, notaram-se deformações mais pronunciadas no maciço (como abertura de trincas e abatimentos diferenciais) em comparação à situação de estiagem. Mesmo nas condições de lençol rebaixado (durante as quais a velocidade de *creep* era muito pequena, mas não nula), a instrumentação confirmou que a movimentação continuava ocorrendo, indicando que o maciço permanecia em estado limite de equilíbrio.

Ao longo dos períodos de monitoramento, o comportamento observado manteve a tendência de *creep* contínuo. As informações de instrumentação permitiram realizar retroanálises das condições de estabilidade do maciço em diferentes cenários, correlacionando a velocidade de movimento observada com os parâmetros de resistência ao cisalhamento mobilizados no solo residual de filito. De acordo com Silva *et al.* (2018), que analisaram esse maciço coluvial em condição de rastejo, a resistência mobilizada situou-se próxima ao patamar residual, com coesão próxima de zero e ângulo de atrito em torno de 25°. Esses valores foram obtidos para a condição de movimento já estabelecido no talude (com o solo bastante deformado ao longo do tempo). No entanto, ao considerar situações de nível d'água distintos, notaram-se diferenças significativas nos parâmetros necessários para equilibrar o talude. Em uma condição de lençol freático mais baixo (estado relativamente mais seco), as análises indicaram a necessidade de um ângulo de atrito da ordem de 19° (mantendo coesão nula) para justificar o movimento lento observado. Por outro lado, na condição de lençol elevado e movimento acelerado (reativação durante chuvas intensas), a retroanálise resultou em um ângulo de atrito com cerca de 25°, também com coesão praticamente nula, para atingir o equilíbrio limite. Em ambos os cenários a massa se movimentou (ou seja, o fator de segurança aproximou-se de 1,0), porém a diferença nos valores de ϕ mobilizado sugere um efeito da taxa de deformação na resistência mobilizada: no evento de deslocamento mais rápido, o solo parece ter mobilizado uma parcela maior de sua resistência ao cisalhamento, possivelmente devido a componentes viscosas ou de reforço estrutural remanescente que se ativam em altas velocidades de deformação. Já no rastejo, o solo tende a mobilizar apenas sua resistência residual mais baixa, com acomodação das descontinuidades ao longo do tempo.

Diante dessa constatação, houve motivação para investigar em detalhes a influência da velocidade de cisalhamento no comportamento do solo residual de filito do maciço. Para tal, foram conduzidos ensaios de cisalhamento direto em laboratório com diferentes velocidades de

deslocamento, utilizando amostras indeformadas representativas do talude. Nesses ensaios, controlou-se a velocidade de aplicação do cisalhamento (varrendo desde taxas mais lentas até mais rápidas, dentro do regime drenado) a fim de observar eventuais variações nos parâmetros de resistência mobilizados. Os resultados obtidos em laboratório serviram para validar as observações de campo: verificou-se que, de fato, a taxa de deformação altera a mobilização da resistência ao cisalhamento do solo - variações na velocidade de cisalhamento resultaram em diferenças sutis nos envelopes de resistência, alinhando-se à hipótese de contribuição viscosa observada no maciço MA04. Esses resultados complementares reforçam a ideia de um comportamento tempo-dependente do solo (isto é, viscoplasticidade ou efeitos de taxa de carregamento).

3.5 - Maciço MA05 (km 590+500 - BR-040/MG)

O maciço é formado por solos residuais derivados de filitos. Predominam horizontes silto-argilosos com bandamentos micáceos; em profundidade, o grau de alteração diminui e a foliação torna-se mais nítida e contínua. As direções e mergulhos variam ao longo da seção, com predominância de mergulhos voltados para o fundo do vale. Essa configuração torna-se desfavorável à estabilidade sempre que a face do talude intercepta o mergulho dos planos de foliamento, favorecendo a formação de superfícies potenciais de escorregamento. Do ponto de vista hidráulico, a orientação desses planos também direciona o fluxo subterrâneo ao longo das foliações, podendo conduzir água em direção à contenção e, assim, elevar pressões neutras e reduzir a resistência efetiva ao longo das descontinuidades.

As sondagens indicam: (i) camada superficial de solo residual maduro; (ii) solo residual de filito com aumento de estruturação com a profundidade; (iii) ausência de rocha sã nos furos executados, a despeito de alta resistência à perfuração (o avanço das sondagens rotativas demandou esforços equivalentes aos de rocha, coerente com filito pouco alterado, porém muito foliado em profundidade). Essa combinação cria um perfil “pseudo-rocha”: material muito resistente à perfuração, mas geomecanicamente controlado por descontinuidades.

A foliação funciona como plano preferencial de permeabilidade e cisalhamento, condicionando fluxos dirigidos e perdas de sucção em períodos chuvosos. A montante minerada (cavas, aterros, drenagens) pode ter reconfigurado o regime freático, favorecendo elevações localizadas de N.A. e redistribuição de tensões no corpo do maciço. Na base do maciço de montante, sinais como vegetação inclinada e formação de ravinas sugerem deformação progressiva do terreno, possivelmente associada a *creep* e a reativações sazonais (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Bacia de contribuição com feições de movimentação de massa, destacando áreas de voçoroca (limites em amarelo) e processos de rastejo (limites em vermelho), além da ocorrência de trincas (Fonte: Silva; Costa; Ehrlich, 2020).

A estrutura de contenção era composta por até três lances de cortina ancorada, totalizando aproximadamente 19 m de altura, e possuía mais de três décadas em operação. Em janeiro de 2018, após eventos de chuvas intensas, ocorreu o colapso de um segmento da cortina, resultando em superfície de ruptura quase verticalizada e alinhada ao bordo da rodovia, Figura 3.9. Em caráter emergencial, executou-se solo grampeado na cicatriz, Figura 3.10, e instalaram-se drenos horizontais profundos para redução de poropressões. Devido à verticalização da ruptura, foi ainda construído um aterro na base da cicatriz, atuando como berma de equilíbrio. Na interface entre o aterro de equilíbrio e o maciço natural foi executada uma camada drenante. Em etapa posterior, novas cortinas foram implantadas, os segmentos preservados reforçados e o sistema de drenagem subterrânea ampliado, incluindo drenos longitudinais profundos (DLPs).



Figura 3.9 - Ruptura de estrutura de contenção composta por três lances de cortina ancorada (N1, N2 e N3). (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2020).



Figura 3.10 - Execução de solo grampeado na cicatriz da ruptura.

Nas proximidades do maciço observam-se intervenções antrópicas, entre as quais se destacam as atividades de mineração a montante, conforme ilustrado na Figura 3.11. Essas obras modificam a morfologia natural da encosta e podem alterar tanto o estado de tensões quanto o regime de água subterrânea, introduzindo variáveis que afetam a estabilidade do maciço.

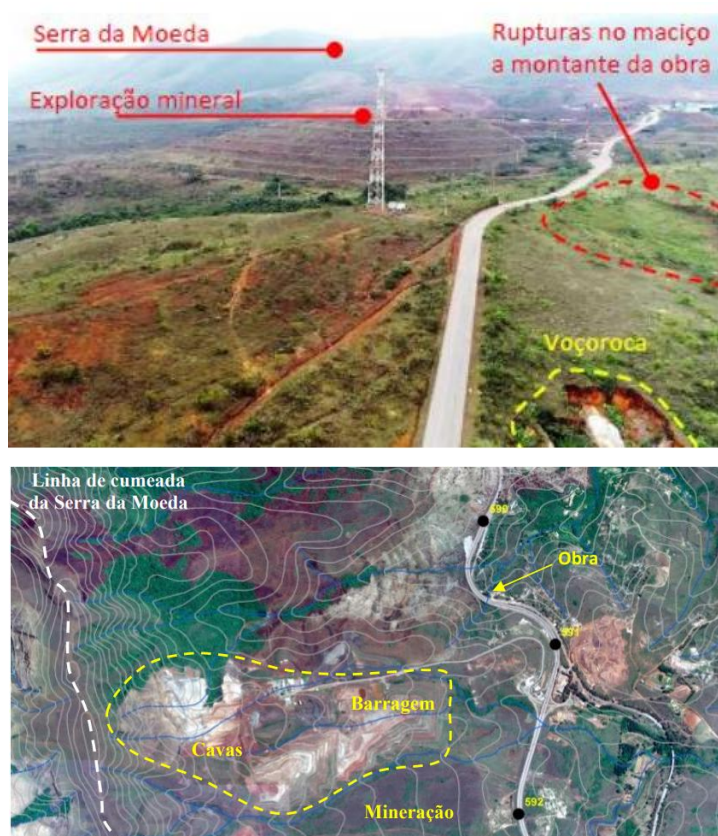


Figura 3.11 - Intervenções antrópicas nas próximas do MA05, incluindo mineração e barragem com talude de jusante superior a 50 m (Fonte: Adaptado de Silva; Costa; Ehrlich, 2020).

Durante a execução dos drenos horizontais profundos na região de montante, identificou-se, a aproximadamente 35 m de profundidade, um pacote cascalhoso espesso, com

espessura superior a 20 m, composto predominantemente por fragmentos de quartzo pouco arredondados e mal selecionados (Figura 3.12). Essa litofácies sugere a presença de um antigo leque coluvionar (paleo-grota), posteriormente soterrado por um manto residual ou coluvionar derivado do filito. O corpo granular atua como reservatório e dreno interno, favorecendo fluxos concentrados em direção a jusante durante períodos de recarga prolongada, o que explica as oscilações do nível d'água e a mobilização de poropressões ao longo do contato filito-cascalho.



Figura 3.12 - Ocorrência de cascalho a partir de aproximadamente 35 m de profundidade.

A foliação do filito, mergulhando para o fundo do vale, associada ao forte contraste de permeabilidade nesse contato, estabelece planos preferenciais de cisalhamento e propicia deformações progressivas no talude. Como hipótese alternativa, admite-se a ocorrência de um deslizamento translacional antigo em bloco de filito sobre um preenchimento coluvio-aluvionar. Em ambos os cenários, a elevada permeabilidade do cascalho favorece o escoamento subsuperficial e a pressurização do solo residual subjacente, promovendo redução de sucção em períodos chuvosos e reativações sazonais do maciço.

Diferentemente dos demais casos estudados, o MA05 está associado a uma obra de contenção, o que o torna singular dentro do conjunto analisado. O início da obra ocorreu em período chuvoso, momento em que a execução avançava concomitantemente à mobilização de trincas no pavimento (Figura 3.13), situação que demandava acompanhamento contínuo devido às condições hidrológicas e estruturais do local. (Figura 3.13). Embora compartilhe características geológicas e estruturais com o MA04, o regime hídrico é distinto, em função da morfologia em grota e das intervenções antrópicas na montante minerada, que reconfiguraram o sistema de drenagem natural e impuseram um forçamento externo sobre um maciço intrinsecamente anisotrópico. Nesse contexto, o estudo do MA05 complementa a análise regional, permitindo compreender como o comportamento dos solos residuais de filito é condicionado pela interação entre estrutura, hidrogeologia e intervenções antrópicas.



Figura 3.13 - Mobilização de trincas no pavimento.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para investigar o comportamento dos solos residuais de filito em condições naturais e controladas, esta pesquisa combinou ensaios laboratoriais e monitoramento geotécnico em campo. No laboratório, foram determinadas propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas e de erodibilidade. Já em campo, o uso de instrumentos como piezômetros, medidores de nível d'água e inclinômetros permitiu acompanhar, em escala real, o regime de água e os deslocamentos nos taludes estudados.

4.1 - INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

Nesta seção, descrevem-se os instrumentos empregados no monitoramento geotécnico, bem como os métodos utilizados para sua instalação em campo e análise das informações obtidas.

Os dados pluviométricos utilizados neste estudo foram obtidos junto à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Para cada maciço investigado, foi selecionada a estação mais próxima e com melhor representatividade, considerando a localização, a continuidade da série histórica e a resolução temporal disponível.

4.1.1 - INCLINÔMETROS

Os inclinômetros são dispositivos utilizados para o monitoramento de deslocamentos normais ao eixo de um tubo guia, com o objetivo de acompanhar a evolução de movimentos laterais em obras geotécnicas. O sistema é composto por um tubo guia instalado no subsolo, uma sonda responsável pelas leituras de inclinação ao longo da profundidade e uma unidade de leitura, que realiza a aquisição e o armazenamento dos dados medidos. Essa instrumentação permite avaliar a estabilidade de taludes e estruturas de contenção por meio da identificação de deslocamentos horizontais no interior do maciço.

A sonda, equipada com um transdutor sensível à gravidade (acelerômetro), é deslocada ao longo do tubo guia durante as campanhas de leitura, registrando a inclinação em intervalos regulares. O tubo, geralmente fabricado em PVC, possui ranhuras longitudinais internas que funcionam como trilhos de orientação para a sonda, garantindo a repetibilidade e o alinhamento das medições. A sonda transmite os sinais para a unidade de leitura portátil, responsável por processar e exibir os dados coletados. Esse conjunto é instalado em furos de sondagem com

alinhamento predominantemente vertical, é denominado “vertical inclinométrica”. A Figura 4.1 apresenta um esquema ilustrativo dos princípios de operação do inclinômetro.

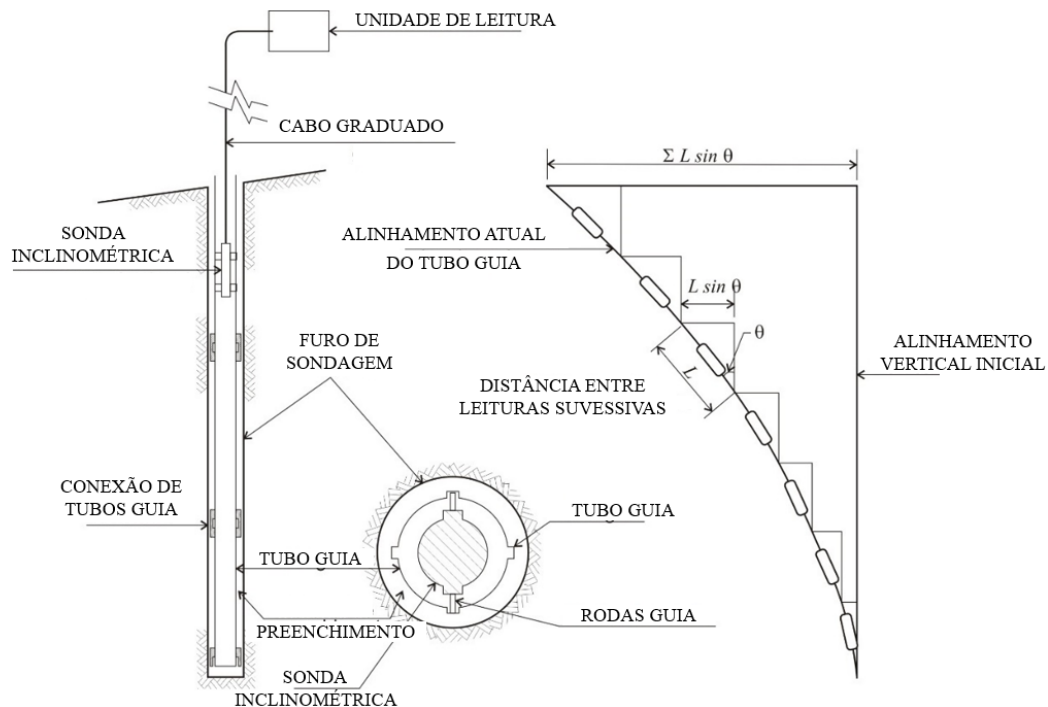


Figura 4.1 - Princípios de operação do inclinômetro (Fonte: Adaptado de Dunnycliff, 1988; Gomes, 2021).

A partir das leituras obtidas com a sonda, é possível determinar os deslocamentos horizontais ao longo da profundidade do tubo guia. A análise de leituras realizadas em diferentes campanhas permite estimar a localização do movimento, sua velocidade e os deslocamentos totais, o que possibilita identificar a profundidade das superfícies de ruptura e acompanhar a evolução das deformações em encostas e cortes ao longo do tempo (GEO-RIO, 2014; Dunnycliff, 1988).

4.1.2 - PIEZÔMETRO CASAGRANDE

O piezômetro de tubo aberto, também conhecido como piezômetro de Casagrande, recebeu essa denominação em referência ao engenheiro Arthur Casagrande, que descreveu métodos de monitoramento da poropressão durante a construção do Aeroporto de Logan, em Boston (Casagrande, 1949; 1958 *apud* Dunnycliff, 1988). Sua versão original consistia em um tubo cerâmico poroso conectado a uma bucha de borracha e, posteriormente, a um tubo plástico. O conceito permanece em uso até os dias atuais, com adaptações no projeto e na escolha de materiais mais modernos e resistentes às intempéries.

O funcionamento do piezômetro de tubo aberto baseia-se na medição direta da carga piezométrica por meio da observação do nível da coluna d'água estabilizada no interior do tubo. Para isso, o tubo é instalado de forma a manter comunicação hidráulica entre a superfície e uma zona específica no subsolo, definida por um elemento filtrante poroso. A poropressão atua sobre essa zona e, ao atingir o equilíbrio, o nível de água dentro do tubo reflete a carga hidráulica naquele ponto. A leitura da carga piezométrica corresponde à diferença entre a cota de referência da boca do tubo e a cota do nível d'água no interior do tubo (Dunnicliff, 1988).

A configuração típica do piezômetro Casagrande é composta por três elementos principais: o tubo de revestimento, o elemento filtrante e o sistema de vedação. O tubo é confeccionado em materiais não porosos como PVC ou PEAD, tem a função de conduzir a água subterrânea da região do bulbo até a superfície. Na extremidade inferior do tubo é posicionado o elemento filtrante, geralmente constituído por areia grossa ou cascalho, que permite a entrada da água e evita a migração de partículas finas do solo. Acima do filtro, aplica-se uma camada de vedação com mistura de cimento e bentonita, com o objetivo de isolar hidraulicamente a região, evitando a interferência de poropressões provenientes de outras profundidades (Dunnicliff, 1988).

No presente estudo, os piezômetros Casagrande foram instalados em furos de sondagem previamente executados na área de investigação, respeitando as profundidades de projeto para monitoramento da poropressão nas cotas de interesse. A instalação seguiu com posicionamento do elemento filtrante na profundidade a ser monitorada, preenchimento da região filtrante com areia lavada e posterior aplicação do selo. Cada piezômetro recebeu identificação individual e proteção superficial, as leituras passaram a ser realizadas após o período de estabilização da coluna d'água. A Figura 4.2 apresenta as fases de instalação de um piezômetro Casagrande.

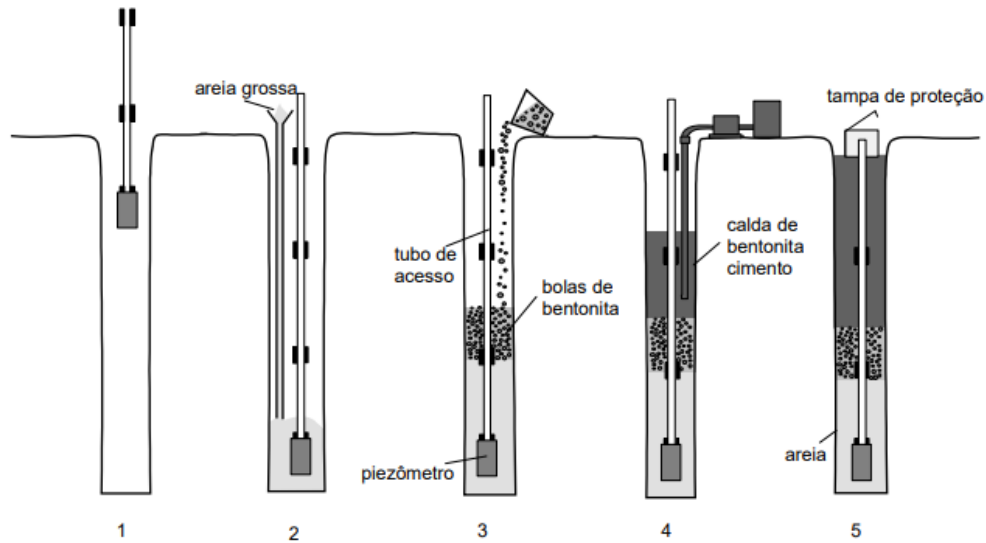


Figura 4.2 - Fases de instalação de um piezômetro Casagrande (Fonte: GeoRio, 2014).

Esses instrumentos apresentam como principais vantagens a simplicidade de instalação, o baixo custo e a confiabilidade. São considerados instrumentos resistentes às condições de campo e frequentemente utilizados como referência para a verificação da consistência de outros tipos de piezômetros instalados nas proximidades. No entanto apresentam resposta lenta a variações rápidas da carga piezométrica, a depender da permeabilidade do solo, além de serem suscetíveis a danos durante a execução de obras e à interferência no processo de compactação do entorno (Dunnicliff, 1988).

4.1.3 - MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA

O medidor de nível d'água é um instrumento utilizado com o objetivo de detectar a presença de água livre no solo, em equilíbrio com a pressão atmosférica. Sua instalação é realizada por meio da introdução de um tubo perfurado ou ranhurado ao longo de um furo, com preenchimento do espaço anelar com material granular drenante, geralmente areia lavada. Esse arranjo permite que a água se infiltre livremente no tubo, estabilizando uma coluna d'água. A Figura 4.3 apresenta de forma esquemática o perfil de instalação dos medidores de nível d'água.

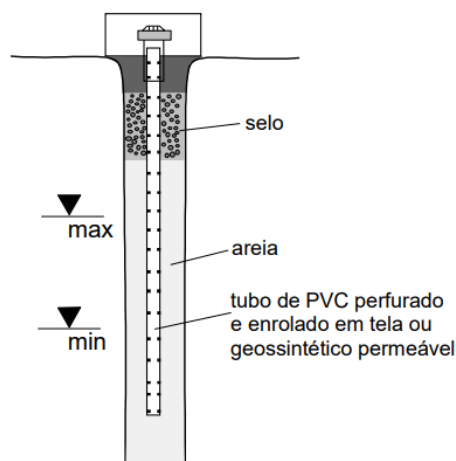


Figura 4.3 - Medidor de nível d'água INA (Fonte: GeoRio, 2024).

Em solos residuais derivados de filito, a presença de planos reliquiares oriundos da rocha matriz condiciona o comportamento hidráulico do maciço. Esses planos frequentemente funcionam como caminhos preferenciais de fluxo, podendo apresentar cargas hidráulicas distintas daquelas observadas na matriz do solo. A instalação de medidores de nível d'água por meio de furos contínuos cria conexões hidráulicas artificiais entre regiões com diferentes cargas hidráulica, realizando a redistribuição ao longo do tubo. Segundo Dunnicliff (1988), nessa configuração, o nível estabilizado no interior do instrumento tende a corresponder a camada com maior energia, não representando, portanto, as condições do maciço como um todo.

Em condições estáticas, onde não há movimento significativo de água no subsolo, a distribuição da pressão hidrostática com a profundidade é uniforme, fazendo com que os níveis medidos por piezômetros e medidores de nível d'água coincidam. No entanto, podem apresentar leituras diferentes em situações com fluxo de águas subterrâneas, sobrecarga ou descarga nas camadas superiores, especialmente em solos com baixa permeabilidade.

Apesar das limitações, o medidor de nível d'água é um instrumento simples e útil para a compreensão do regime hidrológico do maciço. Sua instalação conjunta com piezômetros, como adotado neste estudo, amplia a capacidade de interpretação sobre a variação do nível freático e o fluxo subterrâneo.

4.2 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Foram realizados ensaios laboratoriais com o objetivo de caracterizar o comportamento dos solos residuais de filito quanto às suas propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas e à suscetibilidade à erosão. As amostras foram obtidas em campanhas realizadas nos maciços MA01, MA02, MA03, MA04 e MA05, abrangendo tanto amostras deformadas quanto

indeformadas. Da Figura 4.4 à Figura 4.8 são apresentados registros fotográficos dessas campanhas de coleta, incluindo os procedimentos de retirada, identificação e preservação das amostras.

A partir desse material, foram conduzidos ensaios de caracterização física (granulometria, limites de Atterberg e densidade), cisalhamento direto, compressão triaxial (CIU e CID), Permeabilidade em carga variável, Papel Filtro, *Crumb Test* (dispersão), Desagregação, ensaio do furo de agulha (*Pinhole test*), Inderbitzen Modificado e Espectrometria de fluorescência de raios X.



Figura 4.4 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA01): solo residual maduro de filito (SRMF) e solo residual jovem de filito (SRJF) ensaiados em cisalhamento direto.



Figura 4.5 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA01): solo residual jovem de filito (SRJF) ensaiado no triaxial (Fonte: Gomes, 2021).



Figura 4.6 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA02)



Figura 4.7 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA03)



Figura 4.8 - Campanha de retiradas de amostras de solos (MA04).



Figura 4.9 - Campanhas de retiradas de amostras de solos (MA05): solo residual de filito coletado no Pé do Talude de Montante (Pé de Montante) e no Pé da Cortina Ancorada para realização de ensaios de cisalhamento direto.



Figura 4.10 - Campanhas de retiradas de amostras de solos (MA05): solo residual de filito de cores laranja e cinza coletados para realização de ensaios triaxiais.

4.2.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Foram realizados ensaios de caracterização física com o objetivo de obter os índices físicos e os limites de consistência, utilizados na classificação e na análise do comportamento dos solos estudados.

Os ensaios abrangeram análise granulométrica (com e sem defloculante), determinação do peso específico dos sólidos, teor de umidade natural e limites de liquidez e plasticidade. A preparação das amostras foi realizada conforme a ABNT NBR 6457:2016, assegurando a representatividade dos resultados. Os procedimentos seguiram as normas ABNT NBR 7181:2016 (análise granulométrica), ABNT NBR 6459:2016 (limite de liquidez) e ABNT NBR 7180:2016 (limite de plasticidade).

A partir dos ensaios, foram obtidos os parâmetros necessários para classificar os solos conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), de acordo com a ASTM D2487:2011. Esses dados também auxiliaram na compreensão do comportamento dos materiais frente à permeabilidade, à resistência ao cisalhamento e à suscetibilidade à erosão.

4.2.2 - PERMEABILIDADE

Para a realização dos ensaios de permeabilidade, utilizaram-se cilindros metálicos de aço inoxidável cravados *in situ*. O interior dos cilindros foi previamente untado com vaselina, com o objetivo de reduzir o atrito lateral entre o solo e as paredes internas durante a cravação. Esse procedimento também visa impedir a passagem de água pelas bordas internas, evitando a formação de caminhos preferenciais de fluxo ao longo da parede do cilindro. As amostras foram colocadas em permeômetros e submetidas à embebição em água por um período de 96 horas. Em seguida, foram percoladas sob uma carga hidráulica correspondente a um gradiente hidráulico previamente definido, durante um tempo também previamente estabelecido. Na Figura 4.11 são mostradas etapas do ensaio.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados com o objetivo de determinar a condutividade hidráulica dos solos analisados. Para isso, utilizaram-se corpos de prova indeformados submetidos a carga hidráulica variável, conforme estabelecido na ABNT NBR 14545:2021.

As amostras foram obtidas diretamente em campo por meio da cravação de cilindros metálicos de aço inoxidável, previamente lubrificadas com vaselina para reduzir o atrito lateral e evitar a formação de caminhos preferenciais de fluxo ao longo da interface solo-metal. Esse procedimento também teve por finalidade preservar a estrutura natural do solo, assegurando a integridade do corpo de prova desde a coleta até o ensaio.

Após a coleta, os corpos de prova foram submetidos a um processo de embebição em água durante 96 horas, com o objetivo de simular uma condição próxima da saturação. Em seguida, as amostras foram acopladas aos permeômetros de carga variável, e a percolação foi conduzida sob gradiente hidráulico decrescente, com leituras periódicas do nível d'água. O coeficiente de permeabilidade foi determinado conforme os procedimentos estabelecidos na norma.



Figura 4.11 – Etapas do ensaio de permeabilidade.

4.2.3 - CISALHAMENTO DIRETO

Os ensaios de cisalhamento direto foram conduzidos segundo os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM D3080-11, com o objetivo de obter os parâmetros de resistência drenada dos solos analisados. Por apresentarem curto caminho de drenagem, esses ensaios permitem a dissipação do excesso de poropressão durante o carregamento, sendo aplicáveis a diferentes tipos de solo, desde que garantidas as condições de drenagem. A Figura 4.12 apresenta um esquema típico do equipamento utilizado.

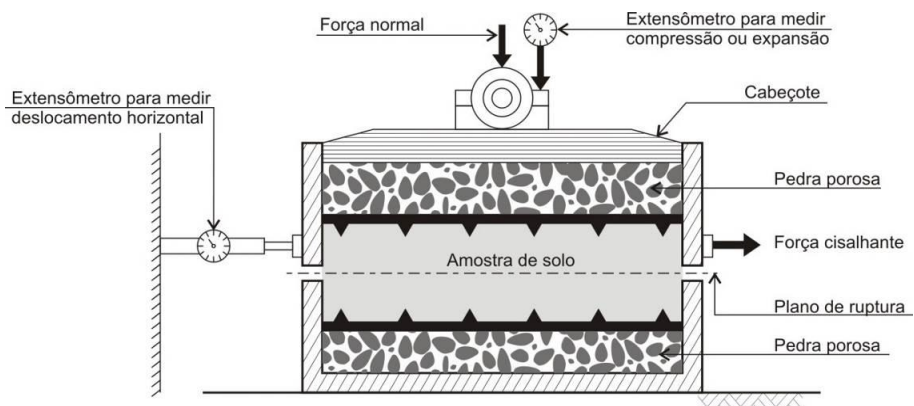


Figura 4.12 - Esquema de ensaio de cisalhamento direto (Fonte: GeoRio, 2014).

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em corpos de prova (CP) de seção transversal quadrada, com $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ (25 cm^2 de área) e altura inicial de $2,0\text{ cm}$. As amostras foram coletadas na umidade natural, sendo parte ensaiada nessa condição e parte previamente embebida em laboratório, com o objetivo de avaliar a influência da umidade sobre o comportamento mecânico dos solos.

Nas amostras embebidas, os corpos de prova foram imersos em água por, no mínimo, 24 horas antes do ensaio. Em seguida, procedeu-se ao adensamento sob a respectiva tensão normal de ensaio e, após a etapa de adensamento, realizou-se o cisalhamento do corpo de prova. Para as amostras em condição natural, foram executadas diretamente as etapas de adensamento e cisalhamento, respeitando-se o mesmo procedimento. Sempre que possível, buscou-se alinhar os planos de foliação com o plano de cisalhamento durante a montagem dos corpos de prova na caixa de ensaio, a fim de avaliar sua influência na resistência mobilizada.

Durante a fase de cisalhamento, são monitorados a força tangencial mobilizada ao longo do plano de cisalhamento, o deslocamento vertical do cabeçote e o deslocamento horizontal da caixa. Os resultados obtidos são representados por gráficos de tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal. A partir dessas curvas, identifica-se o ponto de ruptura de cada corpo de prova, definido pela tensão cisalhante máxima (pico) ou pela tensão mobilizada a 10% de deslocamento lateral relativo.

A etapa de adensamento do CP deve durar até que o adensamento primário esteja essencialmente finalizado. A determinação dessa condição pode ser realizada de três formas: a) interpretação da curva tempo x deslocamento vertical (Figura 4.13), b) experiência com o material ou c) um tempo padrão de 24 horas. Ao final da etapa de adensamento a deformação vertical é registrada.

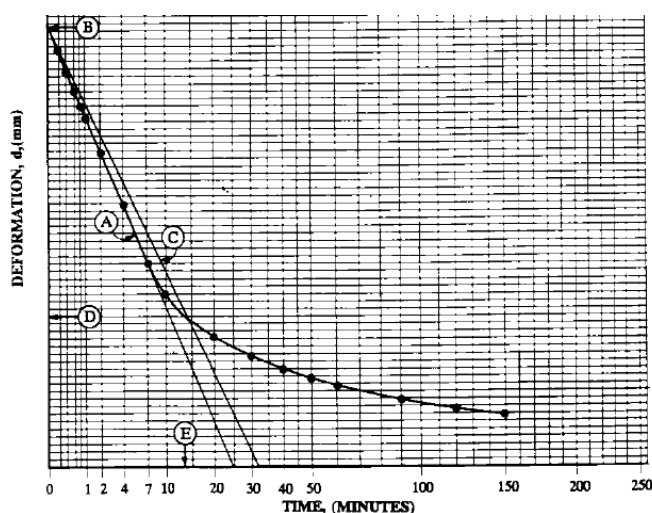


Figura 4.13 - Curva tempo x deformação do método da raiz quadrada (Fonte: ASTM D2435)

- A) Curva raiz quadrada do tempo x deformação vertical (obtida a partir da etapa de adensamento);
- B) d_0 , extensão da porção linear inicial da curva a um tempo igual a 0 minutos;
- C) Construção da linha com inclinação 1,15 vezes a porção linear da curva A;
- D) d_{90} , deslocamento no ponto onde a curva A cruza a linha C;
- E) t_{90} , tempo no ponto onde a curva A cruza a linha C.

As leituras de deslocamento, d , versus a raiz quadrada do tempo (normalmente em minutos) são plotadas em um gráfico. Em seguida, uma linha reta é traçada através dos pontos que representam as leituras iniciais que exibem uma tendência retilínea. Essa linha reta é extrapolada até $t=0$, permitindo a obtenção do deslocamento que representa 0% do adensamento primário. Na sequência, uma segunda reta é traçada, a partir da ordenada 0%, de modo que a abscissa dessa linha seja 1,15 vezes a abscissa da primeira reta. A interseção dessa segunda linha com a curva raiz quadrada do tempo x deformação vertical indicam o deslocamento d_{90} e o tempo t_{90} , correspondentes a 90% do adensamento primário. A deformação a 100% de adensamento é 1/9 maior que a diferença entre o deslocamento a 0% e 90% de adensamento. Dessa forma, o tempo que indica o fim do adensamento primário, t_{100} , pode ser obtido pela interseção da curva raiz quadrada do tempo x deformação vertical e a ordenada correspondente a essa deformação.

A velocidade do ensaio depende do comportamento observado na fase de adensamento. Caso o corpo-de-prova seja cisalhado a uma velocidade maior do que a determinada, pode ocorrer uma condição parcialmente drenada durante a etapa de cisalhamento. Os resultados do ensaio nessa condição divergem da condição drenada. Dessa forma, o corpo-de-prova deve ser cisalhado com velocidade lenta o suficiente para permitir a dissipação do excesso de poropressão gerado no decorrer do ensaio. Para determinar a velocidade de cisalhamento adequada, estimam-se o tempo necessário para a dissipação do excesso de poropressão e a deformação requerida para que a ruptura seja atingida. Esses dois fatores dependem do tipo de material e da história de tensões.

O tempo de cisalhamento até a ruptura, t_f , é calculado com base na curva tempo x deslocamento vertical (Figura 4.13). A partir da determinação do tempo t_{90} , t_f é obtido a partir da seguinte equação:

$$t_f = 11,6 \cdot t_{90}$$

Quanto não for possível determinar o valor de t_{90} ou quando o corpo-de-prova estiver significativamente sobreadensado (OCR maior ou igual a 2) sob a tensão de adensamento do ensaio, valores padrões para t_f podem ser obtidos a partir da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Tempos mínimos t_f em função do tipo de solo.¹

Classificação USCS (ASTM D2487)	Tempo mínimo até a ruptura, t_f
SW, SP (< 5% finos)	10 min
SW-SM, SP-SM, SM (> 5% finos)	60 min
SC, ML, CL, SP-SC	200 min
MH, CH	24 h

Após a determinação de t_f , é necessário estimar o deslocamento lateral necessário para levar o corpo-de-prova a ruptura, d_f . Este deslocamento depende de muitos fatores que incluem o tipo de material e a história de tensões. Na ausência de experiência relativa às condições de ensaio, considerando que a ruptura ocorre a um deslocamento lateral relativo de cerca de 10%, pode-se utilizar $d_f = 5\text{mm}$ para um corpo-de-prova com 5cm de largura. Dessa forma, a velocidade de cisalhamento adequada é calculada a partir da seguinte equação:

$$R_d = \frac{d_f}{t_f}$$

Onde: R_d = velocidade de cisalhamento (mm/min)

4.2.4 - CONSIDERAÇÕES

No ensaio de cisalhamento direto não é possível controlar a poropressão. Entretanto, o ensaio pode ser realizado em condições drenadas, desde que a velocidade de cisalhamento seja suficientemente lenta para evitar a geração de excessos de poro pressão significativos durante todo o ensaio. Geralmente, a amostra é previamente embebida por 24h para aumentar o grau de saturação até próximo de 100%. A escolha da velocidade depende do coeficiente de adensamento do solo, geralmente determinado na fase de adensamento anterior ao cisalhamento, e pode ser calculada de acordo com o procedimento descrito por Head (1982).

¹ Os tempos apresentados na Tabela 4.1 são baseados em estimativas de valores típicos de coeficientes de adensamento de materiais normalmente adensados para cada tipo de solo, considerando uma distância de drenagem de 1cm. Um solo específico pode variar consideravelmente desses valores típicos. Interpretações da curva raiz quadrada do tempo x deslocamento vertical pode conduzir erroneamente a velocidades elevadas de adensamento para solos parcialmente saturados ou materiais muito rígidos. Dessa forma, deve ser tomado cuidado caso a interpretação da curva conduzir a intervalos de tempo consideravelmente menores do que os valores da Tabela 4.1.

Por conta da impossibilidade de controlar/medir as poropressões e da necessidade de ajustar a velocidade, os ensaios de cisalhamento direto sob condições drenadas tornam-se muito lentos em solos argilosos com coeficientes de adensamento reduzidos.

No caso de ensaios realizados na umidade natural do solo, deve-se atentar que a sucção pode proporcionar uma coesão aparente significativa. Nesse caso, a envoltória obtida deve ser cuidadosamente interpretada pelo projetista, pois pode haver diferenças entre a umidade das amostras e a umidade de campo, que pode variar ao longo do tempo por efeitos de chuva, ressecamentos, vazamentos de água/esgoto etc.

A envoltória de resistência de diversos tipos de solos costuma ser curva. No caso dos solos residuais pode haver uma curvatura no trecho inicial de baixas tensões. Entretanto, o critério de resistência de Mohr-Coulomb pressupõe uma envoltória linear. Dessa forma, sempre haverá um erro matemático de ajuste nos parâmetros estimados. Quando o ajuste linear é realizado para um intervalo de tensões não representativo das condições de campo esse erro pode ser significativo.

Para a correta caracterização do solo, recomenda-se que sejam seguidas as prescrições da norma brasileira NBR 11682 (ABNT, 2009) acerca do número de ensaios e amostras indeformadas por seção transversal e por camada de solo. Vale ressaltar, entretanto, que os solos saprolíticos costumam ser heterogêneos, com núcleos de material menos ou mais decomposto que a massa. Também pode haver estruturas reliquiares herdadas da rocha mãe, tais como veios, intrusões, foliações etc. No caso dos solos saprolíticos de rochas metamórficas, as foliações reliquiares conferem uma marcante anisotropia de resistência. Quando a foliação tem orientação desfavorável à estabilidade do talude recomenda-se determinar as envoltórias de cisalhamento nas direções paralela e perpendicular à foliação e considerar a anisotropia nas análises de estabilidade. Nesse caso, pode haver dificuldades com o ensaio de cisalhamento direto no momento de alinhar a foliação com o plano de ruptura, quando as camadas de interesse tiverem espessura milimétrica. A Tabela 4.2 apresenta as características e os usos dos principais tipos de ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 4.2 - Ensaio de cisalhamento direto e sua aplicação em casos práticos (Fonte: GeoRio, 2014)

Condição de umidade	Parâmetros	Observações
Umidade natural	c, ϕ	Parâmetros em tensões totais na umidade em que o solo se encontra no campo. ²
Corpo de prova inundado	c', ϕ'	Parâmetros em termos de tensões efetivas.
Sucção constante (ensaio especial)	Envoltória para a sucção constante definida pelo projetista	Ensaio requer aparelhagem especial para manter constante a sucção. Não é usado correntemente.

4.2.5 - COMPRESSÃO TRIAXIAL

Os ensaios de compressão triaxial podem ser classificados em três tipos, conforme o controle da drenagem e a consolidação anterior. No ensaio UU (*Unconsolidated Undrained*), o corpo de prova não é consolidado nem drenado, e os parâmetros de resistência são obtidos em termos de tensões totais, sem medição da poropressão. No ensaio CIU (*Consolidated Isotropically Undrained*), realiza-se a consolidação isotrópica sob carga confinante com drenagem permitida, mas a fase de cisalhamento é conduzida sem drenagem, com medição das pressões neutras, nesse caso, é possível interpretar os resultados tanto em termos de tensões totais quanto efetivas. Já no ensaio CID (*Consolidated Isotropically Drained*), a drenagem é permitida durante toda a fase de cisalhamento, impedindo o desenvolvimento de excesso de poropressão, e os parâmetros de resistência são obtidos diretamente em termos de tensões efetivas (Head, 1986; Das, 2013).

Foram realizados ensaios do tipo CID e CIU, permitindo simular diferentes condições de carregamento. Os corpos de prova foram obtidos a partir de amostras indeformadas, com dimensões de aproximadamente 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, conforme as especificações das normas ASTM D4767 (CIU) e ASTM D7181 (CID). O grau de saturação foi verificado por meio do coeficiente B, de Skempton, com $B \geq 0,95$. Após a saturação, os CPs foram submetidos à consolidação isotrópica até a dissipação da poropressão.

² o projetista deve estar ciente de que a umidade do solo à época da amostragem pode ser inferior à maior umidade possível durante o período chuvoso. Há drenagem parcial durante o ensaio e sua interpretação fica a cargo do projetista.

Os procedimentos experimentais seguiram as recomendações das normas ASTM D4767 e ASTM D7181. Após a consolidação isotrópica, as amostras foram submetidas a carregamento axial com controle de deformação, em taxa adequada à condição de drenagem. Nos ensaios CIU, foram registradas as pressões neutras geradas. Já nos ensaios CID, garantiu-se o fluxo livre para drenagem durante o carregamento.

A ruptura foi definida com base na tensão desviadora máxima ou no patamar atingido em 20% de deformação axial, conforme o comportamento da curva tensão desviadora x deformação. A partir dos resultados, traçaram-se as envoltórias de resistência efetiva segundo o critério de Mohr-Coulomb, com determinação dos parâmetros ϕ' e c' para cada tipo de ensaio e tensão confinante.

A realização dos ensaios triaxiais foi motivada pela necessidade de avaliar a resposta dos solos residuais de filito sob diferentes trajetórias de tensão, considerando a heterogeneidade dos materiais e sua anisotropia. Ao permitir que a superfície de ruptura se desenvolva livremente, o ensaio triaxial possibilita a mobilização dos planos de fraqueza naturais do solo, ao contrário do cisalhamento direto, que impõe um plano de ruptura pré-definido. No entanto, como a orientação das foliações em relação ao eixo de sollicitação varia entre os corpos de prova, algumas amostras podem apresentar planos mais ou menos desfavoráveis à ruptura, o que se reflete na variabilidade dos parâmetros obtidos. Ainda assim, os resultados permitiram comparar os comportamentos drenado e não drenado, bem como validar os parâmetros obtidos em outros ensaios, como o cisalhamento direto, reforçando a interpretação do comportamento mecânico dos maciços analisados.

4.2.6 - PAPEL FILTRO

A técnica do papel filtro permite estimar a sucção do solo com base no equilíbrio de umidade entre o solo e o papel. Dependendo da forma como o papel é disposto, podem ser obtidos dois tipos distintos de sucção. Quando o papel está em contato direto com o solo, o equilíbrio ocorre por fluxo capilar, e a sucção estimada é apenas a mátrica, relacionada à tensão da água nos poros do solo. Por outro lado, quando não há contato físico, o equilíbrio se dá por fluxo de vapor, e a sucção medida passa a refletir a soma da sucção mátrica com a osmótica, sendo denominada sucção total (Fredlund; Rahardjo, 1993; Marinho, 1995; Chandler; Gutierrez, 1986).

De acordo com Riccio Filho (2007), a técnica do papel filtro tem como objetivo estabelecer uma relação entre o teor de umidade do solo e a sucção. O teor de umidade pode ser expresso em termos de umidade gravimétrica (W), umidade volumétrica (θ) ou grau de

saturação (S), enquanto a sucção correspondente pode ser classificada como mátrica ou total. A Figura 4.14 ilustra essas duas condições experimentais típicas da técnica do papel filtro.

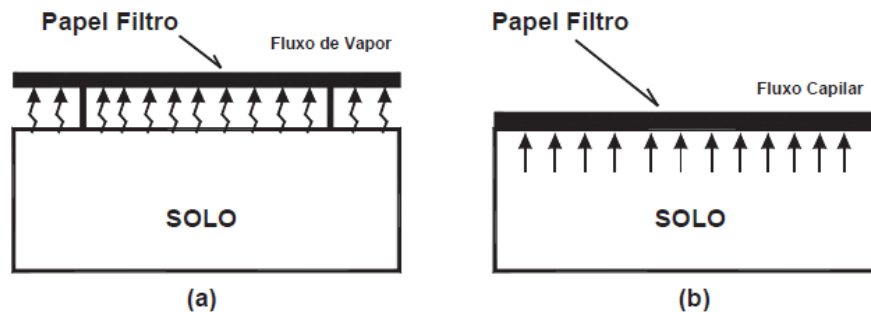


Figura 4.14 - Métodos para medida de sucção: a) sem contato solo-papel (sucção total) e b) com contato solo-papel (sucção matricial) (Fonte: Riccio Filho, 2007).

O teor de umidade de equilíbrio do papel é convertido em valor de sucção com base em curvas de calibração padronizadas (Chandler *et al.*, 1992; Mcqueen; Miller, 1968; Leong *et al.*, 2002; Marinho, 1997; Oliveira, 2006). A norma ASTM D5298 apresenta curva de calibração própria para o papel filtro Whatman nº 42, conforme discutido por Bicalho *et al.* (2009).

O tempo necessário para que o equilíbrio de sucção entre o solo e o papel filtro seja atingido é fundamental para a confiabilidade dos resultados. A norma ASTM D5298 (2022) recomenda um período mínimo de sete dias sob temperatura constante de 25 °C. De acordo com Marinho (1995), sucções mais baixas demandam tempos maiores de equalização, podendo ultrapassar 30 dias para sucções totais inferiores a 250 kPa; cerca de 15 dias para sucções entre 250 e 1000 kPa; e aproximadamente 7 dias para sucções na faixa de 1000 a 30000 kPa.

Considerando esses critérios estabelecidos pela norma e pela literatura especializada, a técnica do papel filtro foi aplicada neste trabalho com o objetivo de determinar a sucção mátrica dos solos estudados, conforme descrito a seguir.

Os ensaios realizados tiveram o intuito de medir a sucção mátrica dos solos por meio da técnica do papel filtro em contato com o solo, utilizando papéis do tipo Whatman nº 42. A metodologia adotada foi baseada no procedimento descrito por Marinho (1994). A Figura 4.15 apresenta as etapas do ensaio de papel filtro.



Figura 4.15 - Etapas do ensaio de papel filtro (Fonte: Silva, 2010).

Inicialmente, todos os corpos de prova foram levados à condição de saturação em água. Após a saturação, as amostras foram expostas ao ambiente, em temperatura controlada (25 °C), para secagem natural ao ar até atingirem diferentes teores de umidade, permitindo a obtenção de pontos ao longo da curva característica solo-água. O processo de secagem foi conduzido de forma gradual e monitorada, de modo que cada amostra atingisse um teor de umidade menor que a anterior.

Ao atingirem os teores de umidade desejados, foram inseridos papéis filtro Whatman nº 42 em contato direto com o solo, posicionando-se um na face superior e outro na face inferior de cada corpo de prova. Em seguida, os corpos de prova foram vedados com filme plástico, colocados em potes herméticos e mantidos sob temperatura constante (25 °C) por um período de sete dias, tempo necessário para o equilíbrio de sucção.

Após o tempo de equalização, os papéis filtro foram removidos com cuidado para evitar variações na umidade. Imediatamente após a remoção, cada papel foi acondicionado em sacos plásticos com fecho hermético, para evitar ganho ou perda de umidade por troca com o

ambiente. Em seguida, os papéis foram pesados em balança analítica com resolução de 0,0001 g.

Os papéis foram então retirados dos sacos herméticos e levados à estufa a 105 °C por um período de 24 horas. Após esse tempo, ainda quentes, foram novamente colocados nos mesmos sacos e selados para impedir reabsorção de umidade do ar ambiente. Os sacos foram então pesados novamente, e o valor da tara foi descontado para obtenção da massa seca do papel.

A umidade foi calculada pela diferença entre a massa úmida e a massa seca do papel, dividida pela massa seca. Cada tipo de papel deve possuir sua própria curva de calibração, válida tanto para a medição da sucção mátrica quanto da sucção total, conforme destacado por Fredlund e Rahardjo (1993). Com esses valores, a sucção mátrica foi estimada por meio da curva de calibração proposta por Chandler *et al.* (1992), específica para o papel filtro Whatman nº 42. As equações utilizadas para estimar a sucção a partir da umidade gravimétrica do papel filtro estão apresentadas a seguir:

$$\text{Para } w_f > 47 (\%): \quad \text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05 - 2,8 \log w_f)} \quad (1)$$

$$\text{Para } w_f \leq 47 (\%): \quad \text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622 w_f)} \quad (2)$$

Onde:

w_f = umidade gravimétrica do papel filtro;

Sucção (kPa) = sucção mátrica (papel em contato com o solo) ou total (papel sem contato com o solo).

A curva característica solo-água pode ser definida por meio de relações empíricas, a partir dos dados de sucção mátrica e umidade volumétrica obtidos experimentalmente (Gardner, 1958; Burdine, 1953; Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980; Fredlund; Xing, 1994). A relação empírica utilizada para estimar a curva característica solo-água foi a de Fredlund e Xing (1994), apresentada na equação abaixo:

$$\theta(\psi, a, n, m) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^m}$$

com

$$C(\psi) = \frac{-\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (1.000.000/\psi_r)]}$$

onde:

$\theta(\psi)$: umidade volumétrica a uma dada sucção ψ ;

θ_s : umidade volumétrica em condição saturada;

θ_r : umidade volumétrica residual;

ψ : sucção mátrica (kPa);

a, n e m : parâmetros de ajuste do modelo;

$C(\psi)$: função de correção que ajusta a equação para considerar o comportamento assintótico da curva em sucções elevadas.

Os parâmetros de ajuste a , n e m do modelo de Fredlund e Xing (1994) foram estimados graficamente a partir do ponto de inflexão da curva característica solo-água, identificado pelas coordenadas (ψ_i, θ_i) , e da inclinação s da reta tangente traçada nesse ponto em um gráfico semilogarítmico. A interseção dessa tangente com o eixo de sucção é representada por ψ_p .

$$a = \psi_i$$
$$m = 3,67 \ln \left[\frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right]$$
$$n = \frac{1,31^{m+1}}{m C(\psi_i)} 3,72 s^*$$

A inclinação corrigida s^* , utilizada na equação xx, é calculada conforme equação xx:

$$s^* = \frac{s}{\theta_s} - \frac{\psi_i}{1,31^m (\psi_i + \psi_r) \ln [1 + (1000\ 000 / \psi_r)]}$$

A inclinação s da linha tangente é calculada pela equação xx.

$$s = \frac{\theta_i}{\ln (\psi_p / \psi_i)}$$

A metodologia descrita permitiu a obtenção dos parâmetros do modelo de Fredlund e Xing (1994) com base em procedimentos gráficos e expressões empíricas, resultando em curvas características compatíveis com os dados experimentais. Os resultados ajustados e a análise comparativa entre os diferentes maciços são apresentados na Seção 5.5.

4.2.7 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA

Com o objetivo de avaliar a suscetibilidade à erosão interna por dispersão coloidal, foram realizados ensaios de furo de agulha, conforme a metodologia descrita na norma ABNT NBR 14114:2022. Este ensaio, originalmente proposto por Sherard *et al.* (1976), permite identificar qualitativamente a dispersividade de solos argilosos por meio da observação do comportamento de um fluxo concentrado que atravessa um furo axial de 1 mm de diâmetro em um corpo de prova cilíndrico, conforme ilustrado na Figura 4.16.

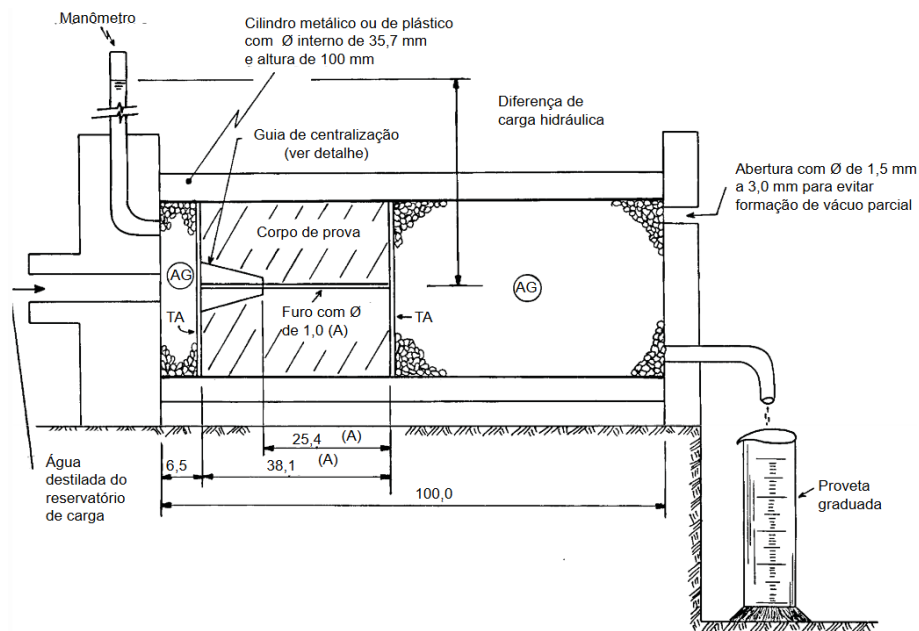


Figura 4.16 - Detalhe do corpo de prova para o ensaio de Pinhole (Fonte: ABNT, 2022).

Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram confeccionados a partir de amostras indeformadas, extraídas dos MA localizados ao longo da BR-040, na região do Quadrilátero Ferrífero. A escolha por amostras indeformadas visou preservar a estrutura original dos solos e permitir a avaliação do comportamento dispersivo em condições *in situ*.

Durante o ensaio, foram aplicadas cargas hidráulicas crescentes com água destilada, e foram monitoradas a turbidez do efluente, a vazão ao longo do tempo e o alargamento do furo. A classificação da dispersividade seguiu os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 14114:2022, que definem seis categorias (ND1 a ND6), com base na coloração da água percolada, variação da vazão e inspeção visual do diâmetro final do furo, conforme ilustrado Figura 4.17.

Os resultados permitiram a identificação de trechos potencialmente críticos quanto à ocorrência de erosão interna, auxiliando no entendimento do comportamento do solo em condições de fluxo concentrado.

4.2.8 - DESAGREGAÇÃO

De forma geral, o ensaio de imersão total simula uma inundação imediata das amostras, situação essa semelhante a encontrada em projetos de barragens. Para o caso de pesquisa, o método de imersão parcial é mais recomendável, pois simula um aumento gradativo de água no solo, muito similar aos processos de infiltração e ascensão capilar, comumente observados em solos não saturados. A Figura 4.18 é bem ilustrativa, pois além de indicar o ensaio, mostra a influência da xistosidade no processo de fraturação do solo quando em contato com água.

O ensaio de desagregação visa avaliar qualitativamente a resistência estrutural de amostras indeformadas de solo frente ao umedecimento progressivo. As amostras, moldadas em cubos com 6 cm de aresta, são submetidas a dois procedimentos distintos: imersão total e imersão parcial. No método de imersão total, a amostra é inicialmente posicionada sobre uma pedra porosa, com o nível d'água ajustado à base do corpo de prova por 30 minutos. Em seguida, é totalmente submersa e mantida nessa condição por 24 horas (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

O método de imersão parcial, conforme descrito por Camapum de Carvalho *et al.* (2006), é realizado em quatro estágios: (i) água na base por 30 minutos; (ii) imersão até 1/3 da altura por 15 minutos; (iii) até 2/3 por mais 15 minutos; e (iv) submersão total até completar 24 horas. Esse procedimento busca simular a infiltração progressiva de água no solo, aproximando-se das condições naturais observadas em campo. A Figura 4.18 ilustra a evolução da resposta de uma amostra submetida ao ensaio, destacando a influência da xistosidade no padrão de fraturamento durante o umedecimento.

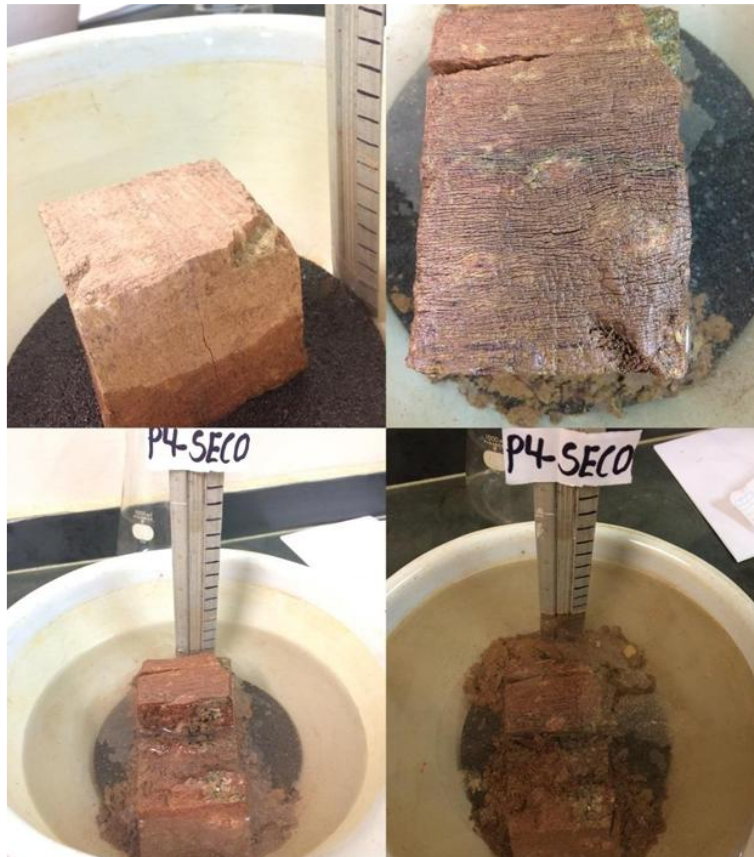


Figura 4.18 - Ensaio de desagregação por inundação parcial (Fonte: Vieira, 2017).

Durante o ensaio, observam-se visualmente os efeitos do umedecimento na estrutura da amostra, que pode ser classificada em quatro categorias distintas: sem resposta, quando a amostra mantém sua forma e tamanho originais, fraturamento, quando ocorre quebra em fragmentos, preservando parcialmente as faces externas; abatimento, caracterizado pela desintegração da amostra, formando um monte desestruturado, e dispersão, quando há perda de definição das paredes e formação de uma nuvem coloidal que se propaga na água.

De forma geral, o ensaio de imersão total simula uma condição de inundação súbita das amostras, cenário frequentemente associado a projetos de barragens e outras estruturas sujeitas à rápida elevação do nível d'água. Por outro lado, para estudos em solos não saturados, o método de imersão parcial é mais apropriado, pois reproduz um processo de saturação gradual, compatível com fenômenos naturais como a infiltração pluviométrica e a ascensão capilar.

4.2.9 - DISPERSÃO

O ensaio de dispersão, também conhecido como *Crumb Test*, foi conduzido conforme a ABNT NBR 13601:2020, que estabelece os procedimentos para a avaliação visual da dispersibilidade de solos argilosos. O método consiste em submeter torrões de solo, secos ao ar

e com diâmetro entre 6 mm e 10 mm, à imersão em cerca de 150 mL de água destilada ou solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,001 N, em béqueres com capacidade mínima de 200 mL. Após um período de 1 hora em repouso, realiza-se a observação visual da água e do solo, verificando a formação de colóides em suspensão e o grau de turvação do fluido. Com base nessa análise, o solo é classificado em quatro graus distintos de dispersão:

- Grau 1 - não dispersivo: o torrão pode se esboroar ou colapsar, mas a água permanece clara;
- Grau 2 - levemente dispersivo: turvação leve, localizada junto ao torrão;
- Grau 3 - moderadamente dispersivo: formação de veios de colóides e turvação mais evidente;
- Grau 4 - fortemente dispersivo: presença de nuvem coloidal difusa ou completa turvação do líquido.

A norma recomenda a realização do ensaio utilizando a solução alcalina de NaOH 0,001 N, uma vez que muitas argilas dispersivas não apresentam reação visível na água destilada. Essa diferença de comportamento está relacionada à atuação dos íons sódio na estrutura elétrica das partículas de argila, que promovem o afastamento das partículas e favorecem a dispersão coloidal. Portanto, o uso da solução alcalina é considerado uma condição mais sensível e confiável para a identificação do comportamento dispersivo.

Por ser um método qualitativo, o *Crumb Test* deve ser considerado uma ferramenta de triagem inicial. Quando se identificam sinais de dispersão, especialmente nos graus 3 e 4, é recomendada a realização de ensaios complementares, como o ensaio sedimentométrico comparativo e o ensaio de furo de agulha, bem como a análise química da água intersticial.

4.2.10 - INDERBITZEN MODIFICADO

O ensaio de Inderbitzen foi desenvolvido por Inderbitzen (1961) com o objetivo de simular, em laboratório, os efeitos do escoamento superficial sobre o solo, por meio de uma lâmina de água aplicada sobre uma amostra em rampa com vazão controlada. Embora eficiente para representar o carreamento laminar, esse método não contempla o impacto das gotas de chuva, principal agente da desagregação inicial do solo. Conforme destacado por Jozélia Assunção Fernandes (2011), o uso do ensaio de Inderbitzen foi introduzido no Brasil e proposto como ensaio geotécnico para avaliação da erodibilidade dos solos no âmbito da pesquisa “Estabilidade de Taludes”, desenvolvida entre 1975 e 1978 por meio da cooperação entre o IPR, a COPPE e o programa TRAFECON.

Com o objetivo de incorporar esse efeito, Freire (2001) propôs uma modificação no equipamento original, passando a simular também o impacto vertical de gotas, efeito “*splash*”, condição mais próxima da chuva natural. Essa adaptação, conhecida como Inderbitzen Modificado, introduz tubos perfurados ou chuveiros posicionados a cerca de 20 cm de altura sobre a amostra, que é disposta sobre uma grade inclinada, formando uma rampa. O sistema permite, simultaneamente, a atuação do fluxo laminar e do gotejamento vertical.

A erosão por “*splash*” ou salpicamento consiste na desagregação superficial do solo provocada pelo impacto direto das gotas de chuva, que gera o levantamento e o espalhamento das partículas, sobretudo quando o solo está exposto e sem cobertura vegetal (Freire, 2001; Camapum *et al.*, 2006).

Neste trabalho, utilizou-se o modelo proposto por Grandó (2011), que propôs o uso de chuveiramento controlado, garantindo melhor uniformidade do impacto. As amostras, foram posicionadas sobre a rampa e submetidas às condições “natural” e “seca ao ar (72 h)”, com coleta do material erodido ao longo do tempo em bandejas dispostas ao final da rampa. O percentual de solo erodido e a massa específica dos sedimentos foram quantificados após secagem em estufa, permitindo uma avaliação comparativa da suscetibilidade à erosão superficial entre as diferentes amostras. A Figura 4.19 apresenta os equipamentos utilizados no ensaio de Inderbitzen Modificado, conforme descritos por Freire (2001) e Grandó (2011).

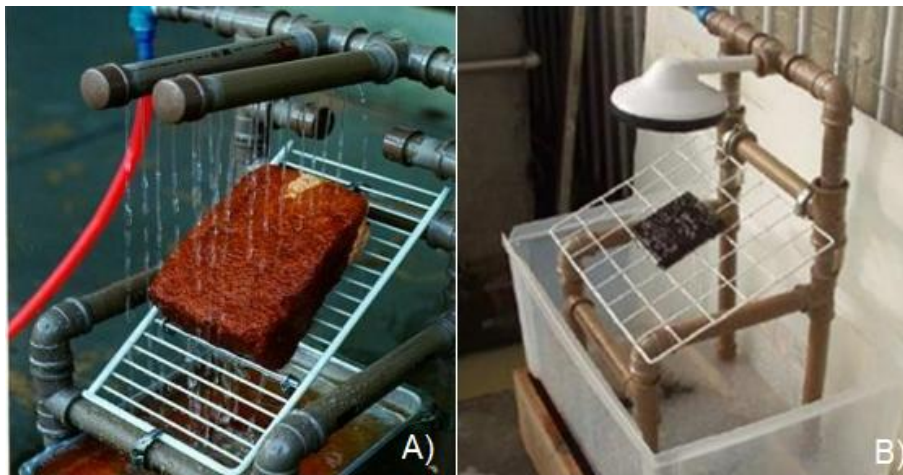


Figura 4.19 - Inderbitzen Modificado: A) Gotejamento (Freire, 2001); B) Chuveiramento, (Grandó,2011).

4.2.11 - ESPECTOMETRIA DE FLUORECÊNCIA DE RAIOS-X

A espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) é um método analítico rápido, preciso e não destrutivo, que normalmente requer preparação mínima da amostra. Essa característica favorece sua aplicação em diversos setores, mesmo quando o material analisado

exige pouco ou nenhum pré-tratamento. A técnica é amplamente empregada em áreas como controle de qualidade de cimentos, vidros e cerâmicas, análise de combustíveis fósseis e resíduos industriais, além de aplicações ambientais, alimentícias, farmacêuticas, na mineração e na geologia (Rammlmair *et al.*, 2005). No campo da geotecnia, destaca-se sua utilidade na caracterização química de solos, por meio da identificação dos óxidos majoritários presentes, os quais contribuem para a avaliação de processos de intemperismo, erodibilidade e comportamento mecânico.

Diante dessa versatilidade, optou-se por utilizar a técnica de FRX nesta pesquisa, com o objetivo de identificar os principais constituintes químicos das amostras AM03, AM04, AM06, AM07, AM08 e AM14. A técnica baseia-se na emissão de radiação secundária característica pelos átomos da amostra após excitação por radiação incidente. Quando os raios X atingem os átomos do material, elétrons das camadas mais internas são ejetados. Para restabelecer o equilíbrio, elétrons de camadas mais externas ocupam essas posições, emitindo radiação fluorescente de raios X com comprimentos de onda específicos. Como cada elemento químico apresenta emissões próprias, é possível identificá-los e quantificá-los com base nessas assinaturas espectrais (ARAI, 2005).

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES - DADOS DE ENSAIOS

Apresenta-se, neste item, o conjunto de resultados obtidos nas campanhas de investigação de laboratório e campo e sua discussão.

5.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os resultados da caracterização física das amostras coletadas são apresentados nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2. As curvas granulométricas correspondentes estão reunidas na Figura 5.1 - Curvas de distribuição granulométrica das amostras AM01 a AM14 com uso de defloculante (CD). Figura 5.1 e Figura 5.2. A classificação dos solos, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), é mostrada na Figura 5.3.

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de granulometria das amostras (CD: com defloculante; SD: sem defloculante).

Locais de Estudo	Amostras	Granulometria CD (%)				Granulometria SD (%)			
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho	Argila	Silte	Areia	Pedregulho
MA01	AM01	17,29	42,74	39,83	0,14	0,00	50,11	49,75	0,14
MA01	AM02	16,21	42,11	41,62	0,05	0,00	58,71	41,24	0,05
MA02	AM03	8,54	74,69	14,91	1,85	0,00	79,31	18,84	1,85
MA03	AM04	16,43	62,21	17,75	3,62	0,00	69,11	27,27	3,62
MA03	AM05	12,24	74,10	13,42	0,24	0,00	65,89	33,87	0,24
MA03	AM06	9,48	78,71	11,72	0,09	0,00	72,45	27,46	0,09
MA03	AM07	16,30	57,92	20,92	4,87	0,00	62,37	32,76	4,87
MA03	AM08	7,41	55,88	36,15	0,55	0,00	55,47	43,98	0,55
MA04	AM09	12,78	80,74	6,46	0,01	0,00	81,34	18,65	0,01
MA04	AM10	10,18	80,01	9,19	0,62	0,43	86,03	12,92	0,62
MA04	AM13	15,35	64,12	13,72	6,81	0,00	63,24	29,94	6,81
MA04	AM14	12,41	78,53	8,74	0,31	0,00	83,05	16,64	0,31
MA05	AM11	30,03	48,56	16,89	4,53	0,00	77,71	17,76	4,53
MA05	AM12	11,68	80,97	5,11	2,24	0,00	89,22	8,55	2,24

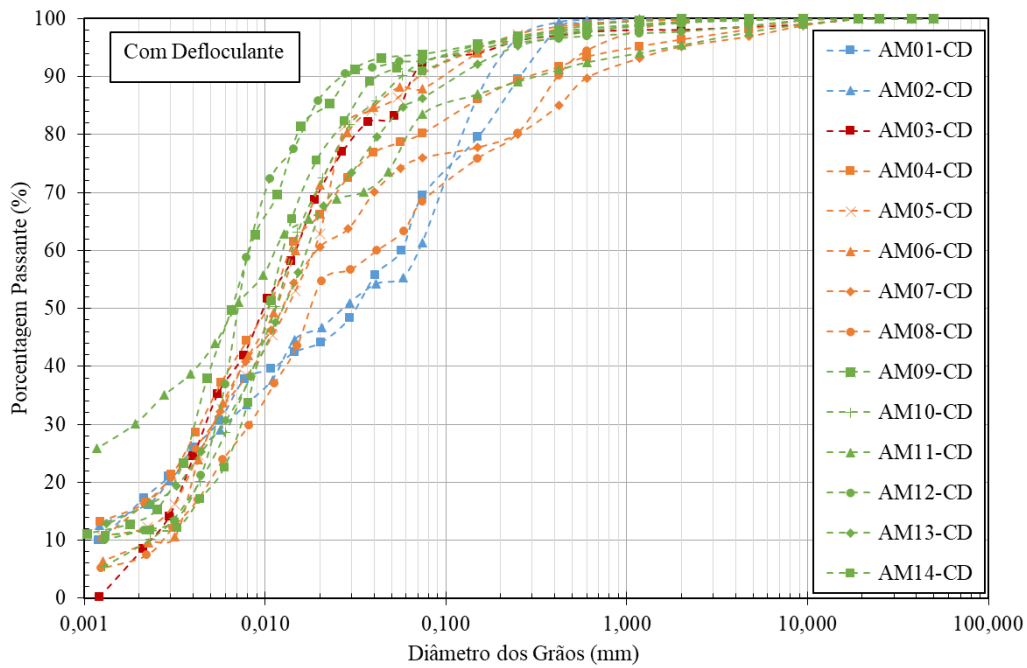


Figura 5.1 - Curvas de distribuição granulométrica das amostras AM01 a AM14 com uso de defloculante (CD).

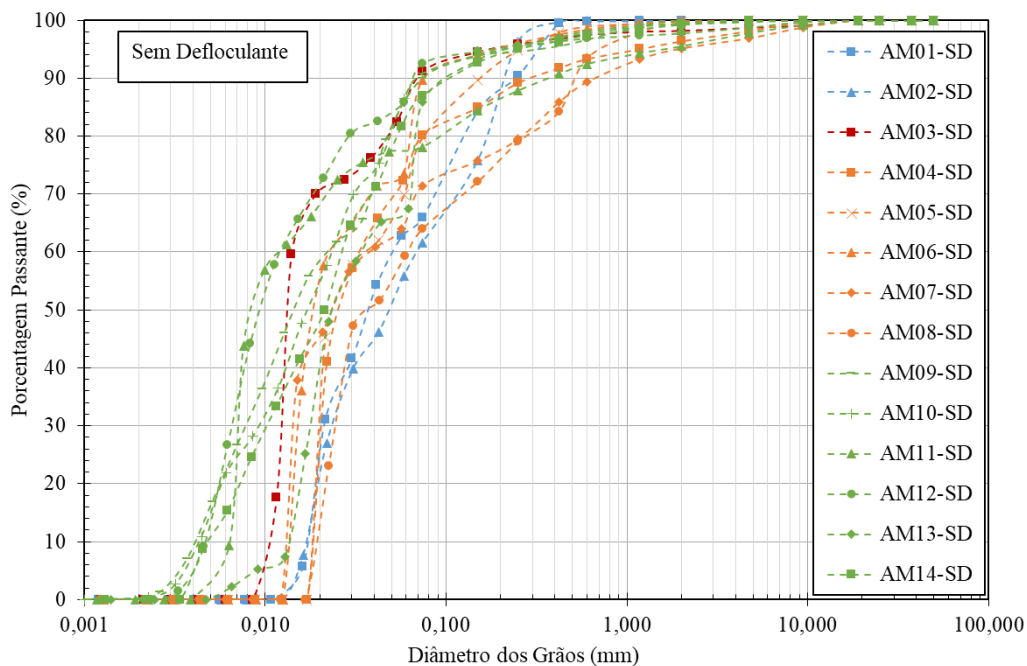


Figura 5.2 - Curvas de distribuição granulométrica das amostras AM01 a AM14 sem uso de defloculante (CD).

As análises granulométricas indicaram que os solos residuais de filito da região apresentam predominância de partículas finas, com teores de silte variando entre 40% e 80%, resultado que está de acordo com os trabalhos de Rodrigues *et al.* (2023) e Soares (2008), os quais também identificaram altos teores de silte em solos alterados de filito. Observou-se ainda

que todas as amostras apresentaram grau de floculação próximo de 100%, o que pode conferir à fração mais fina um comportamento similar ao de partículas de maior granulometria.

A comparação entre os resultados com defloculante (CD) e sem defloculante (SD) evidencia diferenças marcantes, sobretudo nas frações finas. Nos ensaios SD, a fração argila praticamente não é detectada, registrando valores iguais a zero em quase todas as amostras, exceto uma, que atingiu apenas 0,43%. Essa ausência de argila no SD decorre da forte floculação natural do solo, na qual partículas argilosas permanecem agregadas e sedimentam como silte ou até areia fina. Assim, o ensaio SD superestima as frações silte e areia, enquanto o resultado CD, ao promover a completa dispersão química, permite individualizar as partículas finas e revelar a real proporção de argila, que é significativamente maior.

Apesar disso, é importante reconhecer que o comportamento geotécnico *in situ* depende diretamente da estrutura natural do solo, incluindo os efeitos de floculação, agregação e cimentação fraca entre partículas. Nessa perspectiva, a condição SD aproxima-se melhor do estado em que o solo se encontra no campo, uma vez que as partículas não estão dispersas quimicamente no maciço natural. Portanto, embora o ensaio CD seja essencial para identificar a fração real de argila e compreender a natureza mineralógica do material, o ensaio SD fornece indicação mais representativa da organização estrutural que controla o comportamento hidromecânico do solo em sua condição natural. A interpretação conjunta de ambos os resultados, portanto, amplia a compreensão das características dos solos residuais analisados.

Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de limites de consistência e do peso específico dos sólidos (Gs).

Locais de Estudo	Amostras	Índices de consistência				G _s (g/cm ³)
		LL (%)	LP (%)	IP (%)	IA	
MA01	AM01	41	37	5	0,27	3,083
MA01	AM02	38	34	4	0,26	3,004
MA02	AM03	43	NP	NP		3,075
MA03	AM04	45	37	9	0,53	2,751
MA03	AM05	47	41	6	0,48	2,748
MA03	AM06	51	NP	NP		2,730
MA03	AM07	46	42	4	0,24	2,847
MA03	AM08	43	NP	NP		2,826
MA04	AM09	43	NP	NP		3,640
MA04	AM10	45	NP	NP		2,779
MA04	AM13	25	24	1	0,05	2,635
MA04	AM14	43	35	9	0,72	2,847
MA05	AM11	52	34	18	0,62	2,784
MA05	AM12	45	NP	NP		2,741

LL: Limite de liquidez; PL: Limite de Plasticidade; PI: Índice de Plasticidade; IA: Índice de Atividade

Os Índices de Atividade, calculados a partir dos limites de consistência, apresentaram valores inferiores a 0,75, classificando os solos como argilas inativas segundo Skempton (1953). Esse comportamento costuma indicar a predominância de minerais 1:1, como a caulinita. Ensaio de difração de raios X realizados por Soares (2008) em solos residuais de filito identificaram caulinita, mica e quartzo com percentuais variáveis; nas amostras CMT 2C e CMT 2D verificou-se predominância de caulinita.

A densidade real dos grãos (Gs) variou de 2,635 g/cm³ a 3,640 g/cm³, o que sugere a presença de minerais pesados, como hematita, característica comum aos materiais da região do Quadrilátero Ferrífero.

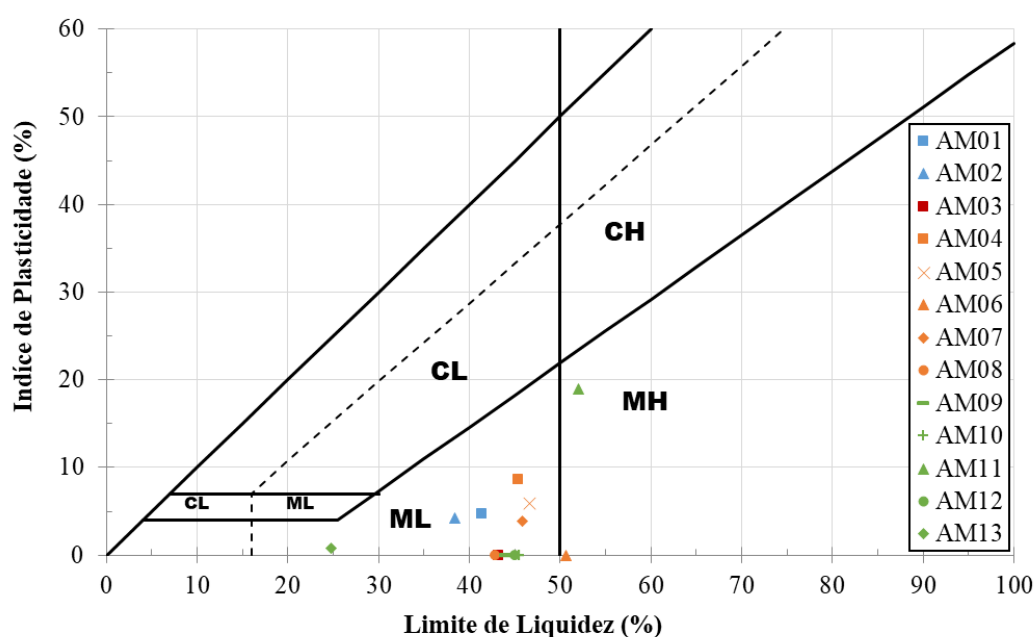


Figura 5.3 - Carta de Plasticidade - SUCS.

A Carta de Plasticidade, Figura 5.3, classificou as amostras AM06 e AM11 como do tipo MH, enquanto as demais foram enquadradas como ML. Segundo Gray e Leiser (1982), solos classificados como ML apresentam maior suscetibilidade à erodibilidade do que os do tipo MH, embora ambos apresentem elevado potencial erosivo.

5.2 - PERMEABILIDADE

Os resultados dos ensaios de permeabilidade por carga variável estão apresentados na Tabela 5.3. Nas amostras em que os planos de foliação eram marcantes (AM02, AM03 e AM08), os ensaios foram conduzidos nas direções paralela e perpendicular ao fluxo de água, a fim de avaliar a anisotropia hidráulica.

Tabela 5.3 - Coeficientes de permeabilidade AM01 a AM14.

Locais de Estudo	Amostras	Permeabilidade		
		k_1 (cm/s)	k_2 (cm/s)	$k_{\text{médio}}$ (cm/s)
MA01	AM01	3,30E-05	6,00E-05	4,65E-05
MA01	*AM02	4,00E-05	1,20E-04	8,00E-05
MA02	*AM03	1,91E-05	2,02E-05	1,97E-05
MA03	AM04	6,00E-05	2,00E-05	4,00E-05
MA03	AM05	4,17E-05	4,54E-05	4,36E-05
MA03	AM06	1,30E-05	3,03E-05	2,17E-05
MA03	AM07	1,30E-05	3,03E-05	2,17E-05
MA03	*AM08	6,94E-05	1,86E-04	1,28E-04
MA04	AM09	3,93E-06	-	3,93E-06
MA04	AM10	2,28E-04	-	2,28E-04
MA04	AM13	-	-	-
MA04	AM14	-	-	-
MA05	AM11	-	-	-
MA05	AM12	4,09E-06	-	4,09E-06

Observa-se que, nas amostras AM02 e AM08, o coeficiente de permeabilidade foi uma ordem de grandeza maior quando a foliação se apresentava paralela à direção do fluxo, chegando a ser até uma ordem de grandeza superior, evidenciando o comportamento anisotrópico desses materiais. Já na amostra AM03, a orientação dos planos de foliação não influenciou de forma significativa os valores obtidos.

De modo geral, todos os maciços apresentaram baixa permeabilidade, conforme a classificação proposta por Terzaghi e Peck (1967). A AM10, classificada como solo coluvionar, apresentou coeficiente de permeabilidade de $2,3 \times 10^{-4}$ cm/s. Esse valor é da mesma ordem de grandeza reportado por Ehrlich *et al.* (2017), que identificaram $k = 5,3 \times 10^{-4}$ cm/s para um solo coluvionar com grau de saturação de 85,4% e índice de vazios de 0,8.

Os ensaios de permeabilidade de carga variável mostraram que as condutividades hidráulicas das amostras se mantêm na faixa típica de solos siltsos, concentrando-se na ordem de 10^{-5} cm/s. A anisotropia ocorreu apenas nas amostras com foliação preservada, que apresentaram valores superiores quando o fluxo se alinhou aos planos estruturais, enquanto amostras com foliação mais madura não exibiram variações significativas.

Em escala de campo, a geologia estrutural exerce influência ainda mais pronunciada sobre o regime de fluxo. As cavidades identificadas no MA01 por métodos geofísicos, assim como lentes de cascalho observadas no MA05, constituem trajetórias preferenciais de percolação que não são representadas nos corpos de prova de laboratório. No MA04, trincas sucessivas associadas ao processo de rastejo, descritas por Silva *et al.* (2020b), passaram a atuar

como condutores hidráulicos e a modificar a resposta hidromecânica ao longo da superfície de cisalhamento, favorecendo a reativação de movimentações.

O conjunto das evidências demonstra que o comportamento hidráulico dos maciços é controlado predominantemente pela estrutura do solo, representada pela foliação preservada, pelas trincas, pelas cavidades e por outras descontinuidades, enquanto a permeabilidade da matriz apresenta valores semelhantes entre si. Esses elementos estruturais definem os caminhos preferenciais de fluxo, modificam a forma como a água circula no interior do maciço e influenciam sua resposta hidromecânica, aspectos que não são plenamente captados pelos ensaios de laboratório, que tendem a refletir apenas a permeabilidade da matriz.

5.3 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Nesta seção, apresentam-se os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados em solos residuais de filito, coletados nos maciços ao longo da rodovia BR-040/MG, no Quadrilátero Ferrífero. Os ensaios foram conduzidos conforme a norma ASTM D3080-11, com o objetivo de analisar o comportamento mecânico desses materiais sob diferentes condições de tensão normal, saturação e velocidade de cisalhamento.

Os corpos de prova (CP) foram ensaiados nas condições natural e embebida, visando representar desde a condição de umidade natural típica de períodos secos até cenários de saturação associados à infiltração intensa de água, comuns em épocas chuvosas. Os parâmetros de resistência obtidos estão reunidos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de Cisalhamento Direto.

Locais de Estudo	Amostras	Parâmetros de Resistência							
		Natural				Embebido			
		Pico		Pós-Pico		Pico		Pós-Pico	
c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)		
MA01	AM01	54	26			26	23		
MA01	AM02	58	27	39	26	25	26	15	26
MA02	AM03	22	20	8	21	16	21		
MA03	AM04	59	33	24	30	17	27		
MA03	AM05					36	32	23	23
MA03	AM06	18	32						
MA03	AM07	49	28			27	28		
MA03	AM08	25	21			21	18		
MA04	AM09					49	20	12	19
MA04	AM10	8	28			2	16		
MA04		Velocidade de cisalhamento: 0,2 mm/min				30	27		
MA04		Velocidade de cisalhamento: 0,055 mm/min				23	25		
MA04	AM14	Velocidade de cisalhamento: 0,0055mm/min				20	25		
MA04		Resistência Residual				20	25		
MA05	AM11					10	30	10	23
	AM12								

As curvas de tensão cisalhante versus deslocamento e as envoltórias de resistência estão apresentadas na Figura 5.6 a Figura 5.50, e serão discutidas individualmente para cada amostra, com destaque para os efeitos da saturação e da orientação dos planos de foliação.

MA01

A amostra AM01, caracterizada por um solo residual maduro de filito (SRMF), apresentou comportamento predominantemente compressível sob as tensões normais avaliadas, tanto em condição natural quanto embebida. Os corpos de prova (CP) são apresentados na Figura 5.4 e Figura 5.5, com os respectivos valores das tensões normais que foram ensaiados. Nos ensaios realizados em condição embebida, Figura 5.6, as tensões de 100 kPa e 200 kPa não apresentaram pico de tensões. Já os ensaios conduzidos sob tensões de 50, 80 e 140 kPa indicaram a presença de picos sutis, sem evidências de dilatância pós-pico, sugerindo que tais valores máximos podem estar associados a estruturas localizadas de maior resistência.

Na condição embebida, os parâmetros de resistência de pico obtidos foram $\phi' = 23^\circ$ e $c' = 26$ kPa. Já na condição natural, os valores encontrados foram $\phi' = 26^\circ$ e $c' = 54$ kPa. Observa-se uma redução expressiva da coesão aparente com o aumento do grau de saturação, associada à perda de sucção matricial, que exerce influência na resistência adicional observada em solos parcialmente saturados (Fredlund; Rahardjo, 1993).



Figura 5.4 - MA01, AM01, CP de solo residual maduro de filito (SRMF), condição natural.

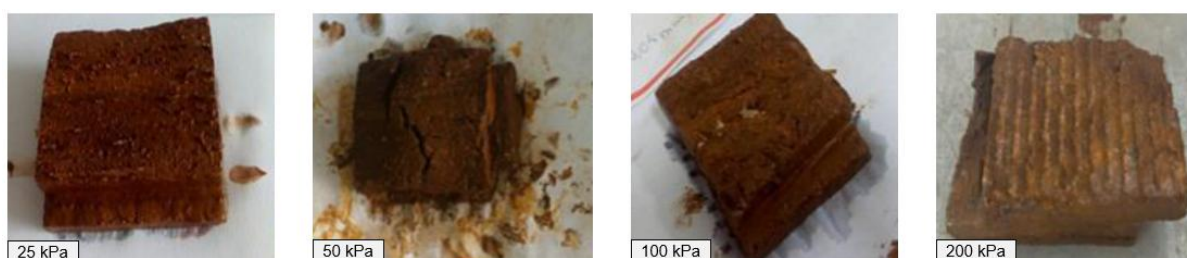


Figura 5.5 - MA01, AM01, CP de solo residual maduro de filito (SRMF), condição inundada.

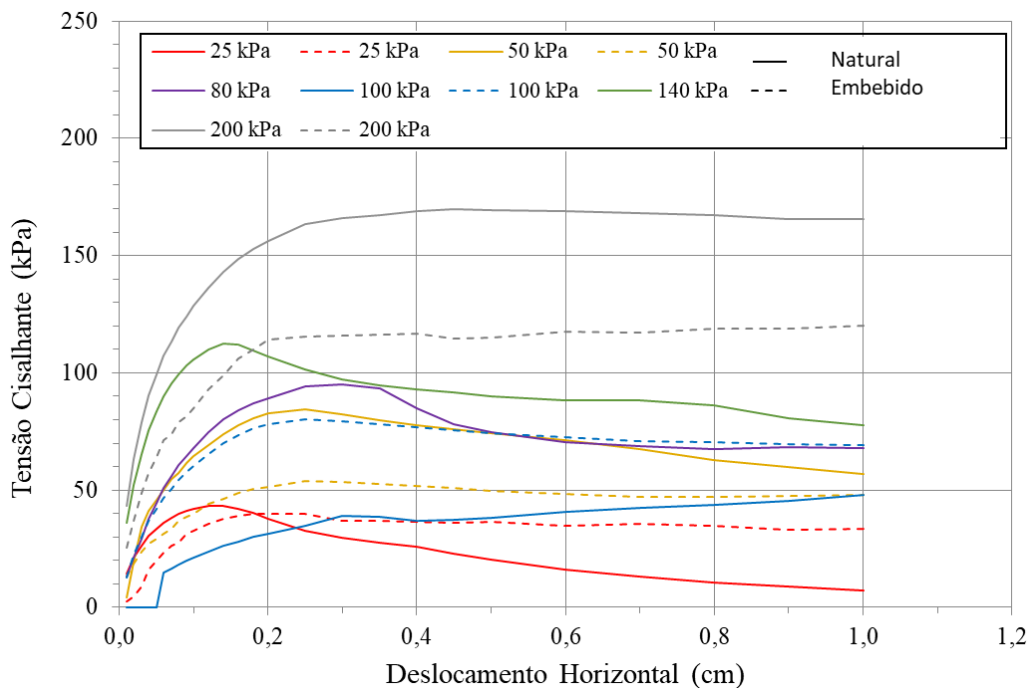


Figura 5.6 - Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM01 (SRMF).

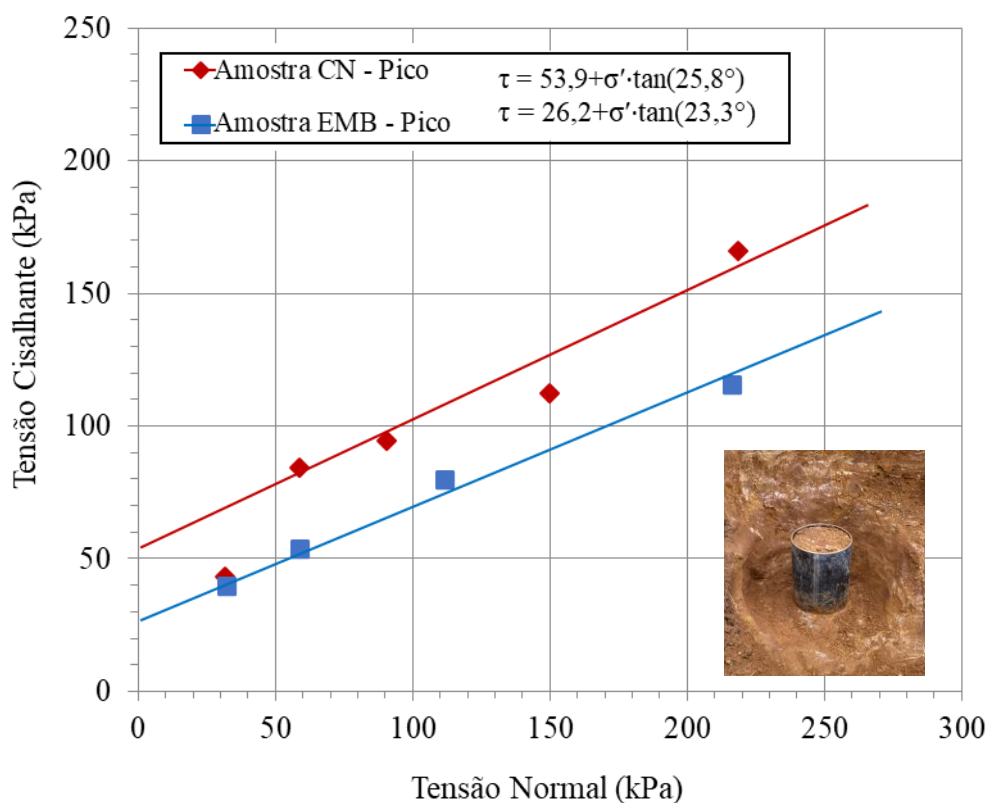


Figura 5.7 - MA01: Envoltórias de resistência, AM01 (SRMF).

A amostra AM02, caracterizada por um solo residual jovem de filito (SRJF), cujos registros fotográficos dos CP, com as respectivas tensões normais são apresentados na Figura

5.8 e Figura 5.9, apresentou pico de resistência ao cisalhamento em praticamente todas as tensões normais avaliadas, Figura 5.10, tanto em condição natural quanto embebida. Em condição embebida, os ensaios com 50, 80, 100 e 140 kPa mostraram picos bem definidos. Já o ensaio com 200 kPa apresentou valor de pico inferior ao esperado, possivelmente em função da heterogeneidade do solo ou da orientação desfavorável dos planos de foliação.

Os parâmetros de resistência obtidos para a amostra AM02, Figura 5.11, indicam que o ϕ' manteve-se praticamente constante entre as condições testadas, enquanto c' apresentou redução significativa com o aumento do grau de saturação. Esse comportamento está associado à perda de sucção matricial característica de solos parcialmente saturados. Na condição natural, os parâmetros de resistência de pico foram $\phi' = 27^\circ$ e $c' = 58$ kPa e $\phi' = 26^\circ$ e $c' = 39$ kPa. Já na condição embebida, foram obtidos $\phi' = 26^\circ$ e $c = 25$ kPa na resistência de pico, e $\phi' = 26^\circ$ e $c = 15$ kPa na resistência pós-pico.

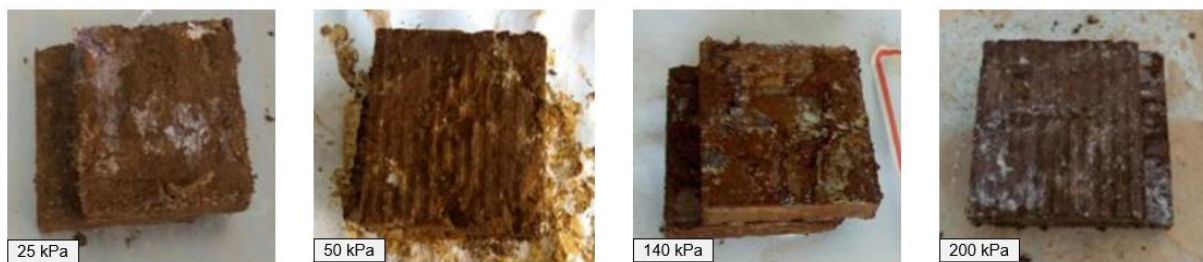


Figura 5.8 - MA01, AM02, CP de solo residual jovem de filito (SRJF), condição natural.

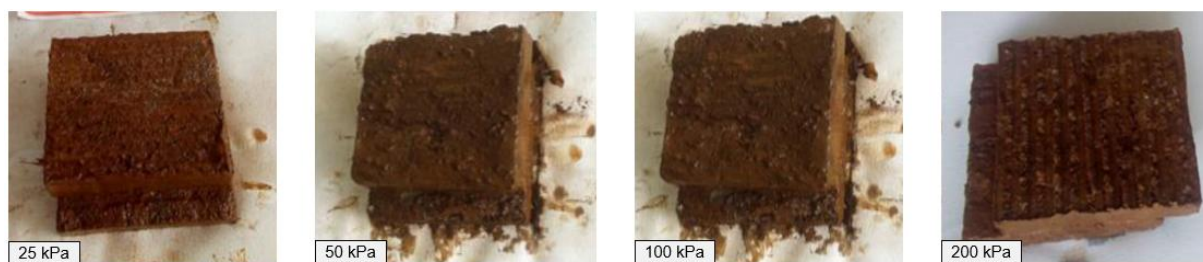


Figura 5.9 - MA01, AM02, CP de solo residual jovem de filito (SRJF), condição inundada.

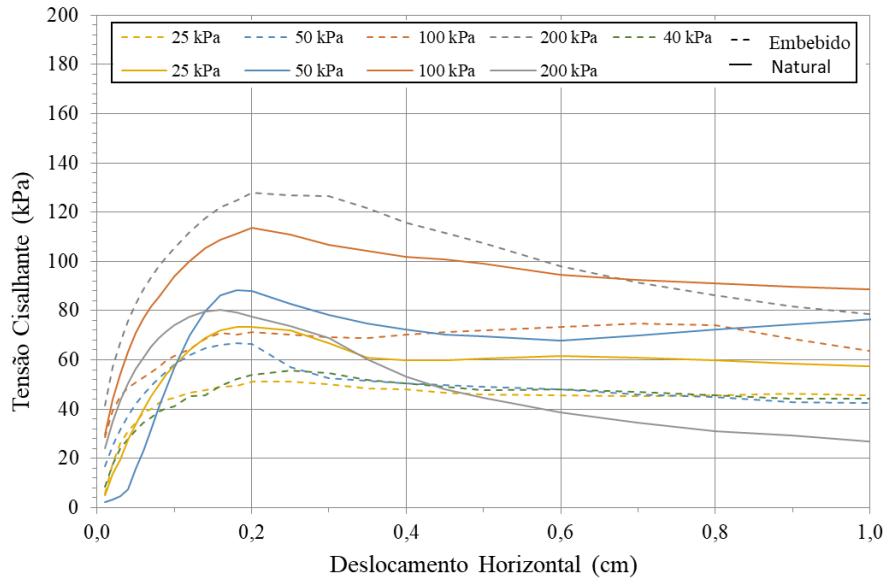


Figura 5.10 - MA01: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM02 (SRJF).

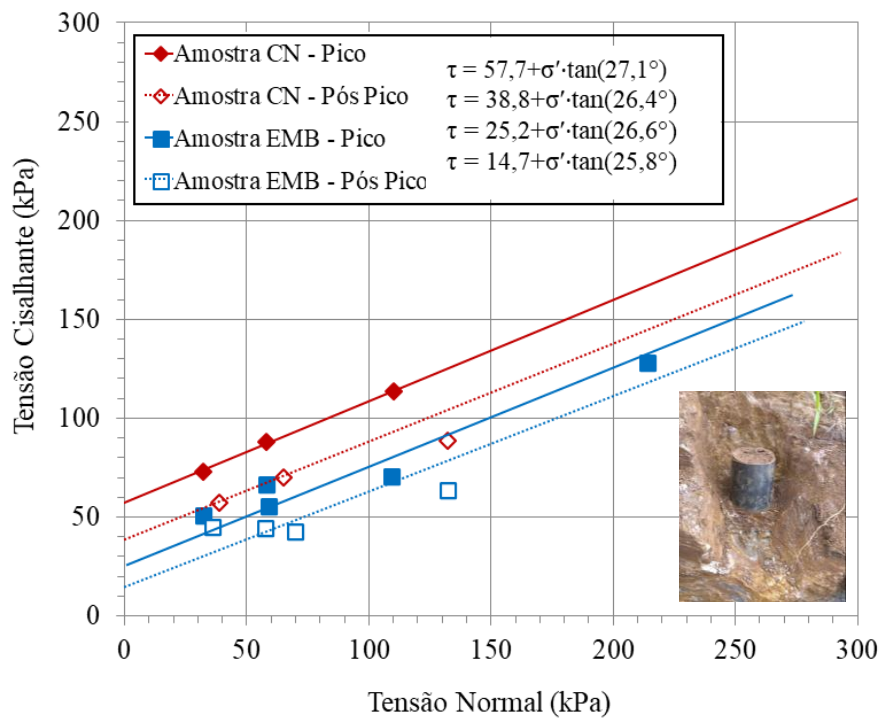


Figura 5.11 - MA01: Envoltórias de resistência, AM02 (SRJF).

O comportamento obtido para o MA01 apresentou parâmetros compatíveis com os valores reportados na literatura para solos residuais de filito. Os ângulos de atrito efetivo em condição natural de pico variaram entre 26° e 27°, intervalo semelhante ao encontrado por Silva (2006), Silva *et al.* (2020a) e Gomes (2021). O intercepto coesivo em condição natural de pico

situou-se entre 53 kPa e 58 kPa, valores coerentes com os obtidos por diversos autores (Silva, 2006; Soares, 2008; Gomes, 2021; Silva *et al.*, 2020a).

As amostras ensaiadas em condição embebida apresentaram redução expressiva do intercepto coesivo, da ordem de 56,3%, enquanto o ângulo de atrito não sofreu variações tão pronunciadas. Considerando a condição pós-pico para ambas as situações (natural e embebida), verificou-se redução média de aproximadamente 50% do intercepto coesivo.

Esse comportamento é coerente com a diminuição da coesão aparente decorrente da saturação, bem como com a mobilização dos planos reliquias na fase pós-pico. Nessas condições, a ruptura tende a ocorrer ao longo de superfícies espelhadas formadas por minerais lamelares alinhados (*slickenside*), nas quais a coesão inicial está associada à cimentação do material de preenchimento. Assim, pequenos deslocamentos são suficientes para provocar perda significativa do intercepto coesivo.

Do ponto de vista do comportamento tensão–deformação em cisalhamento direto, o solo residual maduro de filito (SRMF) apresentou curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal sem mobilização de pico bem definido, tanto na condição natural (não saturada) quanto na condição embebida (próxima à saturação). Esse padrão é compatível com um comportamento mais dúctil, com endurecimento por deformação, no qual a resistência vai sendo mobilizada progressivamente sem um ponto de colapso abrupto. A interpretação desse resultado é coerente com o maior grau de intemperismo do SRMF, no qual a estrutura herdada da rocha matriz se encontra mais degradada e a matriz fina (argilosa–silto–arenosa) tende a apresentar arranjo mais disperso. Nessa condição, a ruptura tende a ser mais difusa, com menor tendência à formação de uma superfície de cisalhamento bem definida, o que favorece a resposta sem pico nítido nas curvas.

Em termos de parâmetros de resistência, o SRMF apresentou, na condição natural, coesão de 54 kPa e ângulo de atrito de 26°, enquanto na condição embebida esses valores foram reduzidos para 26 kPa e 23°, respectivamente. A redução significativa da coesão e a diminuição moderada do ângulo de atrito podem ser interpretadas à luz da mecânica dos solos não saturados. Na condição natural, parte da “coesão” medida corresponde à coesão aparente associada à sucção matricial e a ligações físico–químicas ainda presentes entre partículas finas. Quando o material é embebido, a sucção é substancialmente reduzida e há enfraquecimento dessas ligações, o que se traduz em queda de coesão e leve redução no ângulo de atrito efetivo mobilizado. Sob o ponto de vista do modelo clássico de resistência de solos não saturados, a parcela da resistência associada à sucção é capturada principalmente no termo de coesão aparente, enquanto o ângulo de atrito tende a refletir mais diretamente as características de

mineralogia, rugosidade e intertravamento das partículas; isso explica a variação mais pronunciada da coesão frente à saturação, comparativamente ao ângulo de atrito.

O solo residual jovem de filito (SRJF), por sua vez, apresentou comportamento distinto e mais complexo. As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal exibiram pico de resistência bem definido, seguido de queda de tensão, evidenciando comportamento de amolecimento pós-pico. Tal resposta indica maior grau de estruturação e anisotropia herdada da rocha matriz, com presença de arranjos preferenciais de partículas e planos de fraqueza que, ao serem mobilizados, conduzem à formação de uma superfície de ruptura relativamente marcada. Após a ruptura, a degradação da estrutura e o rearranjo das partículas resultam em resistência residual inferior, condizente com o ramo pós-pico observado.

Os parâmetros de resistência obtidos para o SRJF reforçam essa interpretação. Na condição natural, a envoltória de pico apresentou coesão de 58 kPa e ângulo de atrito de 27°, enquanto a envoltória pós-pico resultou em coesão de 39 kPa e ângulo de atrito de 26°. Na condição embebida, os valores de pico e pós-pico foram, respectivamente, 25 kPa e 15 kPa para a coesão, com ângulos de atrito praticamente inalterados (27° no pico e 26° no pós-pico). Observa-se, portanto, que a variação mais expressiva ocorre na coesão (de pico para pós-pico e de natural para embebida), ao passo que o ângulo de atrito se mantém praticamente constante em todas as situações. Esse comportamento é bastante característico: a resistência friccional, associada ao atrito entre grãos e ao intertravamento geométrico, tende a ser menos sensível à saturação, enquanto a coesão aparente, que incorpora tanto a contribuição da sucção quanto a de ligações estruturais, se reduz de forma significativa com a saturação e com a degradação estrutural pós-pico.

À luz da mecânica dos solos não saturados, o comportamento do SRJF indica que, na condição natural, a sucção matricial contribui de forma relevante para a coesão aparente, elevando o nível de resistência de pico. À medida que o deslocamento horizontal aumenta e a estrutura começa a se degradar, parte dessas ligações é rompida, reduzindo a coesão na envoltória pós-pico, mesmo que o ângulo de atrito se mantenha praticamente inalterado. Quando o solo é embebido, a sucção é substancialmente anulada, o que se traduz em queda acentuada da coesão (de 58 para 25 kPa no pico e de 39 para 15 kPa no pós-pico), mas o ângulo de atrito permanece praticamente o mesmo, evidenciando que a componente friccional é dominada pelas características granulométricas e mineralógicas do material, pouco afetadas pela variação do grau de saturação. Em outras palavras, a resistência do SRJF é controlada por uma combinação de atrito e coesão aparente, sendo esta última fortemente dependente tanto da

sucção quanto da integridade da estrutura; por isso, a coesão é o parâmetro que mais sofre com a saturação e com o deslocamento pós-pico.

Comparando-se os dois materiais, verifica-se que SRMF e SRJF apresentam ângulos de atrito próximos (da ordem de 26° – 27°), tanto em condição natural quanto embebida, sugerindo que a fração friccional da resistência é relativamente semelhante, o que é coerente com a origem comum em filito e com a possível presença de frações arenosas e micáceas similares. A principal diferença reside no grau de estrutura e de intemperismo: o SRMF, mais maduro, se apresenta com estrutura mais degradada e comportamento mais dúctil, sem pico marcante, enquanto o SRJF, mais jovem, conserva uma estrutura mais definida, o que favorece a mobilização de resistência de pico seguida de amolecimento pós-pico. Em termos de mecânica dos solos não saturados, ambos sofrem influência da sucção, refletida principalmente nos valores de coesão; contudo, o SRJF mostra maior sensibilidade à saturação, com variações mais pronunciadas na coesão entre as condições natural e embebida, evidenciando maior dependência da coesão aparente associada à sucção e às ligações estruturais herdadas.

Do ponto de vista de projeto geotécnico, esses resultados indicam que, para o SRMF, a resistência mobilizada tende a ser mais estável com a deformação, mas ainda assim é sensível à perda de sucção, o que justifica a adoção de parâmetros mais próximos da condição embebida quando se consideram cenários críticos de saturação. Já para o SRJF, torna-se fundamental distinguir entre resistência de pico e pós-pico, bem como entre estados não saturados e saturados, uma vez que a redução de coesão com a saturação e com a degradação estrutural pós-pico pode ser significativa. Em encostas naturais e taludes em filito, como a encosta estudada, essa diferença entre o comportamento do solo residual maduro e do jovem tem implicações diretas na avaliação de estabilidade sob eventos de chuva prolongados, reforçando a importância de considerar o efeito da sucção e a perda de coesão aparente na definição dos estados de carregamento mais desfavoráveis.

MA02

Primeiramente a amostra AM03 foi ensaiada em condição de umidade natural (Figura 5.13) e em condição embebida (Figura 5.20), considerando apenas um CP por tensão normal. Os CP cisalhados são apresentados na Figura 5.12. As envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb correspondentes às condições de umidade natural, tanto de pico quanto pós-pico, são apresentadas na Figura 5.14. Para a condição natural, foram obtidos os parâmetros $c' = 22,1$ kPa e $\phi' = 20,5^{\circ}$; enquanto na condição pós-pico, os valores foram $c' = 20,6$ kPa e $\phi' = 20^{\circ}$.

Na condição embebida, os ensaios foram realizados em triplicatas, conforme preconizado pela ABNT NBR 11682:2009. Ou seja, para cada tensão normal foram ensaiados três CP (Figura 5.15 a Figura 5.19). O comportamento das curvas variou entre as repetições, mesmo sob as mesmas condições de contorno, o que evidencia a heterogeneidade do material (Figura 5.20). A envoltória de resistência para condição embebida é apresentada na Figura 5.21. Os parâmetros de resistência obtido pela envoltória de resistência na condição embebida foram 21° e 16 kPa.

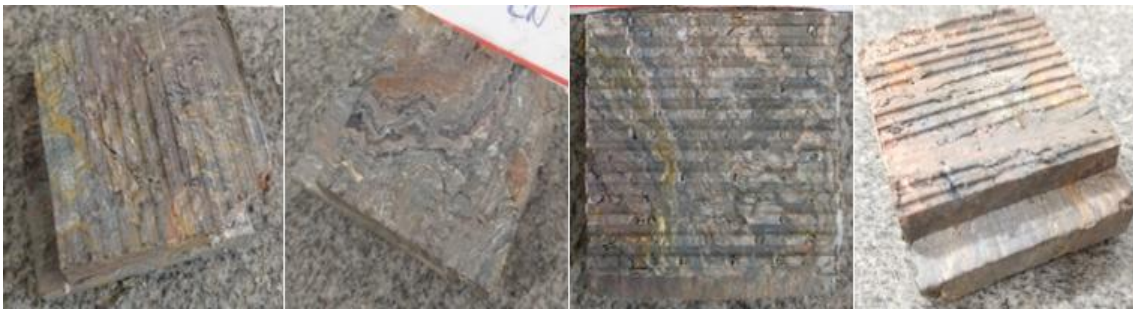


Figura 5.12 - MA02, CP cisalhados do filito cinza na condição natural 25, 50, 200, 300 kPa.

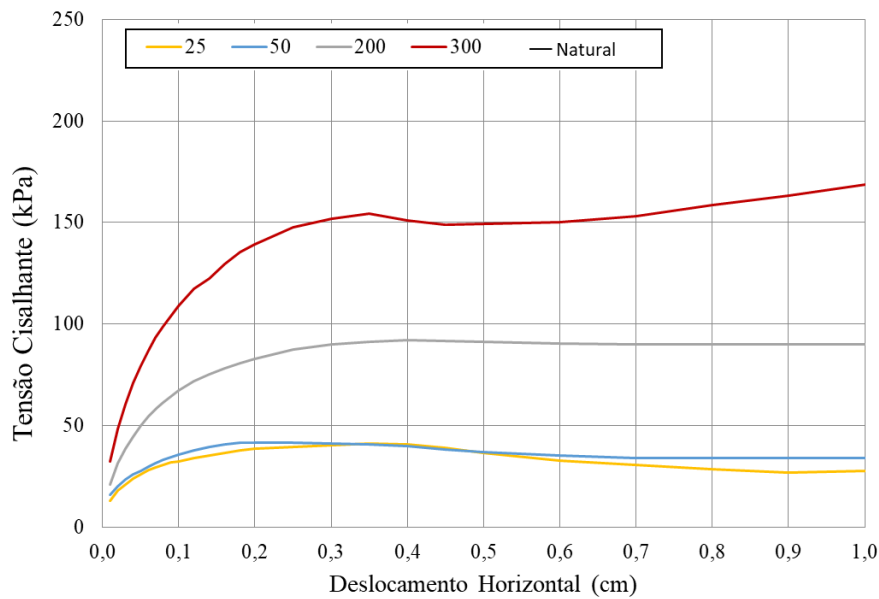


Figura 5.13 - MA02: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM03-Condição Natural.

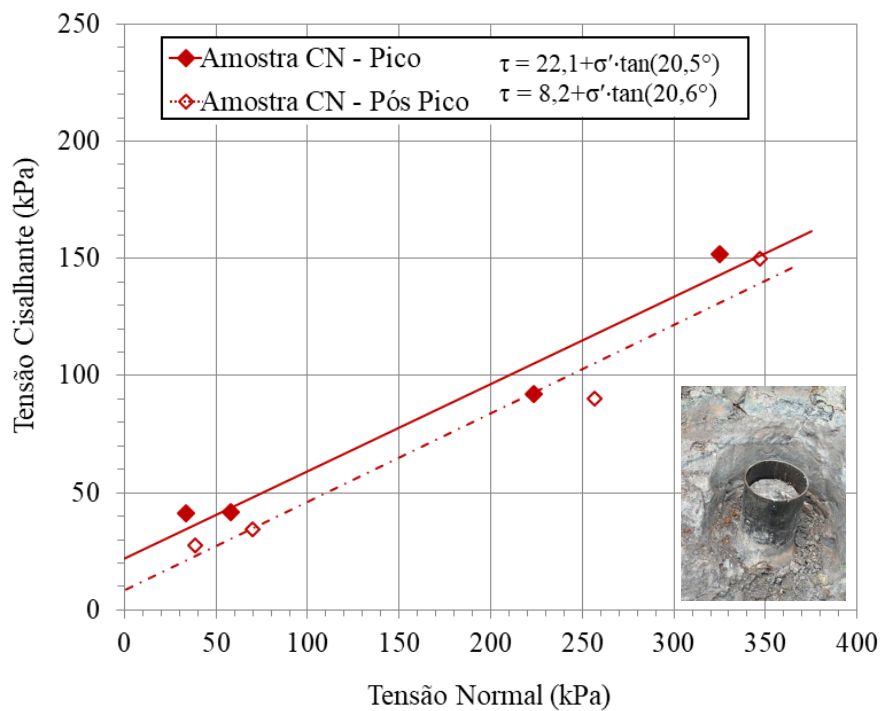


Figura 5.14 - MA02: Envoltórias de resistência, AM03 - Condição Natural.



Figura 5.15 - MA02, 3 CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 25 kPa.



Figura 5.16 - MA02, 3 CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 50 kPa.



Figura 5.17 - MA02, CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 100 kPa.



Figura 5.18 - MA02, CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 200 kPa.



Figura 5.19 - MA02, CP cisalhados na condição embebida, na tensão normal de 300 kPa.

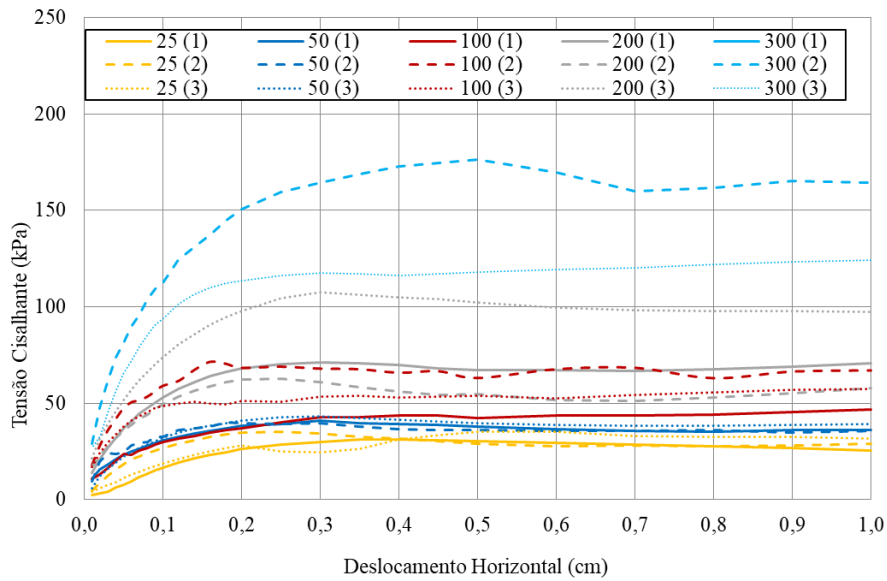


Figura 5.20 - Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM03 -Condição Embebida - Triplicatas.

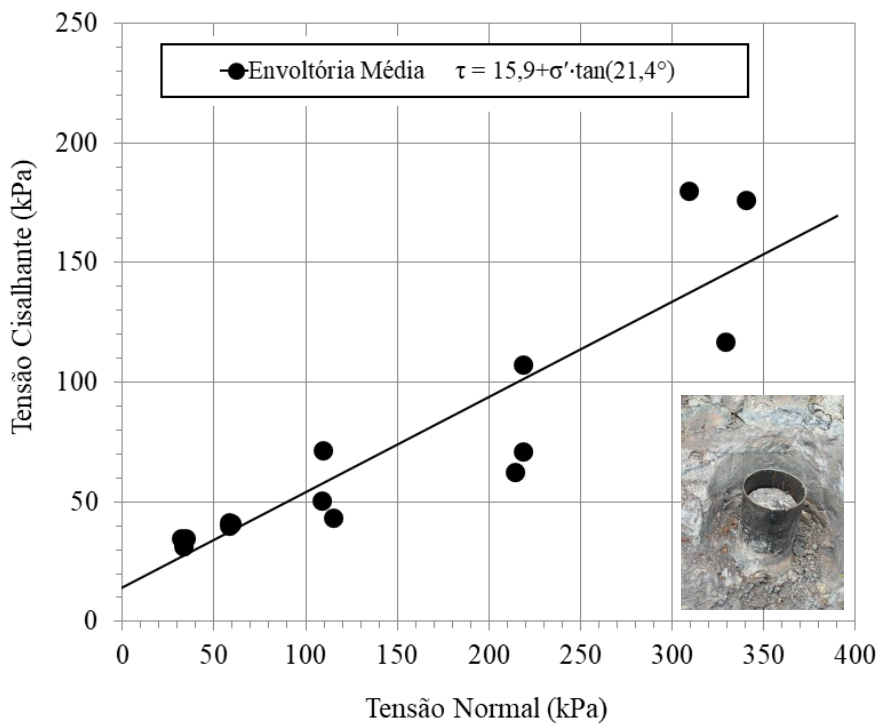


Figura 5.21 - MA02: Envoltórias de resistência, AM03 - Condição Embebida - Triplicatas.

A pequena variação das envoltórias de resistência entre as condições de umidade pode estar associada ao alto grau de saturação *in situ* da amostra, estimado entre 75% e 90%, o que indica que a sucção matricial inicial era relativamente baixa, resultando em diferenças discretas no comportamento mecânico entre as duas condições.

O intercepto coesivo variou de 8 kPa a 22 kPa nas amostras em condição natural, reduzindo-se a valores próximos de zero após a submersão, intervalo compatível com os obtidos

na literatura especializada consolidados na Tabela 2.1. Os ângulos de atrito situam-se entre 20° e 21°, valores inferiores à faixa de 28° a 34° reportada por Silva (2006) e Soares (2008) para a resistência de pico, porém compatíveis com os parâmetros pós-pico descritos por Soares (2008). É importante destacar que esses autores posicionaram os planos de foliação perpendicularmente à superfície de ruptura, procedimento que tende a elevar o valor de ϕ' . Esse aspecto metodológico contribui para explicar a diferença observada entre seus resultados e aqueles obtidos para o MA02.

Observa-se que, para tensões normais mais baixas (25 e 50 kPa), a dispersão entre as triplicatas é relativamente reduzida, enquanto para tensões mais elevadas (200 e 300 kPa) a diferença entre as curvas torna-se mais acentuada. Essa tendência é coerente com o caráter anisotrópico do solo residual de filito: em baixos níveis de tensão, o cisalhamento tende a mobilizar predominantemente a resistência da matriz mais fina, com regime de ruptura mais difuso e menos condicionado por planos estruturais específicos. À medida que a tensão normal aumenta, a ruptura passa a ser controlada de forma mais intensa pela orientação de planos de foliação, descontinuidades e microfissuras herdadas da rocha matriz. Pequenas variações na orientação desses planos em relação ao plano de cisalhamento do equipamento, de um corpo de prova para outro, podem resultar em diferenças relevantes de resistência mobilizada, justificando a maior dispersão observada nas tensões mais altas.

A envoltória de resistência na condição embebida, ajustada a partir dos resultados médios dos ensaios, é apresentada na Figura 5.21. Apesar da variabilidade para um mesmo nível de tensão, foi possível obter um ajuste linear consistente, resultando em coesão de aproximadamente 16 kPa e ângulo de atrito em torno de 21°. Esses parâmetros devem ser interpretados como representativos de um comportamento “médio” do material saturado, incorporando a heterogeneidade intrínseca observada nas triplicatas. Ao mesmo tempo, a própria dispersão dos resultados reforça a importância de se considerar margens de segurança adequadas em aplicações de projeto, uma vez que corpos de prova alinhados com planos de fraqueza mais desfavoráveis tenderão a mobilizar resistências inferiores à média.

Na condição natural (não saturada), os ensaios foram realizados com apenas um corpo de prova por nível de tensão normal. Essa opção segue a prática mais usual em programas experimentais de cisalhamento direto, mas limita a avaliação direta da variabilidade estatística do material em cada nível de tensão. Ainda assim, a comparação global entre as envoltórias das condições natural e embebida permite inferir tendências importantes: na condição natural, a coesão aparente é maior, enquanto o ângulo de atrito permanece próximo ao obtido na condição saturada. Tal comportamento é compatível com a mecânica dos solos não saturados, na qual a

sucção matricial contribui significativamente para a coesão aparente, ao passo que a componente friccional (associada ao atrito entre partículas e ao intertravamento geométrico) é menos sensível à variação do grau de saturação.

A análise conjunta dos dois conjuntos de ensaios mostra, portanto, que a saturação plena reduz sobretudo a coesão aparente, em virtude da dissipação da sucção e do enfraquecimento das ligações físico-químicas entre as partículas, enquanto o ângulo de atrito se mantém relativamente estável entre as condições natural e embebida. Nesse contexto, o procedimento normativo de triplicatas revela-se especialmente valioso para solos residuais anisotrópicos como o de filito, pois permite quantificar a dispersão associada às variações de estrutura e orientação de planos de fraqueza. Ao mesmo tempo, a comparação com a série não saturada (com apenas um corpo de prova por nível de tensão normal) ilustra uma limitação prática frequente: embora seja possível obter uma envoltória “limpa” e bem definida, parte importante da variabilidade real do maciço não é capturada. Assim, os resultados reforçam a pertinência das recomendações da ABNT NBR 11682:2009 e indicam que, sempre que possível, a realização de triplicatas por nível de tensão normal deve ser priorizada em estudos de solos residuais estruturados e anisotrópicos, sobretudo quando os parâmetros obtidos são destinados a análises de estabilidade em condição de saturação crítica.

MA03

A amostra AM04, caracterizada por um solo de coloração amarela, possui registros fotográficos dos corpos de prova e das respectivas tensões normais apresentados nas Figura 5.22 e Figura 5.23. Essa amostra apresentou picos de resistência ao cisalhamento sob a maior parte das tensões normais aplicadas, tanto na condição natural quanto na condição embebida. Em condição natural, os ensaios mostraram picos bem definidos de resistência, enquanto nos ensaios embebidos não foi possível identificar picos claros, indicando possível ruptura progressiva ou estrutura mais sensível à saturação (Figura 5.24).

Para a condição embebida, os parâmetros de resistência de pico foram $\varphi' = 27^\circ$ e $c = 17$ kPa. Na condição natural, os valores foram $\varphi' = 33^\circ$ e $c = 59$ kPa para a resistência de pico, e $\varphi' = 30^\circ$ e $c = 24$ kPa para a resistência pós-pico (Figura 5.25). Os resultados mostram que a saturação teve impacto direto na redução da resistência ao cisalhamento.



Figura 5.22 - Amostras Cisalhadas Amarelo CN (25, 50, 100 e 200 kPa).



Figura 5.23 - Amostras Cisalhadas Amarelo Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa).

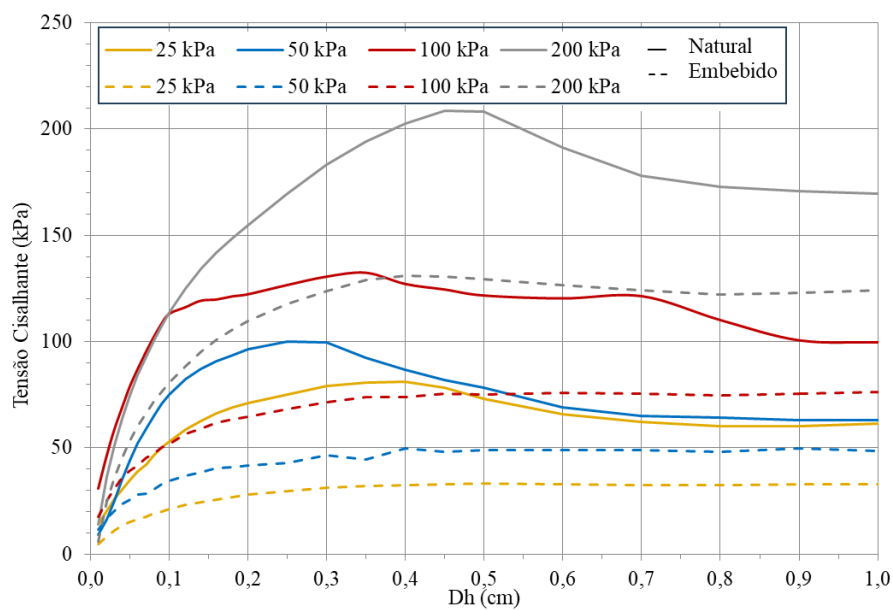


Figura 5.24 - MA03: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM04.

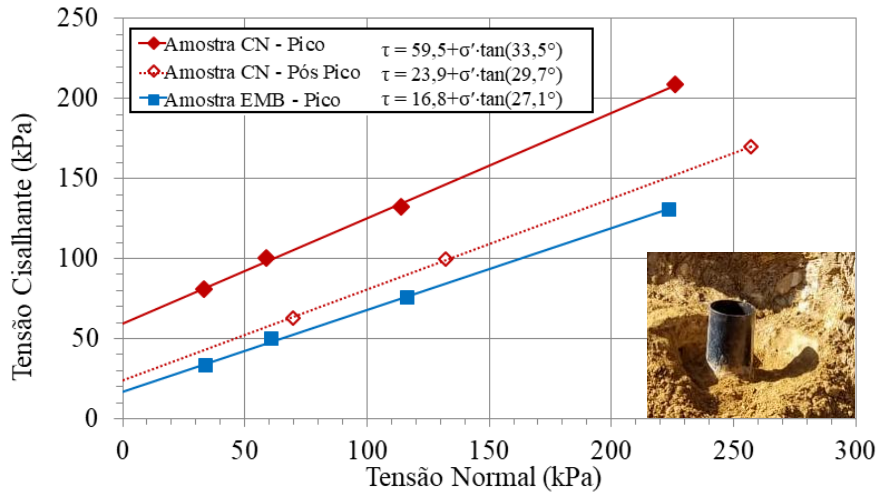


Figura 5.25 - MA03: Envoltórias de resistência, AM04.

A amostra AM05, caracterizada por um solo de coloração bege, possui registros fotográficos dos corpos de prova e das respectivas tensões normais apresentados na Figura 5.26 e Figura 5.27. Essa amostra apresentou picos de resistência ao cisalhamento apenas sob as tensões normais de 100 kPa e 200 kPa, quando ensaiada sob condição embebida, conforme evidenciado nas curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal, conforme apresentado na Figura 5.28.

Os corpos de prova foram ensaiados com os planos de foliação orientados perpendicularmente à superfície de cisalhamento, em razão de limitações impostas pelo processo de amostragem. Essa configuração pode ter contribuído para o aumento da resistência mobilizada, sobretudo sob tensões normais mais baixas. Foram obtidos parâmetros de resistência de pico de $\varphi' = 32^\circ$ e $c' = 36$ kPa, e de resistência pós-pico de $\varphi' = 23^\circ$ e $c' = 23$ kPa (Figura 5.29).



Figura 5.26 - Amostras Cisalhadas Bege CN (25, 50, 100e 200 kPa).



Figura 5.27 - Amostras Cisalhadas Bege Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa).

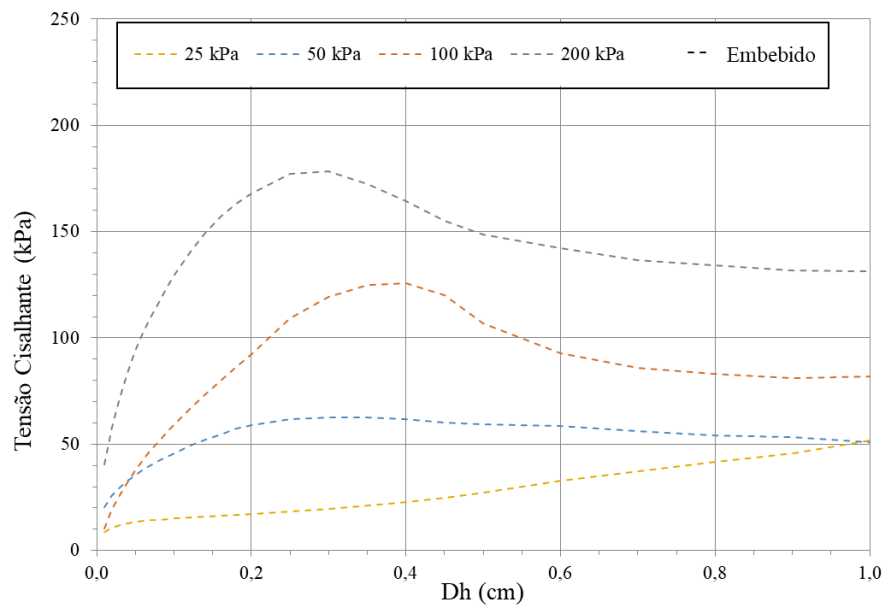


Figura 5.28 - MA03-AM05: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal.

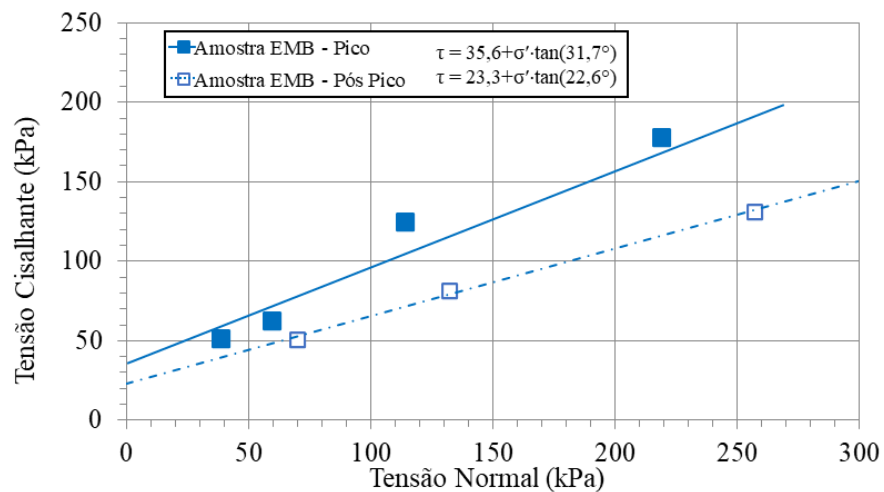


Figura 5.29 - MA03 - AM05: Envolvórias de resistência.

A amostra AM06, caracterizada por um solo de coloração cinza, possui registros fotográficos dos corpos de prova e das respectivas tensões normais apresentados na Figura 5.30 e Figura 5.31. Essa amostra apresentou pico evidente de resistência ao cisalhamento somente sob a tensão normal de 200 kPa. Nas demais tensões ensaiadas, não foram identificados picos expressivos nas tensões cisalhantes. Sob condição embebida, as tensões cisalhantes obtidas para as tensões normais de 25 kPa e 50 kPa apresentaram valores próximos entre si (Figura 5.32), o que é coerente com a heterogeneidade do material ensaiado e se reflete na dispersão dos resultados.

Foram obtidos parâmetros de resistência de $\phi' = 32^\circ$ e $c' = 18$ kPa (Figura 5.33). A significativa variação do ângulo de atrito interno possivelmente está associada ao posicionamento inicial dos planos de foliação e às alterações na orientação dessas estruturas durante a mobilização da ruptura.

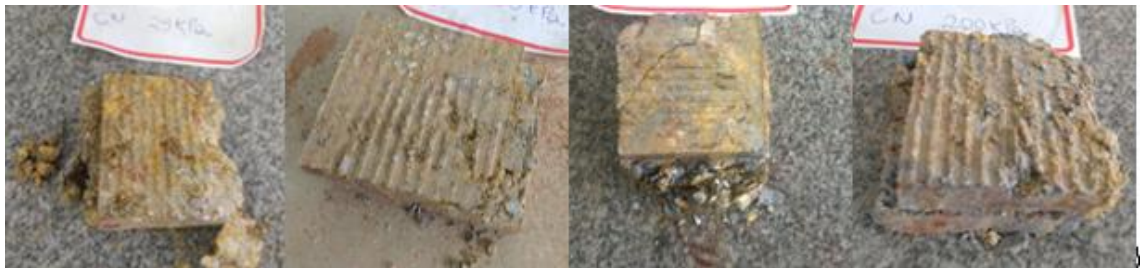


Figura 5.30 - Amostras Cisalhadas Cinza CN (25, 50, 100e 200 kPa).



Figura 5.31 - Amostras Cisalhadas Cinza Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa).

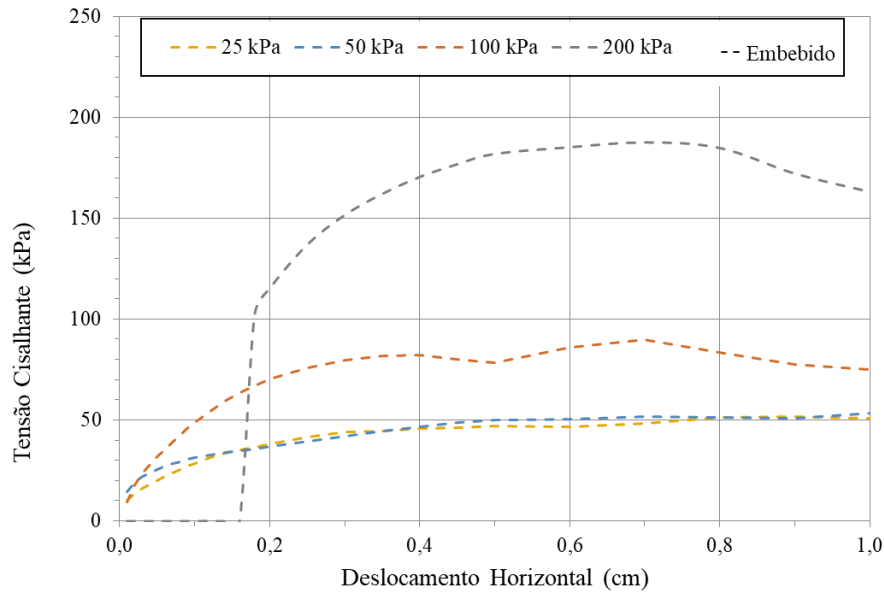


Figura 5.32 - MA03: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM06.

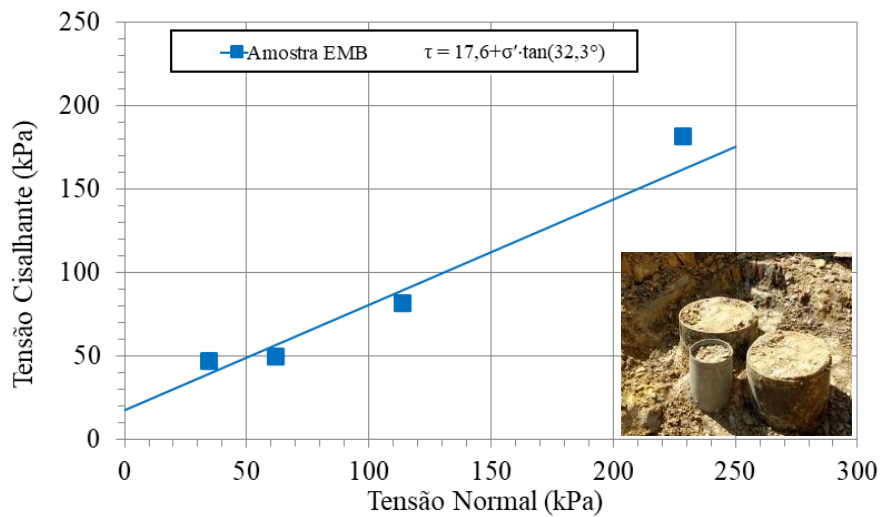


Figura 5.33 - MA03: Envoltórias de resistência, AM06.

As curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal da AM07, Figura 5.34, apresentaram comportamento strain hardening, ou seja, falta de definição do ponto de ruptura ou constância de tensão cisalhante com o aumento do deslocamento horizontal. Neste caso, foi realizado o ajuste hiperbólico por meio do método de Campos e Carrilho (1995). Nesse método, os autores assumem que a ruptura ocorre no primeiro instante em que a curva de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal atinge uma inclinação aproximadamente constante (Figura 5.35).

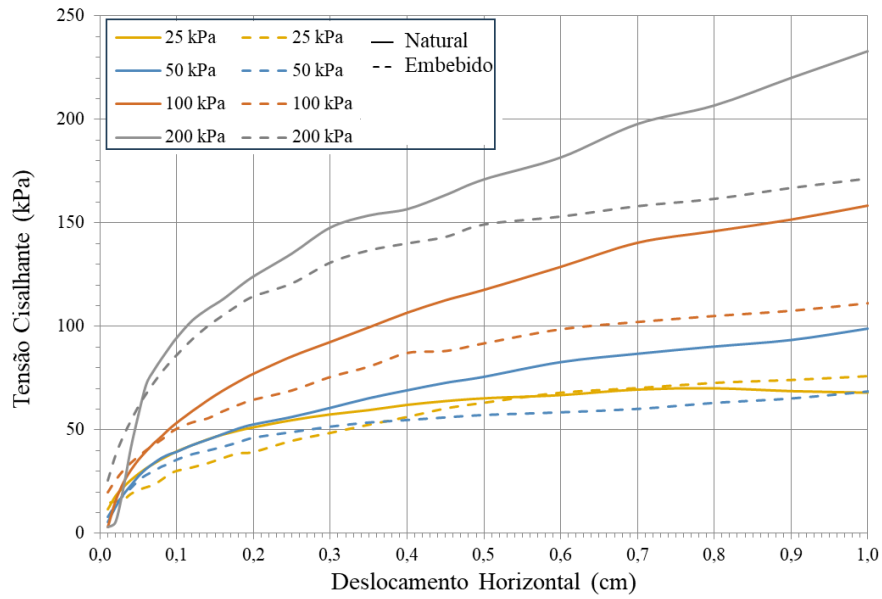


Figura 5.34 - MA03: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM07.

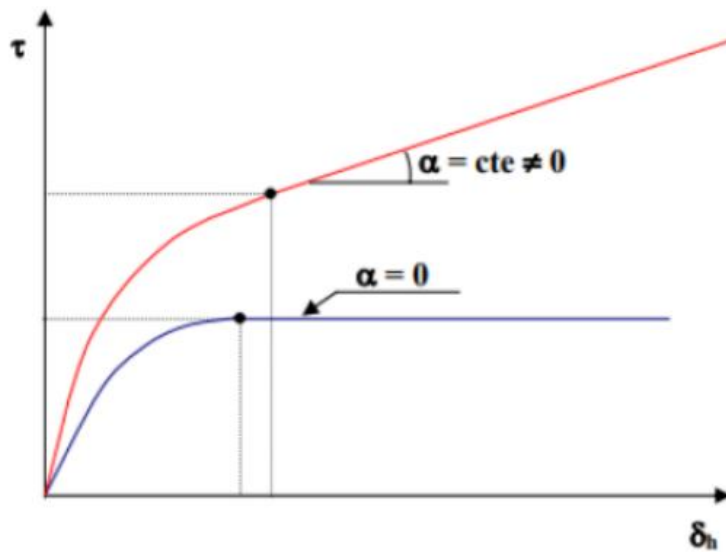


Figura 5.35 - Critério de Campos e Carrilho (1995).

A amostra AM07, de coloração marrom-roseada, foi ensaiada sob as tensões normais de 25, 50, 100 e 200 kPa, e os corpos de prova correspondentes encontram-se registrados na Figura 5.36 e Figura 5.37.



Figura 5.36 - Amostras Cisalhadas Marrom Roseado CN (25, 50, 100e 200 kPa).



Figura 5.37 - Amostras Cisalhadas Marrom Roseado Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa).

Na condição embebida, foram determinados os parâmetros de resistência $\phi' = 28^\circ$ e $c' = 26$ kPa, enquanto na condição natural obtiveram-se $\phi' = 28^\circ$ e $c' = 49$ kPa (Figura 5.38). A redução significativa da coesão após saturação está coerente com a perda da sucção matricial inicialmente presente no solo. O ângulo de atrito interno não sofreu variações significativas entre as condições analisadas.

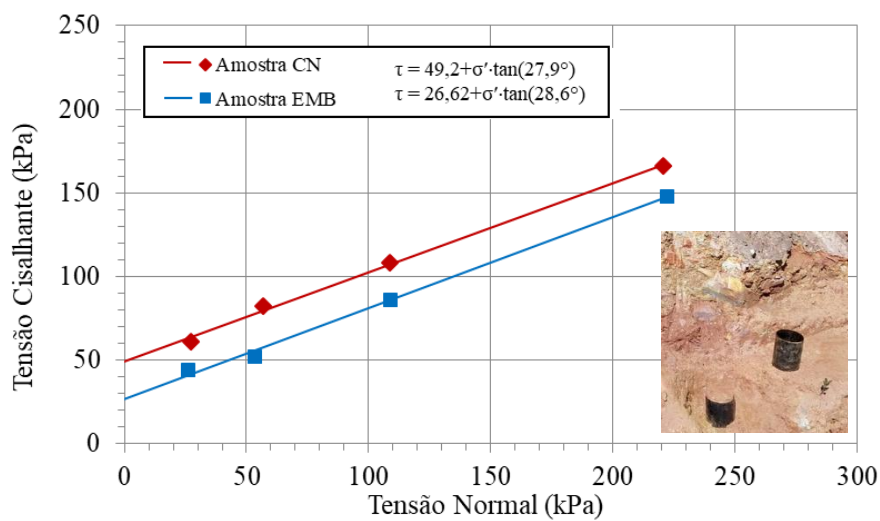


Figura 5.38 - MA03: Envoltórias de resistência AM07.

A amostra AM08, de coloração marrom-roseada, foi ensaiada sob as tensões normais de 25, 50, 100 e 200 kPa, cujos corpos de prova estão apresentados nas Figura 5.39 e Figura 5.40. Em condição embebida, essa amostra apresentou picos bem definidos de resistência ao cisalhamento nas tensões de 100 kPa e 200 kPa (Figura 5.41). Para as demais tensões, tanto na condição natural quanto na embebida, não foram observados picos de resistência claros, resultando em um comportamento mais estável da tensão mobilizada ao longo do deslocamento.

Observa-se que, na condição embebida, a tensão cisalhante obtida sob 100 kPa foi superior à verificada sob 200 kPa. Essa inversão pode estar associada à orientação dos planos de foliação em relação à superfície de cisalhamento, considerando que os corpos de prova foram ensaiados com os planos de foliação paralelos à superfície de ruptura. A Figura 5.42 apresenta as envoltórias de resistência obtidas para ambas as condições de umidade. Para a condição embebida, foram determinados os parâmetros de resistência efetiva de $c' = 21$ kPa e $\phi' = 18^\circ$, enquanto, para a condição natural, os valores obtidos foram $c' = 25$ kPa e $\phi' = 21^\circ$.



Figura 5.39 - Amostras Cisalhadas Roxo CN (25, 50, 100e 200 kPa).



Figura 5.40 - Amostras Cisalhadas Roxo Embebido (25, 50, 100 e 200 kPa).

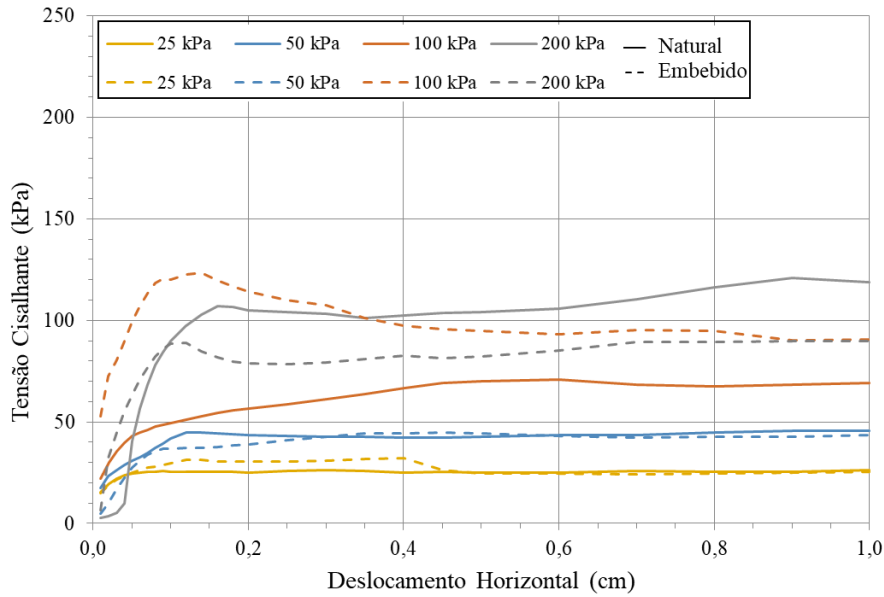


Figura 5.41 - MA03: Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal, AM08.

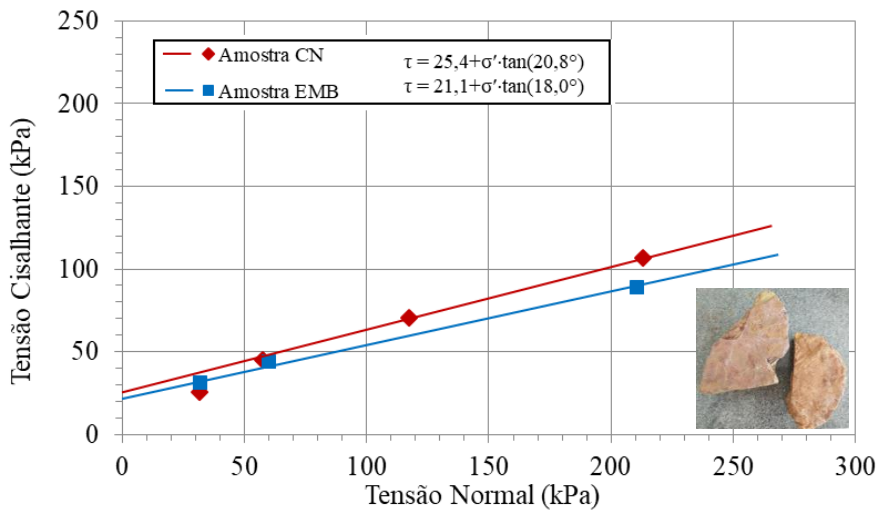


Figura 5.42 - MA03: Envolventórias de resistência AM08.

As amostras retiradas do MA03 foram as que apresentaram maior dispersão nos resultados, o que impossibilitou, em alguns casos, a definição de uma envolventória de resistência representativa. O intercepto coesivo em condição natural de pico variou entre 25 kPa e 59 kPa, enquanto os ângulos de atrito efetivo apresentaram valores entre 20° e 33°. Embora a amplitude seja elevada, esses intervalos permanecem coerentes com aqueles reportados na literatura especializada para solos residuais de filito (Tabela 2.1). Observou-se também que, na AM05, a embebição resultou na maior redução de c' (redução de 59,3%) em comparação com a AM08 (redução de 16%), comportamento associado às diferenças mineralógicas e estruturais entre as amostras, reforçando a variabilidade presente no MA03. Essa amplitude dos parâmetros de

resistência reflete principalmente a heterogeneidade litológica dentro do mesmo maciço e as diferenças no grau de alteração das amostras.

MA04

A amostra AM09 foi ensaiada em condição embebida sob duas orientações distintas entre o plano de foliação do filito e o plano de cisalhamento: paralela e perpendicular. Essa abordagem é fundamental em solos derivados de rochas fortemente foliadas, nos quais a anisotropia estrutural controla a resistência mobilizada. Nos ensaios com foliação perpendicular ao plano de ruptura, aplicados sob tensões normais de 10, 25, 40 e 200 kPa (Figura 5.43), observou-se a presença de picos bem definidos de resistência. Este comportamento indica que, quando o cisalhamento corta transversalmente os planos lamelares, há maior contribuição da estrutura intacta e dos contatos interparticulares, gerando resistência de pico mais elevada.

Por outro lado, quando o cisalhamento ocorre com a foliação paralela ao plano de ruptura (tensões de 50, 100, 140 e 300 kPa), houve grande dispersão entre as curvas e ausência de picos claros, impossibilitando a construção de uma envoltória representativa de pico. Esse comportamento é característico de materiais altamente anisotrópicos: ao cisalhar paralelamente aos planos de mica e clorita, o mecanismo dominante passa a ser o deslizamento lamelar, com estrutura inicialmente enfraquecida e comportamento mais dúctil. Esse contraste evidencia que o ângulo entre a foliação e a superfície de cisalhamento controla não só o valor da resistência, mas também o modo de deformação.

A partir dos ensaios, obtiveram-se parâmetros de pico de $\varphi' = 20^\circ$ e $c' = 49$ kPa, enquanto a envoltória pós-pico resultou em $\varphi' = 19,5^\circ$ e $c' = 12,3$ kPa (Figura 5.24). A queda expressiva da coesão confirma que, mesmo quando há picos inicialmente elevados, a resistência mobilizada após o amolecimento converge para valores baixos típicos de materiais foliados saturados com deslizamento progressivo ao longo dos planos.

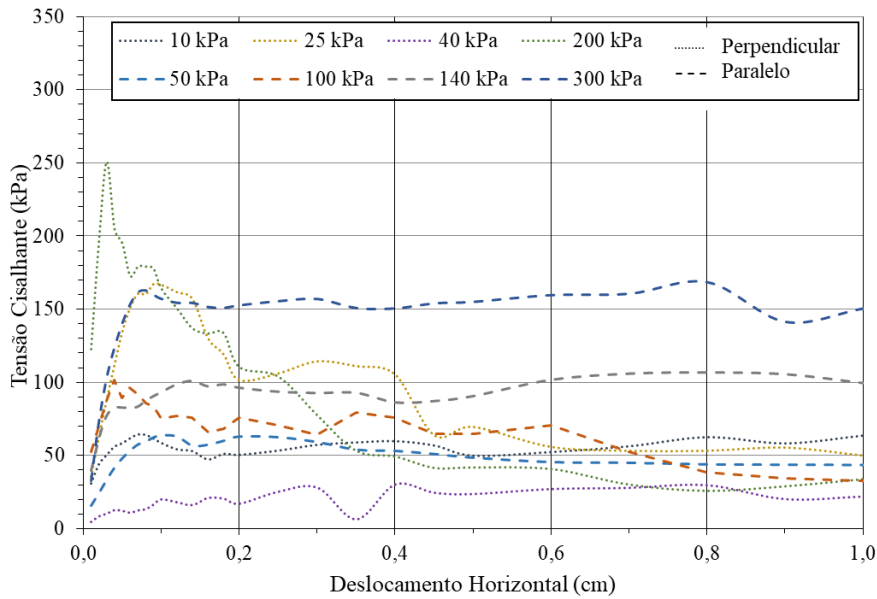


Figura 5.43 - MA04 -AM09: Gráfico de tensão cisalhante por deslocamento horizontal.

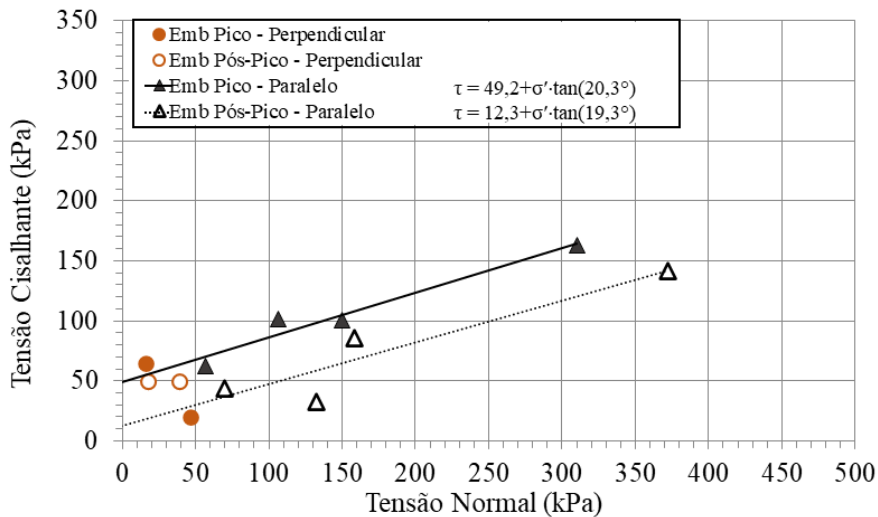


Figura 5.44 - MA04 -AM09: Envolvória de resistência em Condição Embebida realizados em paralelo e perpendicular as foliações.

A amostra AM10, Figura 5.45, contribui para reforçar o papel da saturação no comportamento do filito. Ensaída em condição natural e embebida, a única tensão que exibiu um pico bem definido foi o ensaio sob 50 kPa na condição não saturada, evidenciando a influência da sucção matricial na resistência aparente. Na condição embebida, o comportamento foi mais dúctil, e os parâmetros de pico reduziram-se para $\phi' = 16^\circ$ e $c' = 0$ kPa, contrastando com $\phi' = 28^\circ$ e $c' = 8,4$ kPa obtidos em condição natural. A redução marcante da coesão e do atrito confirma que a saturação atua desfavoravelmente, reduzindo tanto os efeitos de sucção quanto a rigidez dos contatos estruturais.

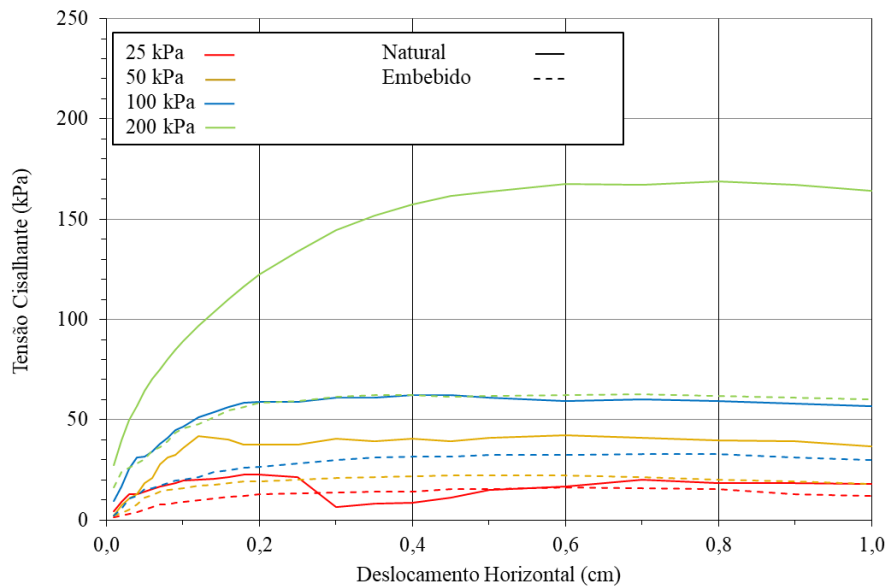


Figura 5.45 - MA04 -AM10: Gráfico de tensão cisalhante por deslocamento, condição natural e embebida.

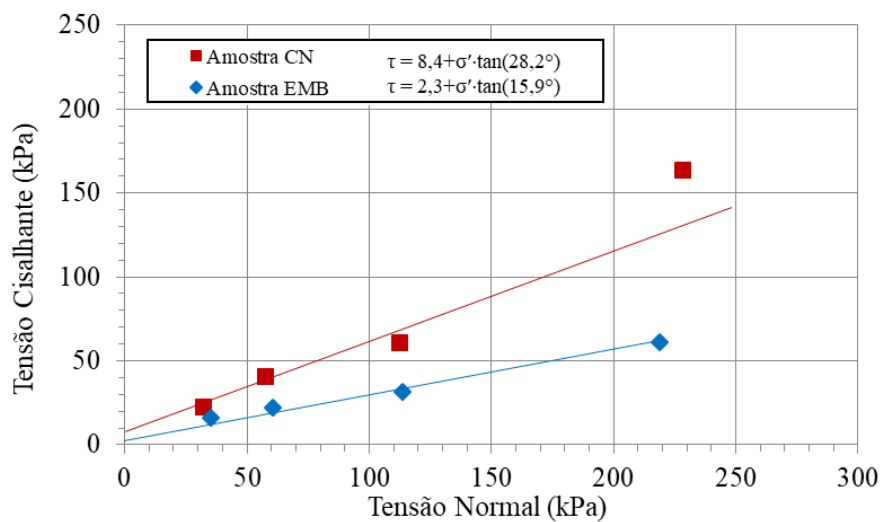


Figura 5.46 - MA04 -AM10: Envoltória de resistência em Condição Natural e Embebida.

A amostra AM14 foi coletada no mesmo ponto de amostragem em dois períodos distintos. A primeira coleta ocorreu em 2018, ocasião em que foram realizados os ensaios de cisalhamento direto para determinação dos parâmetros de resistência de pico, além do ensaio conduzido até a condição residual. Posteriormente, em 2019, novas amostras foram coletadas no mesmo local com o objetivo de avaliar o comportamento do material sob diferentes velocidades de cisalhamento.

A amostra AM14 (2019) foi ensaiada em condição embebida sob três taxas de cisalhamento, 0,20 mm/min, 0,055 mm/min e 0,0055 mm/min. As curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal (Figura 5.47) exibiram picos de resistência apenas na maior

velocidade, sobretudo para as tensões normais de 25 kPa e 50 kPa; nas velocidades mais baixas, as curvas cresceram até um patamar sem pico definido. Os parâmetros de pico obtidos foram $\phi' = 27^\circ$ e $c' = 30$ kPa para 0,20 mm/min; $\phi' \approx 25^\circ$ e $c' = 23$ kPa para 0,055 mm/min; e $\phi' \approx 25^\circ$ e $c' = 20$ kPa para 0,0055 mm/min (Figura 5.48).

O acréscimo de resistência mobilizada na maior taxa de deslocamento horizontal confirma a tendência observada em campo por Silva *et al.* (2018), que registraram deslocamentos de até 4 mm/dia no nível d'água máximo e associaram velocidades mais elevadas a maiores resistências cisalhantes no mesmo depósito coluvionar. Esse comportamento é compatível com o efeito *rate-strengthening* descrito por Mitchell (1976), segundo o qual tanto a coesão quanto o ângulo de atrito aumentam aproximadamente de forma logarítmica com a taxa de deformação, em virtude da contribuição viscosa dos contatos interparticulares em solos finos saturados.

Nota-se que a redução da velocidade de cisalhamento provocou variação discreta no ângulo de atrito ($\Delta\phi' \approx 2^\circ$), enquanto o intercepto coesivo diminuiu 10 kPa. Considerando que a AM14 é um solo coluvionar onde os deslocamentos em campo são lentos, rupturas tendem a mobilizar parâmetros de resistência inferiores aos obtidos nas velocidades mais altas de laboratório. Assim, ensaios executados em taxas baixas tornam-se essenciais para determinar valores de ϕ' e c' mais representativos do comportamento real do maciço.

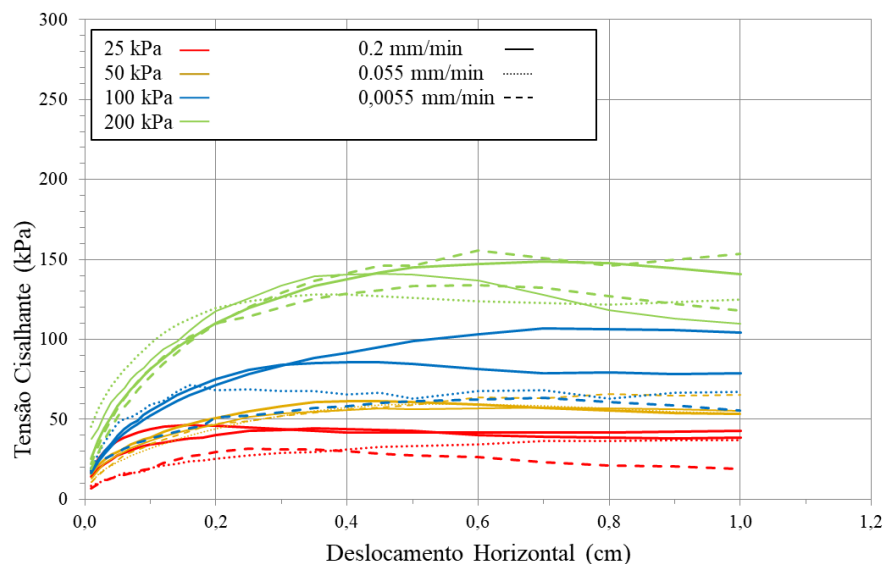


Figura 5.47 - MA04 -AM14: Gráfico de tensão cisalhante por deslocamento, $V1 = 0,20$ mm/min, $V2 = 0,055$ mm/min e $V3 = 0,0055$ mm/min.

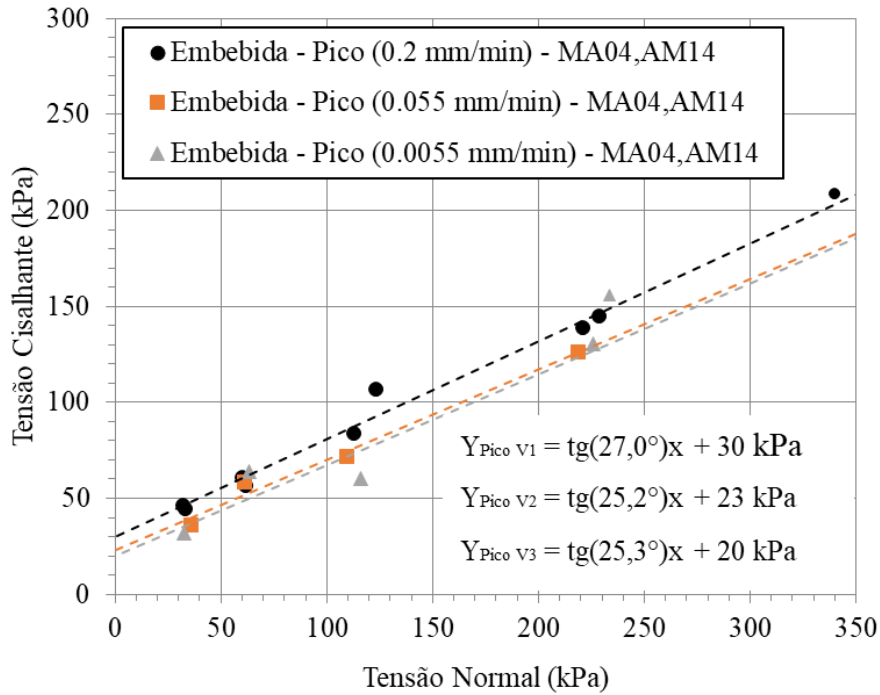


Figura 5.48 - MA04 -AM14: Envoltória de resistência de Pico e Pós-Pico em Condição Embebida V1= 0,20 mm/min, V2 = 0,055 mm/min e V3 = 0,0055 mm/min.

A AM14 (2018), apresentou comportamento compressível para todas as tensões ensaiadas para os ensaios em condição embebida. Após as regressões, as tensões ensaiadas não apresentaram pico de tensões, porém, para os primeiros ensaios as tensões de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa apresentaram pico de resistência. Tais picos foram atenuados durante os processos de regressão até atingir uma tensão residual (Figura 5.49). Na condição embebida verificou-se ϕ' e c' iguais a 25° e 20 kPa de resistência de pico. (Figura 5.50). Nota-se que os parâmetros de resistência encontrados são os mesmos obtidos para as amostras ensaiadas a uma velocidade lenta (0,0055mm/min). Isso indica que a mobilização lenta acontece com os parâmetros de resistência residuais.

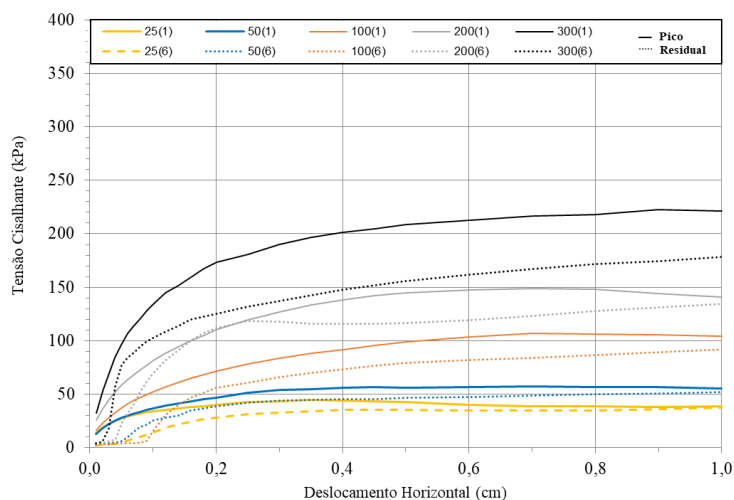


Figura 5.49 - MA04 -AM14: Gráfico de tensão cisalhante por deslocamento (Embebida 1 = Resistência de Pico, embebida 6 = Resistência Residual).

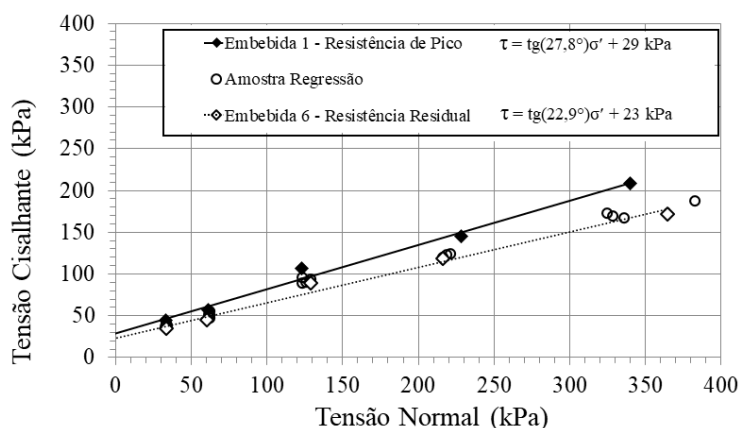


Figura 5.50 - MA04 -AM14: Envoltórias de resistência de Pico e Residual (Embebida 1 = Resistência de Pico, Embebida 6 = Resistência Residual).

O conjunto de resultados obtidos para o MA04 mostra um maciço condicionado pela anisotropia estrutural. Os resultados da AM09 evidenciaram que a orientação da foliação é um fator decisivo para a resistência mobilizada. Quando a foliação estava perpendicular à superfície de ruptura, a coesão foi mais elevada e os picos de resistência ficaram bem definidos. Quando estava paralela, os resultados foram mais dispersos.

Os resultados da AM14 mostram que a resistência mobilizada no MA04 é influenciada pela taxa de cisalhamento, com maiores resistências registradas nas velocidades mais altas e valores próximos da condição residual nas velocidades mais lentas. Esse comportamento é compatível com o que ocorre no talude durante períodos chuvosos, quando o aumento da umidade reduz a sucção matricial e as deformações tendem a ocorrer de forma lenta e contínua,

características típicas de movimentos de rastejo. Nessas situações, o solo mobiliza parâmetros próximos da resistência residual e pode desenvolver superfícies polidas de cisalhamento, conhecidas como *slickensides*, que resultam da acomodação progressiva ao longo de planos de partículas lamelares. Assim, a AM14 indica que, em campo, eventos associados a períodos prolongados de chuva tendem a mobilizar resistências baixas, próximas da condição residual.

Dessa forma, o MA04 apresenta um comportamento governado pela interação entre foliação, saturação e taxa de deformação. A influência da orientação estrutural, associada à perda de resistência em condições de maior umidade e à mobilização de parâmetros de resistência menores nas menores velocidades de cisalhamento, evidencia que a combinação desses fatores direciona o maciço para condições de resistências residuais.

Os resultados de monitoramento e de laboratório permitem discutir o colúvio de filito do MA04 como um material cuja resistência não depende apenas do estado de tensões e de saturação, mas também da taxa de deformação. O ponto de partida foi a própria instrumentação de campo: as retroanálises realizadas para duas campanhas de movimentação, em anos consecutivos, mostraram que o mesmo maciço, rompendo ao longo da mesma superfície de deslizamento, exigiu parâmetros de resistência distintos para reproduzir o estado de equilíbrio limite observado. Na primeira campanha, associada a um nível d'água mais baixo e a velocidades de deslocamento menores, a retroanálise indicou ângulo de atrito efetivo próximo ao limite inferior obtido em laboratório para a condição embebida, representando adequadamente uma resistência pós-pico ou residual. Na segunda campanha, com lençol freático mais elevado e velocidades de movimento da ordem de milímetros por dia, a retroanálise convergiu para um ângulo de atrito mais elevado, ainda compatível com a faixa de valores laboratoriais, mas significativamente superior ao utilizado no primeiro cenário.

Essa diferença não pode ser atribuída a mudanças relevantes na geometria, no mecanismo de ruptura ou na superfície de deslizamento, que se mantiveram praticamente inalterados. Tampouco se justifica por variações importantes na estrutura do material, uma vez que se trata do mesmo colúvio em estado já pré-cisalhado. O que efetivamente se alterou entre as duas campanhas foi o regime de deformação: a segunda movimentação ocorreu com maiores velocidades de rastejo, registradas pela inclinometria e corroboradas por observações de campo. A hipótese original, já sugerida no artigo técnico, foi de que, em tal circunstância, a massa de solo mobilizaria uma parcela adicional de resistência associada ao comportamento viscoso do material, elevando momentaneamente a resistência ao cisalhamento em relação ao valor residual de longo prazo.

Para investigar essa hipótese de forma controlada, foram executados ensaios de cisalhamento direto na amostra AM14, coletada no mesmo ponto do MA04 em duas campanhas (2018 e 2019). Na campanha de 2019, a amostra foi ensaiada em condição embebida, sob três velocidades de cisalhamento: uma velocidade de referência ($V2 \approx 0,055$ mm/min), uma velocidade mais elevada ($V1 = 0,20$ mm/min) e uma velocidade dez vezes menor ($V3 = 0,0055$ mm/min). Em todas as séries foram adotados os mesmos níveis de tensão normal, de modo que a única variável controlada foi a taxa de deslocamento no plano de cisalhamento.

Os resultados são bastante elucidativos. Para a maior velocidade ($V1$), as curvas tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal tendem a mobilizar picos de resistência mais pronunciados, com valores de tensão cisalhante significativamente superiores aos obtidos para $V2$ e, principalmente, para $V3$. As envoltórias ajustadas indicam acréscimo nos parâmetros de resistência (ϕ' e c') à medida que a velocidade aumenta, evidenciando que o material responde com maior resistência mobilizada quando submetido a taxas mais elevadas de cisalhamento. À medida que a velocidade é reduzida, o comportamento se torna mais dúctil: a curva tende a suavizar o pico, aproximando-se de uma resposta sem amolecimento acentuado pós-pico, e os parâmetros de resistência convergem para valores menores e mais estáveis, próximos daqueles obtidos nos ensaios realizados em 2018 com velocidade lenta. Em outras palavras, os ensaios de $V3$ e da campanha de 2018 reproduzem uma condição de cisalhamento lento, compatível com o regime de rastejo de longo prazo do colúvio; já a condição de $V1$ reproduz um estado de cisalhamento acelerado, análogo ao observado em campo na segunda campanha de movimentação.

Essa resposta dependente da taxa de deformação é coerente com a interpretação de que o colúvio de filito apresenta uma parcela relevante de resistência viscosa, superposta à resistência friccional clássica descrita pelo critério de Mohr–Coulomb. Em termos conceituais, a resistência ao cisalhamento pode ser decomposta em: (i) componente friccional/coesa, função das tensões efetivas e da estrutura do material; e (ii) componente tempo/taxa-dependente, associada aos mecanismos de dissipação viscosa nos contatos interparticulares, rearranjos microestruturais e fluxo de água em filmes adsorvidos. Quando a taxa de cisalhamento é maior, essa componente viscosa é mais mobilizada, elevando a tensão cisalhante necessária para manter a deformação; quando a taxa é muito baixa, o material dispõe de tempo para promover rearranjos e dissipar tensões, aproximando-se de uma resistência residual de longo prazo.

A conexão entre laboratório e campo torna-se então bastante clara. A retroanálise da primeira movimentação, caracterizada por deslocamentos mais lentos, “enxerga” essencialmente a resistência residual lenta do colúvio, aquela que foi reproduzida em

laboratório nos ensaios com velocidade reduzida (V3) e na campanha de 2018. Já a retroanálise da segunda movimentação, em que a inclinometria registrou velocidades mais elevadas, capta um patamar de resistência superior, associado à mobilização transitória da parcela viscosa, compatível com os resultados obtidos nos ensaios com maior velocidade (V1). Assim, o que à primeira vista poderia ser interpretado como incoerência entre retroanálises de anos diferentes passa a ser entendido como manifestação natural de um comportamento visco-plástico: o mesmo material, na mesma superfície de cisalhamento, pode mobilizar resistências distintas dependendo da taxa com que se deforma.

Do ponto de vista de projeto e de interpretação de casos históricos, esse resultado é particularmente relevante. Em análises convencionais, a resistência residual é muitas vezes tratada como um parâmetro único e independente da taxa de deformação. Os dados do MA04/AM14 mostram que, para colúvios argilosos de filito em condição embebida, essa simplificação pode ser insuficiente: há um intervalo de velocidades em que a resistência mobilizada pode ser substancialmente maior do que aquela observada em cisalhamento lento, sem que isso signifique um ganho “permanente” de estabilidade. Em termos práticos, isso implica que:

- Movimentos mais rápidos podem, paradoxalmente, ocorrer com $FS \approx 1$ associado a um nível de resistência maior que o residual de longo prazo;
- Após cessar o evento e reduzir-se a taxa de deformação, o maciço tende a relaxar gradualmente para resistências mais baixas, compatíveis com a envoltória residual lenta;
- Análises de estabilidade que desconsiderem a influência da taxa de deformação podem subestimar a variabilidade de comportamento observada ao longo do tempo em encostas instrumentadas.

Dessa forma, o conjunto de evidências de campo e laboratório indica que o colúvio de filito do MA04 deve ser encarado não apenas como um solo residual anisotrópico e sensível à saturação, mas também como um material influenciado pela velocidade de cisalhamento, no qual a parcela viscosa da resistência desempenha papel relevante na mobilização da resistência ao cisalhamento.

MA05

Nas amostras AM11 (Figura 5.51A) e AM12 (Figura 5.51B) do MA05, foram realizados ensaios de cisalhamento direto com corpos de prova somente na condição embebida. Para cada envoltória foram ensaiados quatro corpos de prova sob as tensões normais (σ_n) de 25, 50, 100 e 200 kPa (Figura 5.52 a Figura 5.54). Foram definidos pontos considerando as condições de pico e pós pico na curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal (Figura 5.55 a Figura 5.57). Os pares tensão cisalhante e tensão normal na ruptura dos solos residuais de filito (Pé da Cortina e Pé de Montante) são apresentados na Figura 5.58. A partir dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto, foram definidas duas envoltórias de resistência para o solo residual de filito (Figura 5.59). A envoltória superior, com 30° de ângulo de atrito efetivo e 10 kPa de intercepto coesivo representa o limite superior dos parâmetros a serem adotados para esse material. A envoltória inferior, com $\phi=23^\circ$ e $c=10$ kPa, por sua vez, corresponde ao limite inferior.



Figura 5.51 – A) AM11: Pé de Montante e B) AM12: Pé da Cortina.



Figura 5.52 – Corpos de prova cisalhados da AM11: Pé de Montante (25, 50, 100 e 200 kPa).



Figura 5.53 – Corpos de prova cisalhados da AM12: Pé da Cortina, com planos na horizontal, direção paralela ao plano de cisalhamento (25, 50, 100 e 200 kPa).



Figura 5.54 – Corpos de prova cisalhados da AM12: Pé da Cortina, com planos na vertical, direção perpendicular ao plano de cisalhamento (25, 50, 100 e 200 kPa).

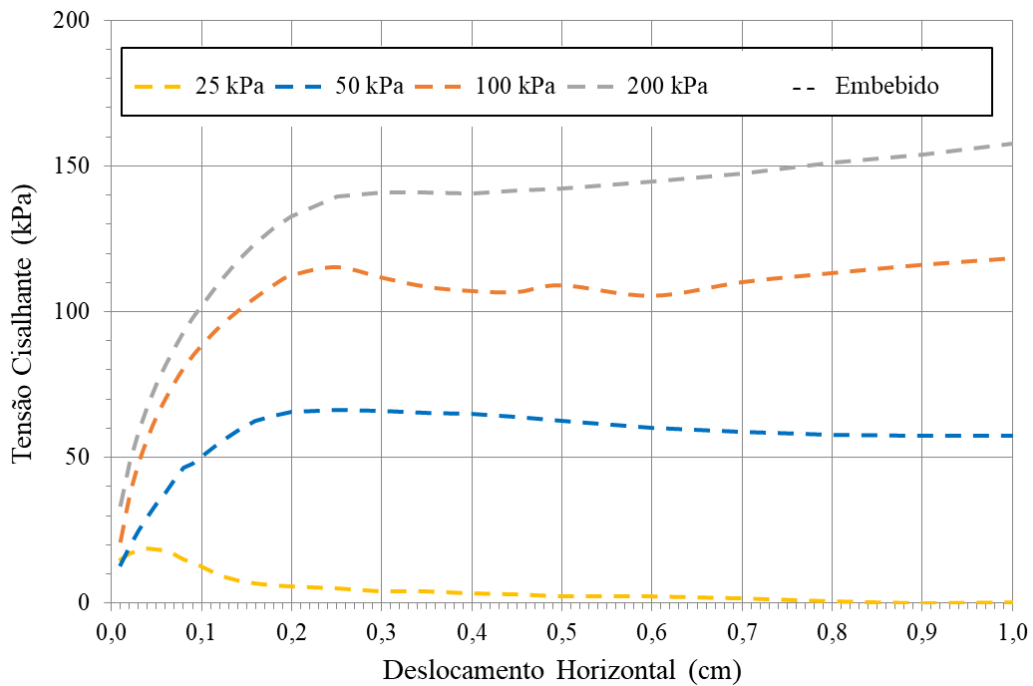


Figura 5.55 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos CP da AM11: Pé de montante.

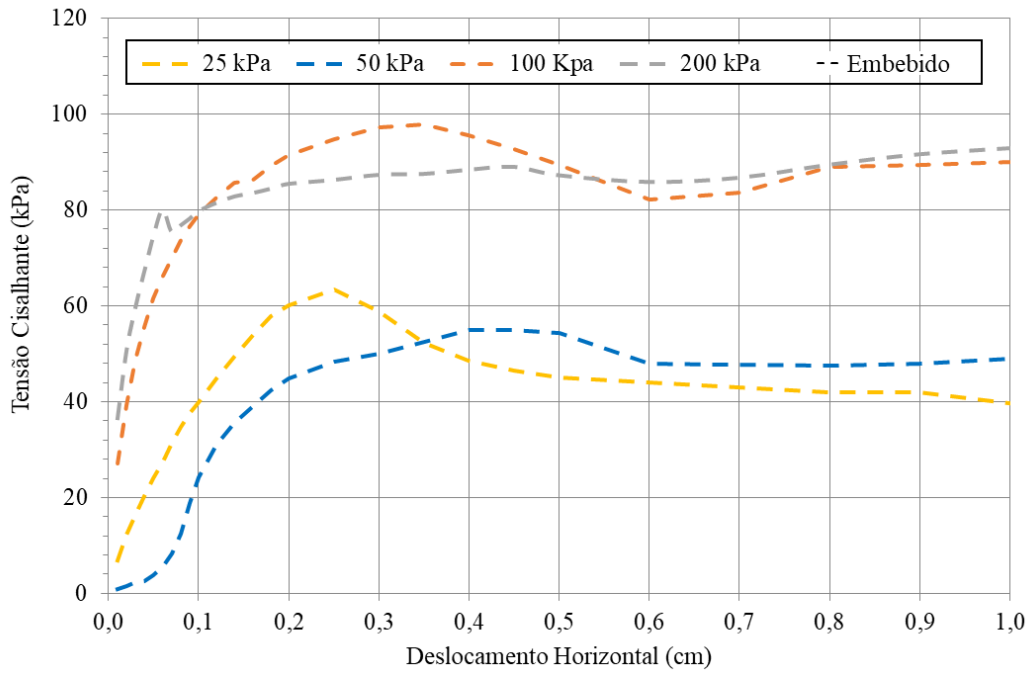


Figura 5.56 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos CP da AM12: Pé da Cortina com as foliações paralelas ao plano de cisalhamento do ensaio.

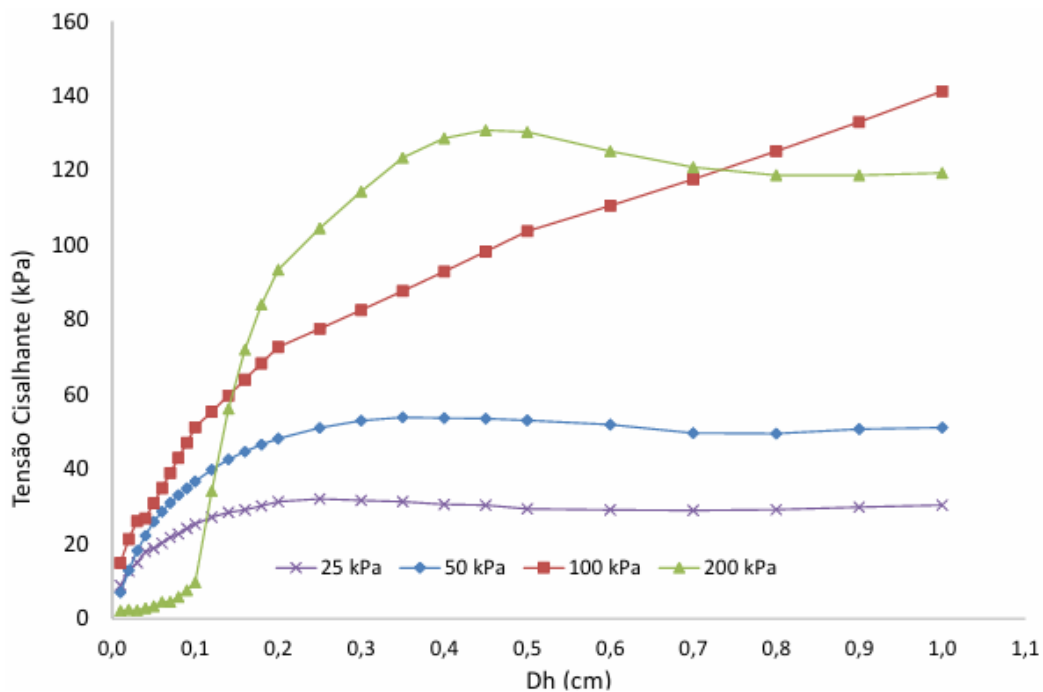


Figura 5.57 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos CP da AM12:Pé da Cortina com as foliações perpendiculares ao plano de cisalhamento do ensaio.

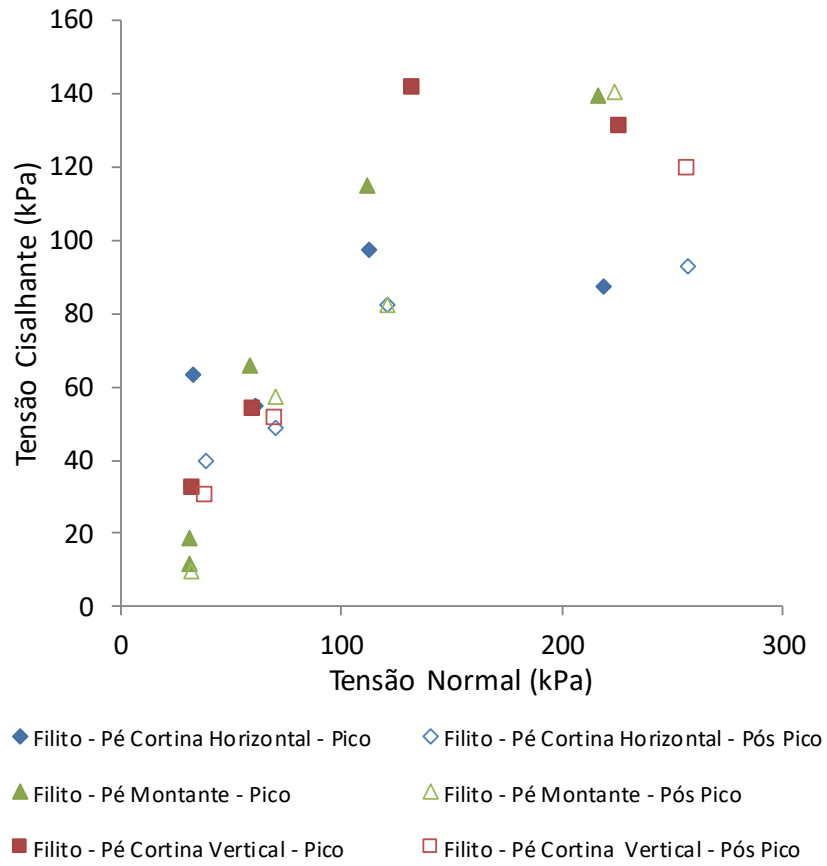


Figura 5.58 – Pares de tensão cisalhante e tensão normal dos CP dos solos residuais de filito do Pé de Montante e Pé da Cortina.

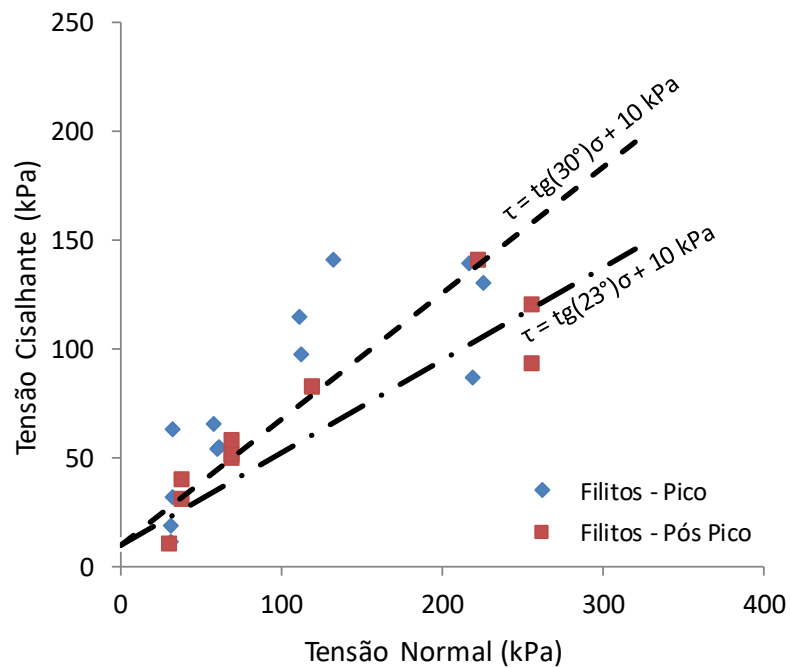


Figura 5.59 – Envolvórias de Resistência, considerando os pares de tensões cisalhante e normal dos solos residuais de filito do Pé de Montante e Pé da Cortina.

Os ensaios de cisalhamento direto realizados nas amostras AM11 e AM12 do MA05, provenientes do Pé da Cortina e do Pé de Montante, forneceram evidências importantes sobre o comportamento mecânico do solo residual de filito em condição embebida. A análise integrada dos resultados revelou que a resistência ao cisalhamento é fortemente condicionada pela orientação das foliações do filito em relação ao plano de cisalhamento do ensaio, além de refletir a heterogeneidade natural desse tipo de material. O conjunto de curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal permitiu observar diferenças significativas entre os comportamentos mobilizados, destacando que a anisotropia estrutural exerce papel determinante na resposta mecânica do maciço.

No Pé de Montante, os corpos de prova ensaiados sob tensões normais de 25, 50, 100 e 200 kPa apresentaram curvas consistentes, com mobilização gradativa da resistência e pontos máximos bem definidos, seguidos por um pós-pico pouco acentuado. Esse comportamento indica que, nessa região do maciço, a estrutura herdada do filito encontra-se parcialmente preservada, mas sem dominar completamente o mecanismo de ruptura.

O comportamento observado nos ensaios do Pé da Cortina, com os corpos de prova preparados com a foliação paralela ao plano de cisalhamento, contrasta fortemente com o observado no Pé de Montante. Nessa configuração, o cisalhamento ocorre ao longo das foliações do filito, favorecendo o deslizamento lamelar e reduzindo a necessidade de ruptura interna das lamelas. As curvas exibiram picos de resistência suaves, seguidos de trechos quase horizontais, além de elevada dispersão entre corpos de prova submetidos à mesma tensão normal. Essa variabilidade expressiva não constitui uma deficiência experimental, mas sim uma manifestação natural da heterogeneidade do filito, no qual pequenas diferenças na continuidade, espessura ou orientação das lamelas alteram significativamente a resistência mobilizada. Em termos geotécnicos, esse comportamento indica que taludes cujo plano de ruptura potencial é paralelo às foliações tendem a apresentar resistências mais baixas e comportamento mais dúctil, próximos à condição pós-pico.

Por outro lado, os ensaios do Pé da Cortina com foliação perpendicular ao plano de cisalhamento revelaram um comportamento distinto, caracterizado por maior rigidez inicial e picos de resistência mais acentuados. Nessa situação, o cisalhamento deve cortar transversalmente as lamelas, exigindo maior ruptura estrutural e aumentando a resistência mobilizada. As curvas apresentaram menor dispersão quando comparadas às do ensaio paralelo, e a reprodutibilidade entre corpos de prova foi mais elevada. Após o pico, observou-se um pós-pico suave, refletindo a transição para um regime controlado predominantemente pela matriz fina. Esse comportamento demonstra que a orientação das foliações pode modificar

significativamente a resistência ao cisalhamento, deslocando-a de valores residuais para valores próximos do limite superior do material, conforme indicado pelas envoltórias obtidas.

A comparação integrada entre os três conjuntos, Pé de Montante, Pé da Cortina com foliação paralela e Pé da Cortina com foliação perpendicular, permite estabelecer envoltória de comportamento para o filito residual. A foliação perpendicular representa o limite superior de resistência, com maior integridade estrutural mobilizada. A foliação paralela representa o limite inferior, marcado por facilidade de deslizamento lamelar e grande dispersão. O Pé de Montante traduz um comportamento intermediário e menos condicionado, compatível com solos residuais onde parte da estrutura original foi degradada. As envoltórias globais, com ângulos de atrito entre 23° e 30° e intercepto coesivo de aproximadamente 10 kPa, refletem essa variabilidade estrutural intrínseca do material.

Essas interpretações possuem implicações diretas para análises de estabilidade em taludes formados por filitos alterados. A combinação entre saturação elevada, representada pelos ensaios em condição embebida, e a orientação estrutural do maciço pode levar à mobilização de resistências significativamente distintas em zonas muito próximas entre si. Em particular, a presença de foliação paralela à superfície de ruptura constitui condição desfavorável, reduzindo a resistência disponível e aumentando a probabilidade de deformações progressivas ou ruptura ao longo de planos polidos. Por sua vez, regiões onde a foliação se encontra desfavoravelmente disposta em relação ao talude podem apresentar resistência significativamente maior, mascarando condições potenciais de instabilidade caso análises baseadas em parâmetros homogêneos sejam adotadas.

Assim, os resultados do MA05 evidenciam que a resistência ao cisalhamento do solo residual de filito depende não apenas do estado de tensões e da saturação, mas também, de forma decisiva, da geometria interna do material, expressa pela orientação das foliações. Esse comportamento reforça que análises de estabilidade em maciços derivados de filito devem considerar explicitamente a anisotropia estruturada, adotando envoltórias de resistência representativas das condições paralela e perpendicular, a fim de capturar a faixa realista de resistência mobilizável no campo.

5.3.1 - DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Os resultados integrados dos ensaios de cisalhamento direto indicam que a resistência ao cisalhamento dos solos residuais de filito apresenta ampla variabilidade, influenciada principalmente pelas diferenças de umidade, pela orientação estrutural e pelo estágio de deformação. Considerando o conjunto total de amostras, c' variou entre 2,3 e 59 kPa, enquanto o ϕ' variou entre 16° e 33° .

De maneira geral, as amostras em condição natural mobilizaram as maiores resistências, com valores de pico mais elevados e menor perda estrutural inicial. Em contraste, os ensaios realizados após a saturação apresentaram reduções consistentes de c' e leves reduções de ϕ' , refletindo a eliminação da sucção. A redução da resistência foi mais marcada quando se consideraram simultaneamente a saturação e o avanço da deformação. Em média, a passagem da condição natural-pico para a condição embebida-pico resultou em perdas de 40% a 50% da coesão, enquanto a comparação entre natural-pico e embebida-pós-pico apresentou reduções que atingiram 60% a 75%, caracterizando o intervalo mais crítico observado. Um exemplo representativo é o da amostra AM02 do MA01, cuja coesão reduziu de 58 kPa para 15 kPa ao combinar saturação e pós-pico.

Para representar de forma integrada essa variabilidade, os pares de tensão (σ' , τ) foram submetidos a regressões lineares em faixas percentílicas. As faixas foram definidas mediante análise dos resíduos do ajuste, e os percentis foram selecionados de forma empírica, a fim de contemplar a envoltória inferior, média e superior de mobilização da resistência. A Figura 5.60 ilustra o procedimento adotado.

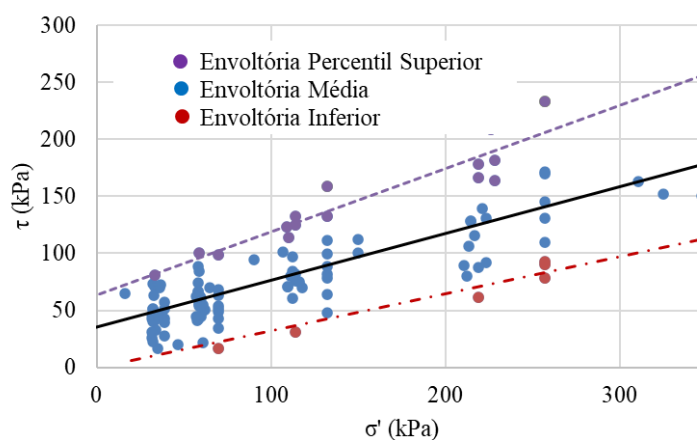


Figura 5.60 - Representação do ajuste linear por faixas percentílicas aplicado aos resultados integrados dos ensaios de cisalhamento direto.

No conjunto de ensaios Natural-pico, Figura 5.61, as regressões percentílicas foram definidas em três faixas de resistência. A envoltória inferior apresentou $c' = 14$ kPa e $\phi' = 23^\circ$, enquanto a envoltória média resultou em $c' = 40$ kPa e $\phi' = 26^\circ$. A envoltória superior atingiu $c' = 60$ kPa e $\phi' = 33^\circ$, associada a maiores sucções iniciais e menor grau de saturação.

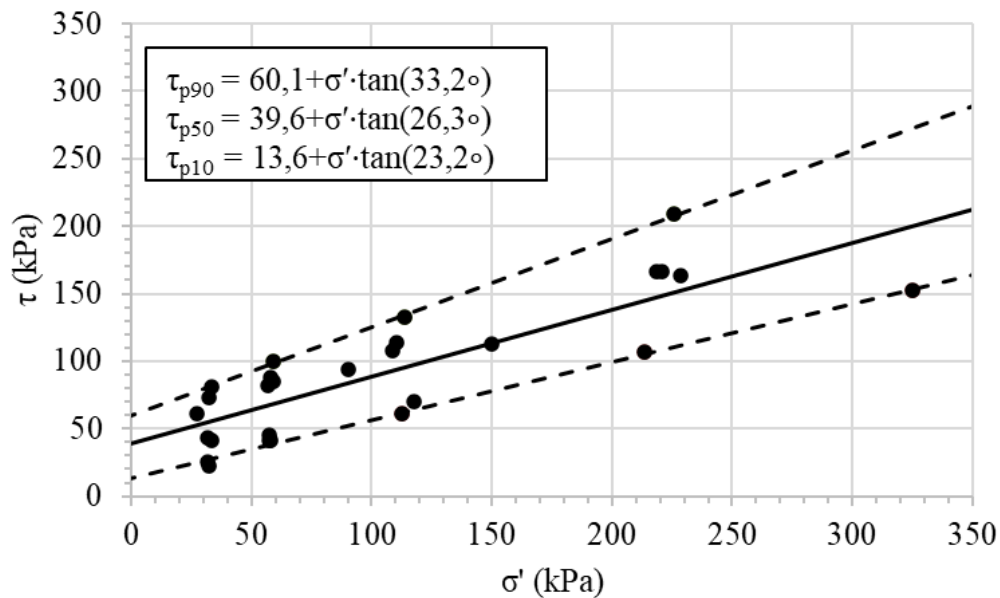


Figura 5.61 - Envoltórias de resistência obtidas para as amostras em condição natural-pico, apresentadas para os percentis 10%, 50% e 90%.

Na condição embebida-pico, Figura 5.62, observou-se redução coerente da resistência devido à eliminação da sucção. A envoltória inferior apresentou $c' = 0$ kPa e $\phi' = 18,6^\circ$, a envoltória média $c' = 29$ kPa e $\phi' = 25^\circ$, e a superior $c' = 54$ kPa e $\phi' = 29^\circ$. Embora algumas amostras ainda mobilizem resistências elevadas, as envoltórias de resistência deslocam-se para patamares inferiores ao elevar o grau de saturação.

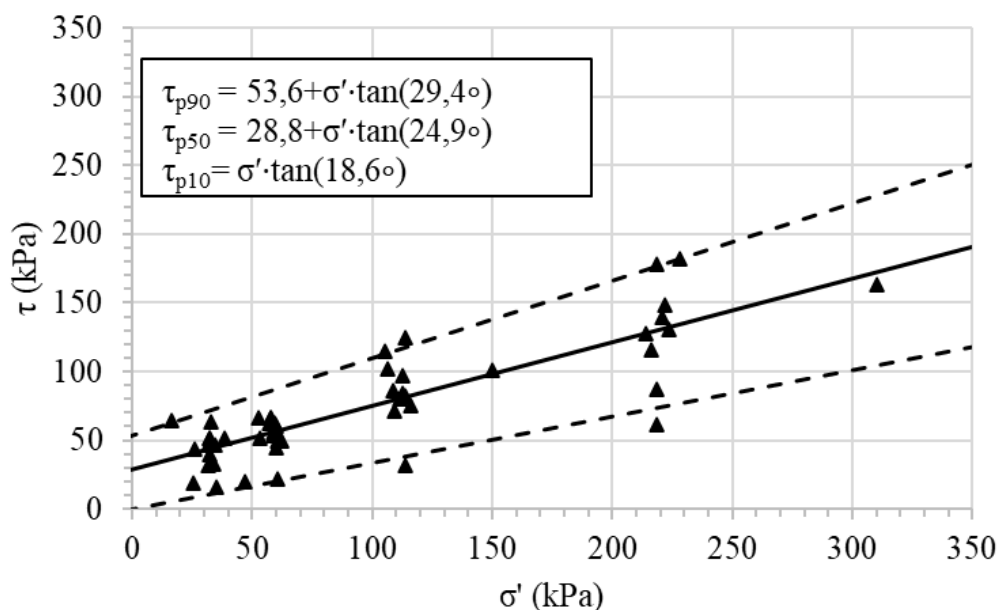


Figura 5.62 - Envoltórias de resistência obtidas para as amostras em condição embebida-pico, apresentadas para os percentis 10%, 50% e 90%.

A regressão global, Figura 5.63, reunindo todas as condições de umidade e estágios de deformação, apresentou uma envoltória inferior com $\phi' = 18,4^\circ$ e intercepto coesivo nulo. A envoltória média resultou em $c' = 33$ kPa e $\phi' = 23,6^\circ$, enquanto a superior apresentou $c' = 66$ kPa e $\phi' = 29^\circ$, sintetizando a amplitude completa de variação resistente observada no conjunto.

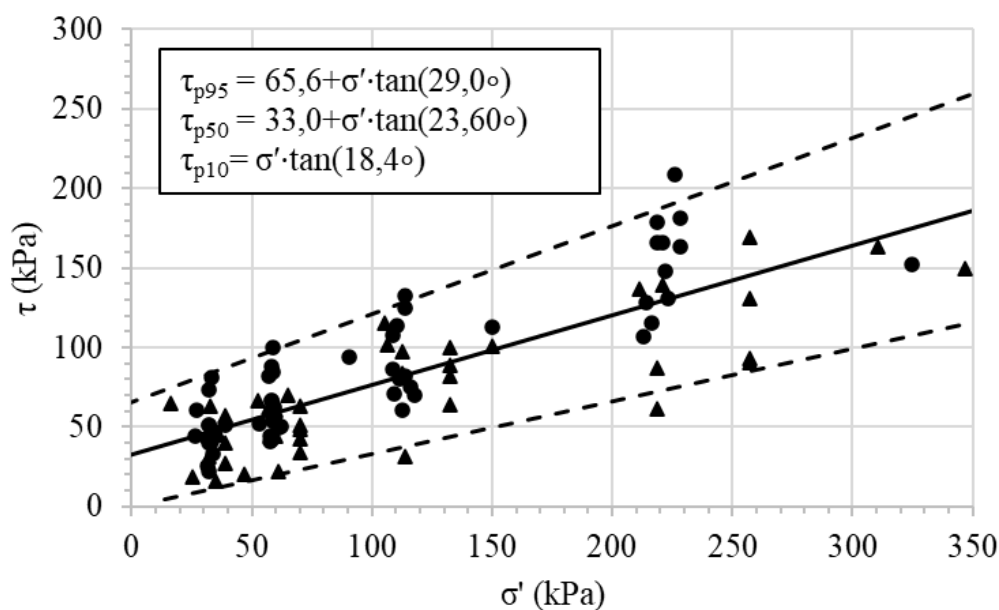


Figura 5.63 - Envoltórias de resistência obtidas para o conjunto global de amostras, apresentadas para os percentis 5%, 50% e 95%.

A definição de envoltórias de resistência para solos residuais de filito deve considerar a variabilidade inerente do material, influenciada por fatores estruturais, hidrogeológicos e ambientais. O grau de saturação *in situ* não é uniforme e pode variar tanto pela sazonalidade da precipitação quanto por intervenções antrópicas que alteram o regime hidráulico local, como observado no MA01. Os resultados obtidos mostram que diferenças de umidade, estrutura e grau de alteração produzem ampla variação da resistência ao cisalhamento. Além disso, pequenos deslocamentos já são suficientes para provocar quedas expressivas nas envoltórias de resistência.

A Tabela 5.5 apresenta os intervalos mínimos e máximos dos parâmetros de resistência reportados na literatura especializada para solos residuais de filito no Quadrilátero Ferrífero. A Figura 5.64 complementa essa análise ao representar esses intervalos por meio de barras em vermelho para a condição natural e em azul para a condição embebida, sobre as quais foram inseridos marcadores correspondentes aos limites inferiores p_{10} , média e superior p_{90} das envoltórias obtidas. Observa-se que os intervalos descritos na literatura costumam apresentar valores de coesão superiores aos verificados experimentalmente neste trabalho. Essa diferença pode ser parcialmente explicada pelo fato de alguns autores terem realizado ensaios com a foliação orientada de forma perpendicular ao plano de cisalhamento, situação que, como já discutido, tende a gerar valores superestimados de resistência devido à menor ativação dos planos de fraqueza.

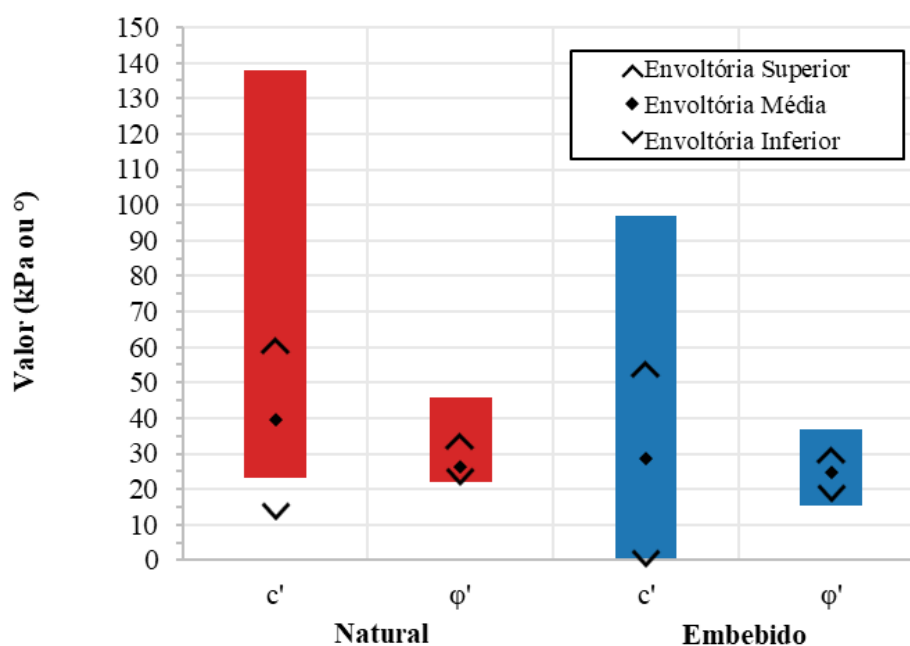


Figura 5.64 - Intervalos da literatura para c' e ϕ' nas condições natural (barras vermelhas) e embebida (barras azuis), com indicação das envoltórias inferior (p_{10}), média (p_{50}) e superior (p_{90}) obtidas por regressão linear.

Tabela 5.5 - Intervalos da literatura e limites obtidos por regressão linear para c' e ϕ' de solos residuais de filito do Quadrilátero Ferrífero.

Parâmetro	Valores Reportados na Literatura				Regressão Linear com Percentis (P_{10} , P_{50} e P_{90})					
	Natural Pico		Embebido		Natural Pico			Embebido		
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Inferior	Média	Superior	Inferior	Média	Superior
c' (kPa)	23	138	0	97	13,6	39,6	60,1	13,6	39,6	60,1
ϕ' (°)	22,1	46	15,4	37	23,2	26,3	33,2	23,2	26,3	33,2

No contexto estrutural dos solos residuais de filito, o cisalhamento direto paralelo à foliação representa o cenário mais crítico para a estabilidade. Nessa condição, as solicitações atuam de forma aproximadamente paralela ao arranjo lamelar, e o plano imposto pelo ensaio coincide com a orientação dos planos de fraqueza que, em taludes reais, podem cortar toda a extensão do maciço, desde a crista até o pé do talude. Assim, quando a foliação está alinhada ao plano de ruptura imposto, o cisalhamento direto reproduz a situação estrutural que tende a mobilizar as menores resistências ao cisalhamento.

5.4 - ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

Os ensaios de compressão triaxial foram realizados em corpos de prova (CP) cilíndricos com 47 mm de diâmetro e altura de cerca de 100 mm. As amostras referem-se a solos residuais de filito de cores laranja e cinza coletados no MA05 de cor marrom do MA01 (Gomes, 2021).

5.4.1 - SOLO RESIDUAL DE FILITO COR LARANJA (MA05)

Foram ensaiados 7 CPs sob as tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, sendo 3 ensaios do tipo CID (adensado drenado) e 4 ensaios do tipo CIU (adensado não drenado). Durante um dos ensaios do tipo CIU, a prensa triaxial acabou avançando além dos 20% de deformação específica, destruindo um dos CPs. Apesar disso, os dados do ensaio até essa deformação puderam ser aproveitados. A Figura 5.65 apresenta os corpos de prova cisalhados no ensaio de compressão triaxial realizado no solo residual de filito de cor laranja.



Figura 5.65 - Corpos de prova cisalhados (solo residual de filito/laranja).

A Figura 5.66 apresenta as curvas de tensão desvio (σ_d) em função da deformação axial específica (ϵ_a). As curvas deformação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial específica (ϵ_a) são apresentadas na Figura 5.67. As envoltórias das trajetórias de tensões obtidas são apresentadas na Figura 5.68.

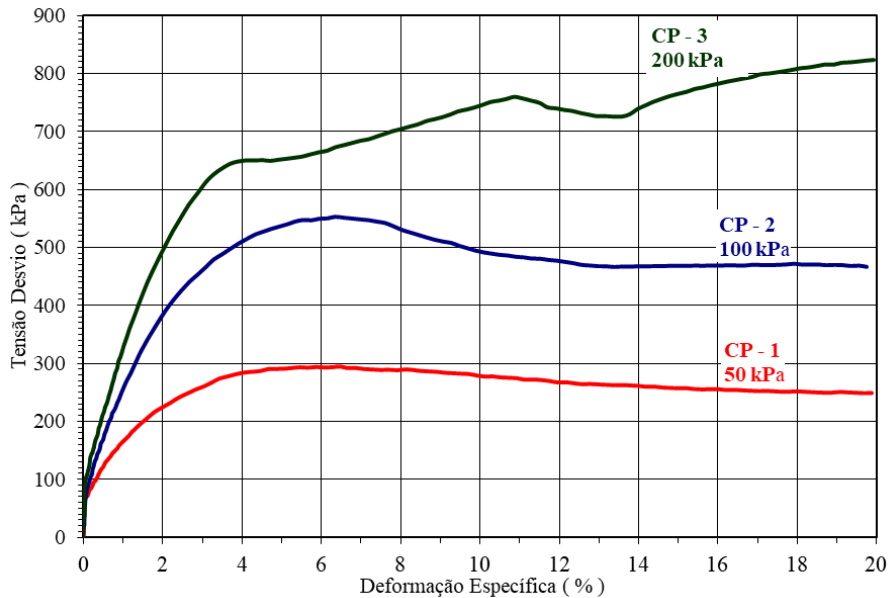


Figura 5.66 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Laranja: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a).

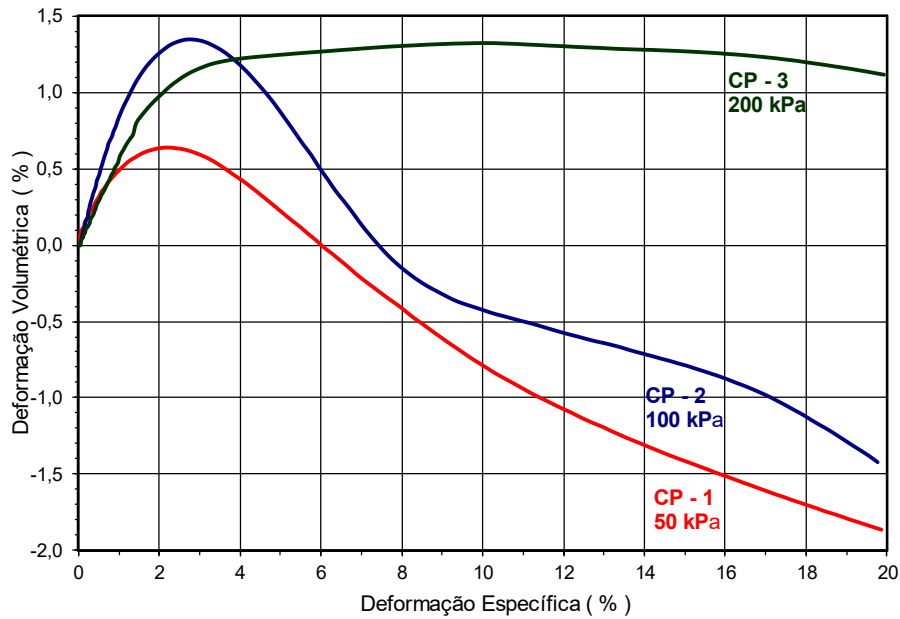


Figura 5.67 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Laranja: deformação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial específica (ϵ_a).

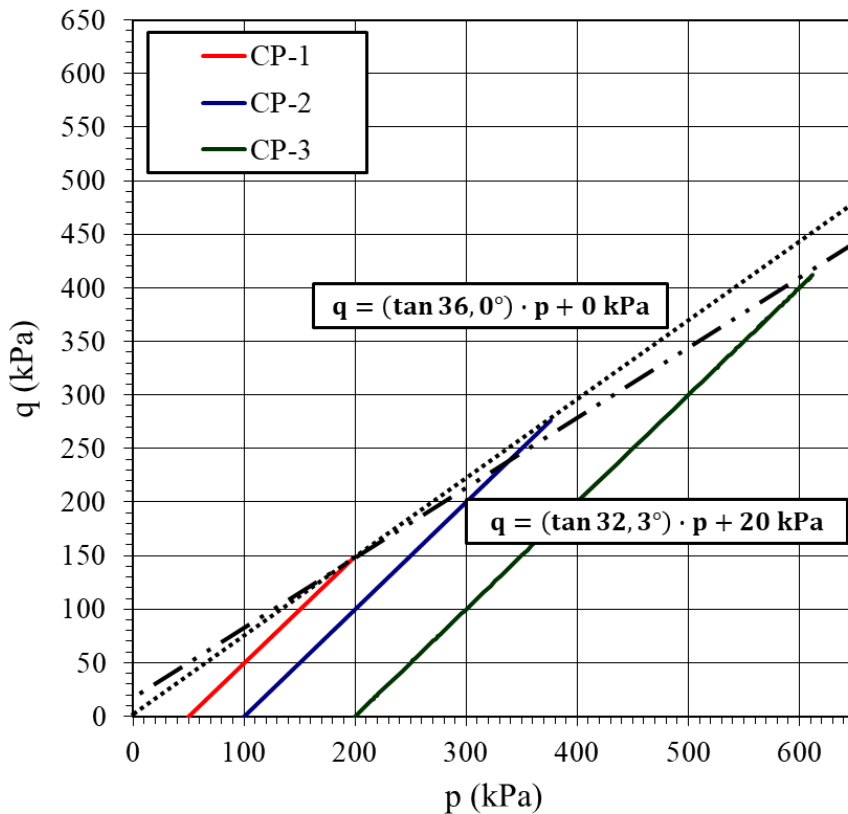


Figura 5.68 - Ensaio CID - Solo Residual de Filito/Laranja: Envoltórias das trajetórias de tensões.

Os ensaios de compressão triaxial CIU foram conduzidos em quatro corpos de prova, sob tensões confinantes (σ_c) de 50 kPa (CP-1), 100 kPa (CP-2) e 200 kPa (CP-3 e CP-4). A

Figura 5.69 apresenta os resultados obtidos, apresentando as curvas de tensão desvio (σ_d) em função da deformação axial específica (ϵ_a). As curvas poro pressão (u) versus deformação axial específica (ϵ_a), σ_1/σ_3 versus deformação axial específica (ϵ_a) e parâmetro A versus deformação axial específica (ϵ_a) são apresentadas na Figura 5.70 a Figura 5.72.

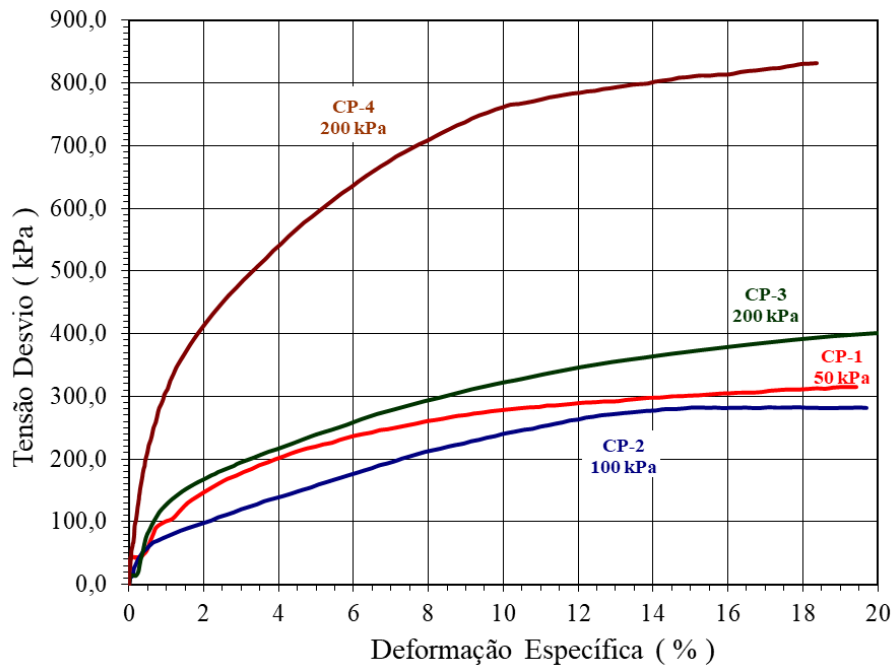


Figura 5.69 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Laranja: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a).

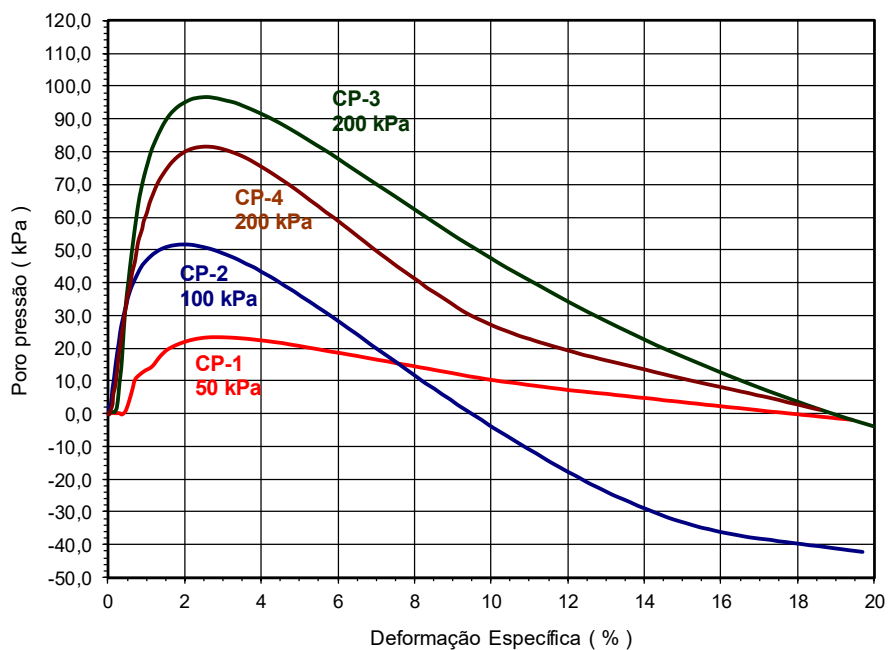


Figura 5.70 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Laranja: poro pressão (u) versus deformação axial específica (ϵ_a).

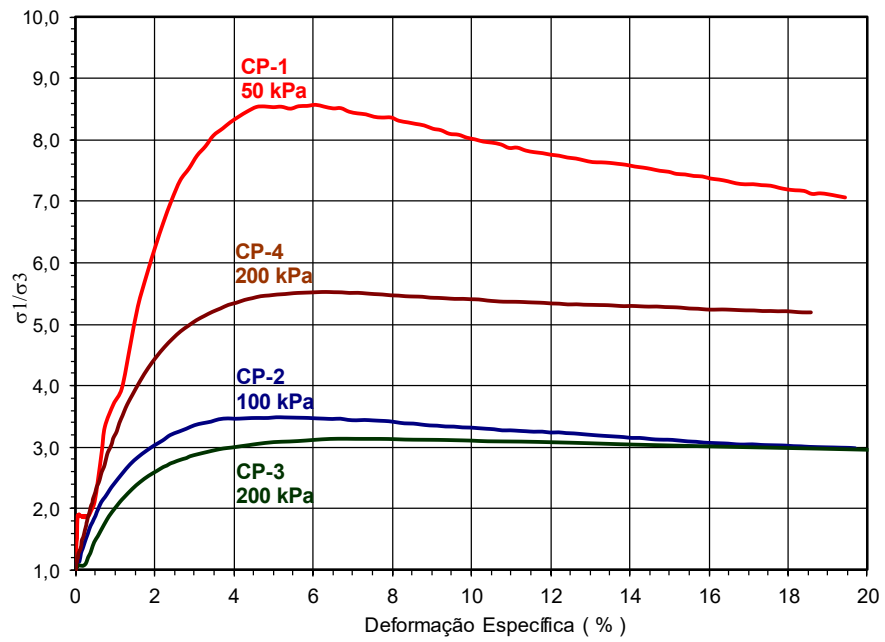


Figura 5.71 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Laranja: σ_1/σ_3 versus deformação axial específica (ϵ_a).

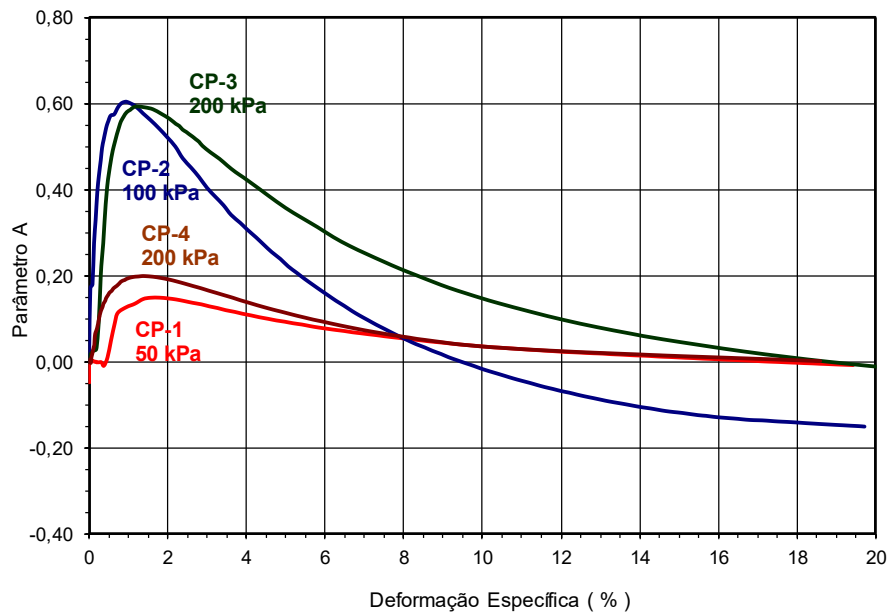


Figura 5.72 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Laranja: parâmetro A versus deformação axial específica (ϵ_a).

Nos ensaios CID as rupturas dos CP ocorreram até 8% de deformação específica. Por outro lado, nos ensaios CIU não houve pico de tensões e as deformações para atingir a ruptura foram maiores da ordem de 14% (Figura 5.69). A heterogeneidade e anisotropia do material é evidenciada pelas tensões de confinamento de 50 kPa e 100 kPa atingirem o mesmo patamar de tensão desvio. As envoltórias das trajetórias de tensões obtidas a partir dos resultados dos ensaios CIU são apresentadas na Figura 5.73.

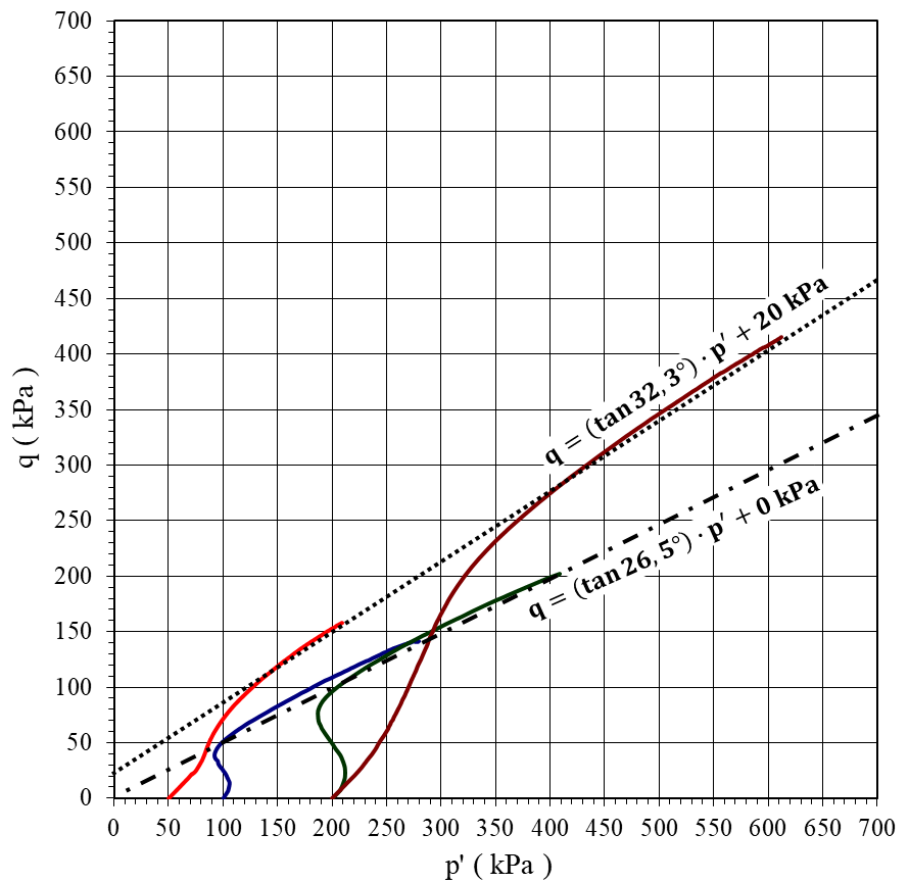


Figura 5.73 - Ensaio CIU: Envoltórias das trajetórias de tensões.

A partir da equação das envoltórias das trajetórias de tensões ($q = p' \cdot \tan\beta + d$), pode-se determinar os parâmetros de resistência da envoltória de Mohr-Coulomb, intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito (φ):

$$\text{sen } \varphi = \tan \beta \quad c = \frac{d}{\cos \varphi}$$

Aplicando as equações, pode-se definir os parâmetros de resistência, Tabela 5.6, apresentados em valores inteiros. A dispersibilidade dos materiais levou à elaboração de duas envoltórias de resistência para cada tipo de ensaio, com o intuito de melhor representar o

comportamento observado. No ensaio CID, uma das envoltórias apresentou ϕ' igual a $39,2^\circ$ e c' igual a 25,8 kPa, enquanto a outra envoltória possível apresentou ϕ' igual a $46,6^\circ$ e c' nulo. Já no ensaio CIU, as duas envoltórias possíveis de serem obtidas apresentaram valores de ângulo de atrito e coesão respectivamente: ϕ' igual a $39,2^\circ$ e c' igual a 25,8 kPa, enquanto a outra envoltória apresentou ϕ' igual a $29,9^\circ$ e c' nula.

Tabela 5.6 - Parâmetros de Resistência obtidos esnaios triaxial CID e CIU (Laranja).

Ensaio Triaxial	Envoltória de Resistência	c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)
CID	E-1	0	47
CID	E-2	26	39
CIU	E-3	0	30
CIU	E-4	26	39

5.4.2 - SOLO RESIDUAL DE FILITO/CINZA (MA05)

Foram ensaiados 9 CPs sob as tensões confinantes de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa, sendo 5 ensaios do tipo CID (adensado drenado) e 4 ensaios do tipo CIU (adensado não drenado). A Figura 5.74 apresenta os corpos de prova cisalhados no ensaio de compressão triaxial realizado no solo residual de filito de cor cinza.



Figura 5.74 - Corpos de prova cisalhados (solo residual de filito/cinza).

A Figura 5.75 apresenta as curvas de tensão desvio (σ_d) em função da deformação axial específica (ϵ_a). As curvas deformação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial específica (ϵ_a) são apresentadas na Figura 5.76. As envoltórias das trajetórias de tensões obtidas são apresentadas na Figura 5.77.

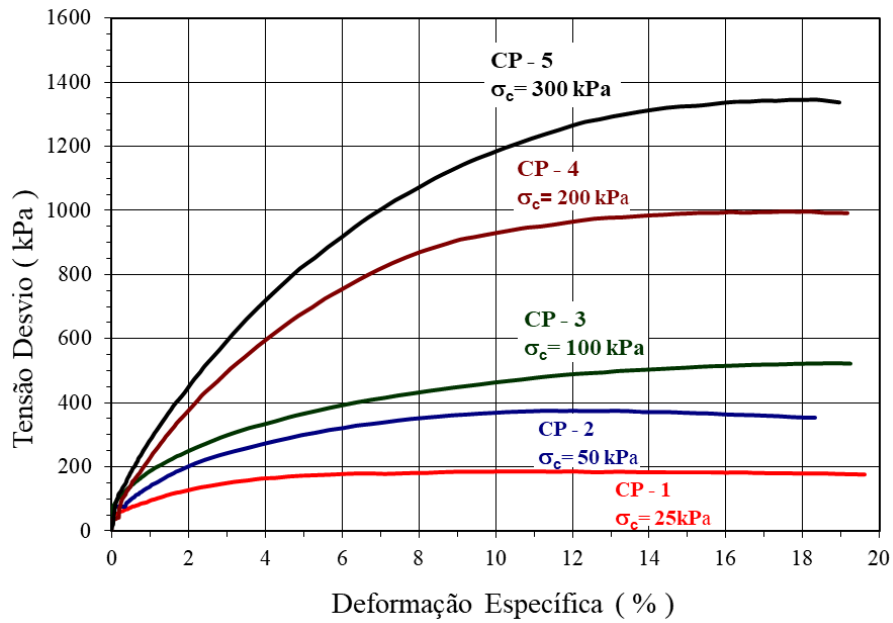


Figura 5.75 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Cinza: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a).

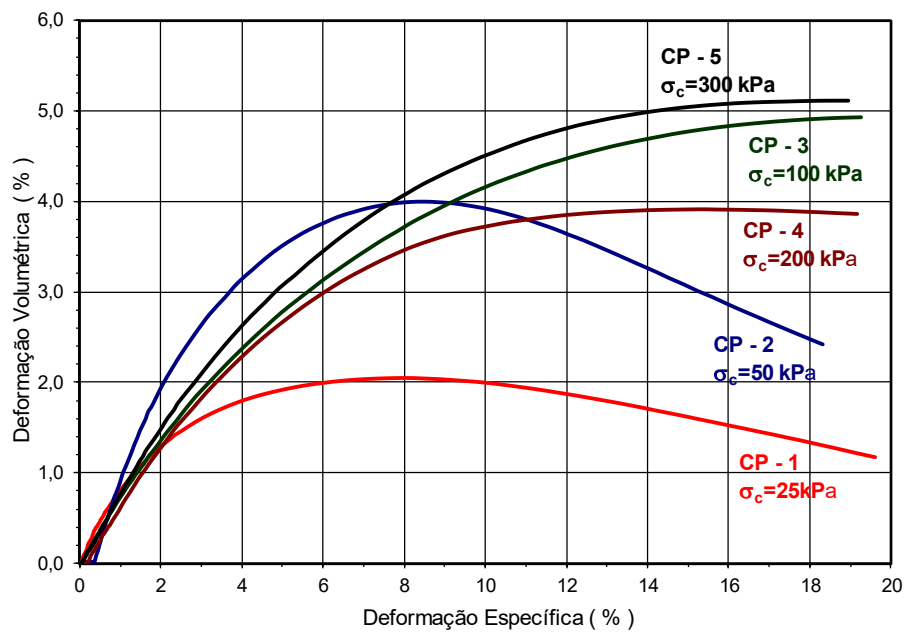


Figura 5.76 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Cinza: deformação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial específica (ϵ_a).

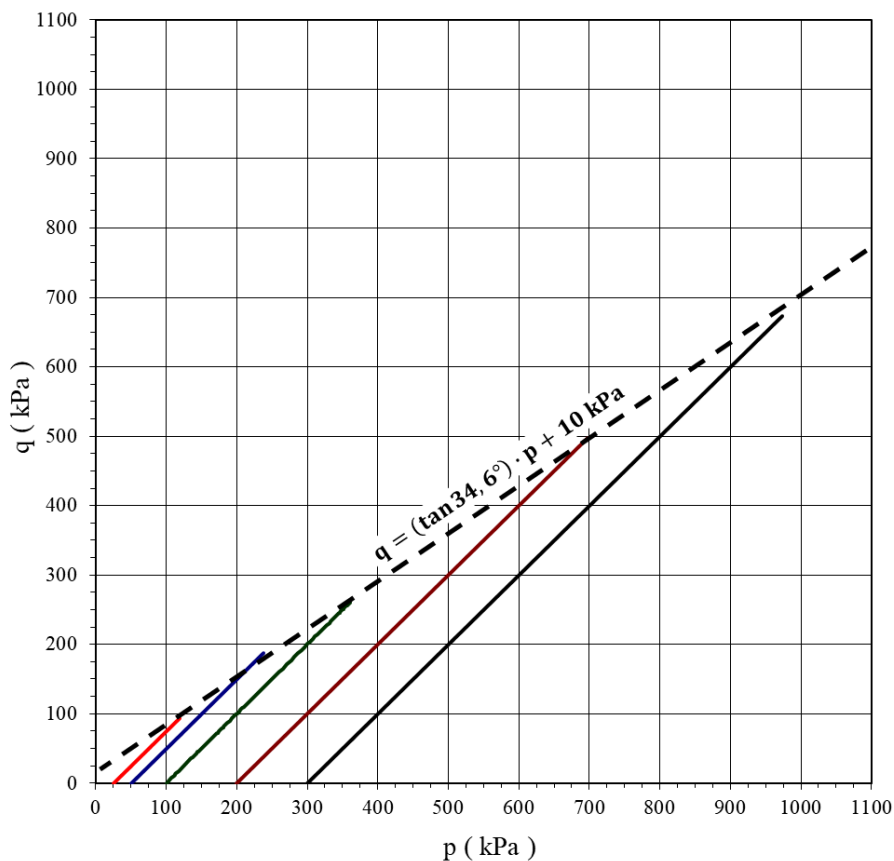


Figura 5.77 - Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Cinza: Envoltórias das trajetórias de tensões.

Os ensaios de compressão triaxial CIU foram conduzidos em quatro corpos de prova, sob tensões confinantes (σ_c) de 25 kPa (CP-1), 50 kPa (CP-2), 100 kPa (CP-3) e 200 kPa (CP-4). A Figura 5.78 apresenta os resultados obtidos, apresentando as curvas de tensão desvio (σ_d) em função da deformação axial específica (ϵ_a). As curvas poro pressão (u) versus deformação axial específica (ϵ_a), σ_1/σ_3 versus deformação axial específica (ϵ_a) e parâmetro A versus deformação axial específica (ϵ_a) são apresentadas na Figura 5.79 a Figura 5.81.

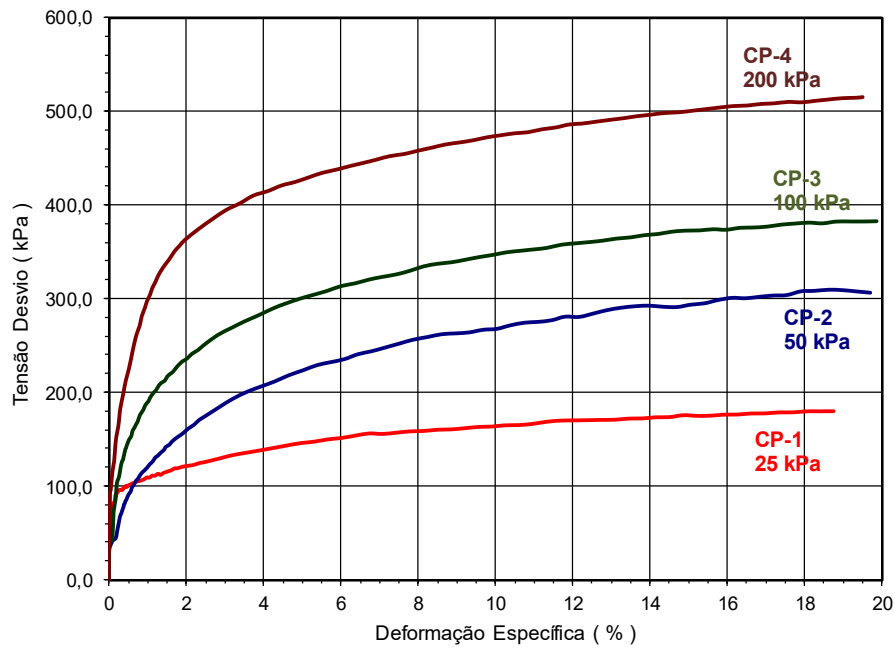


Figura 5.78 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a).

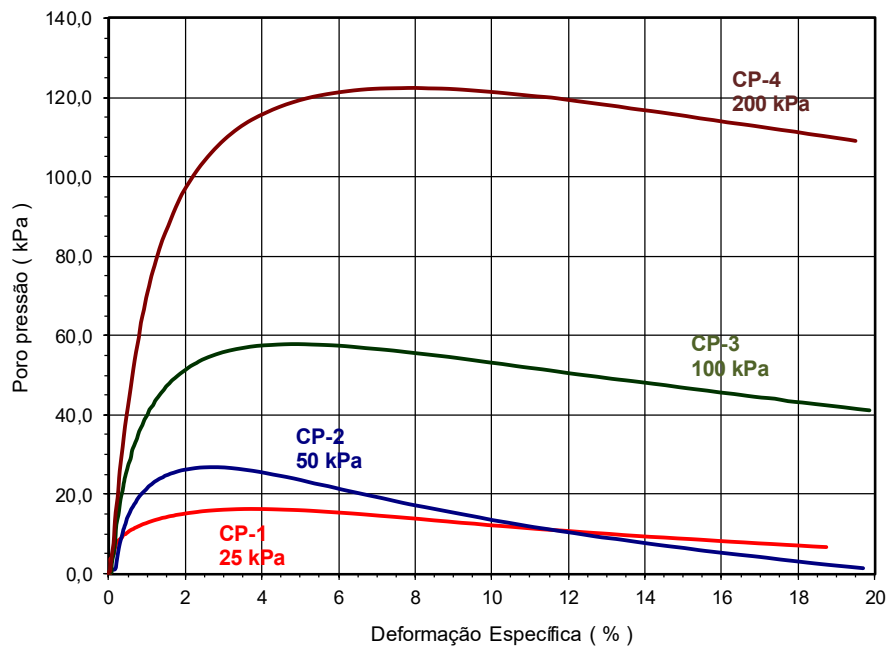


Figura 5.79 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: poro pressão (u) versus deformação axial específica (ϵ_a).

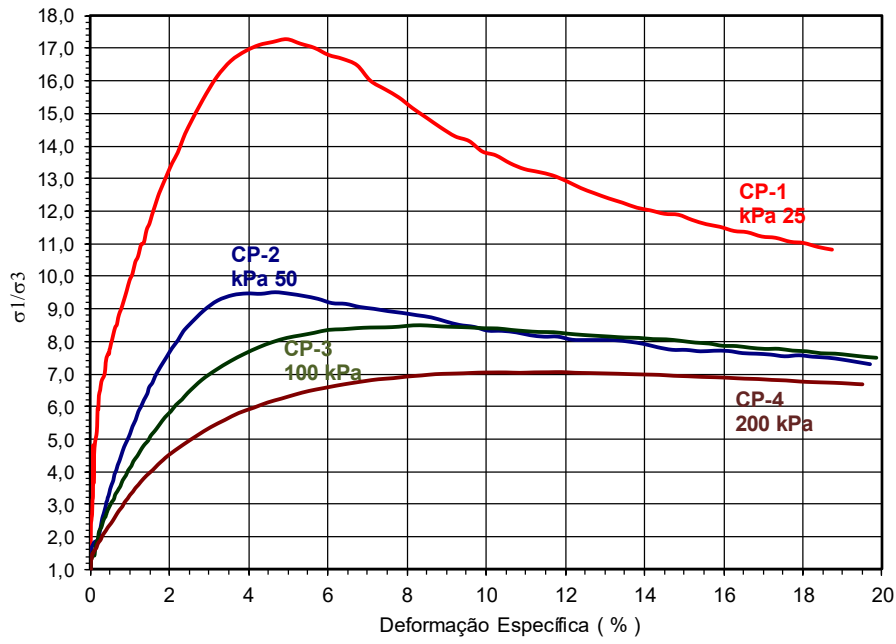


Figura 5.80 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: σ_1/σ_3 versus deformação axial específica (ϵ_a).

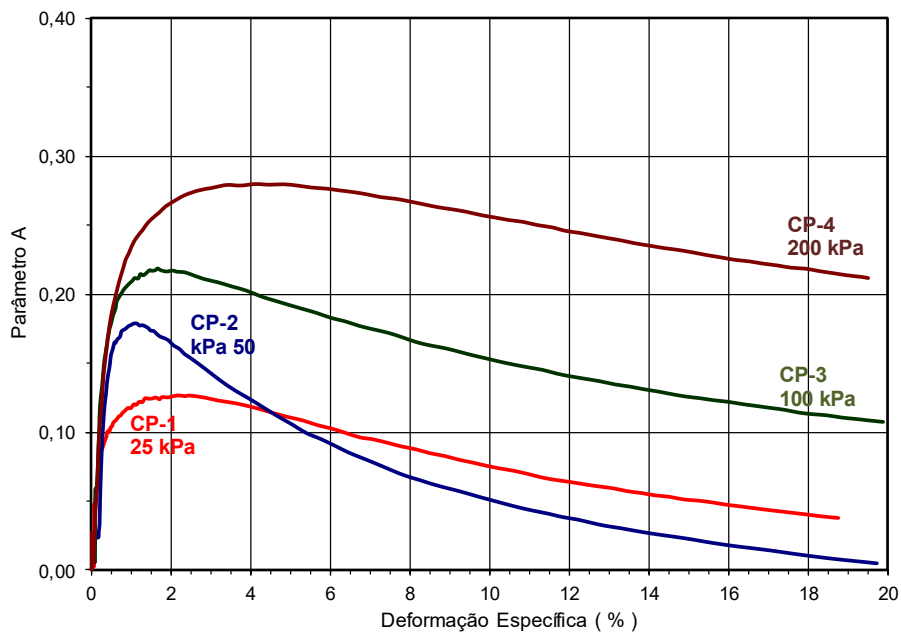


Figura 5.81 - Ensaio triaxial não drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: parâmetro A versus deformação axial específica (ϵ_a).

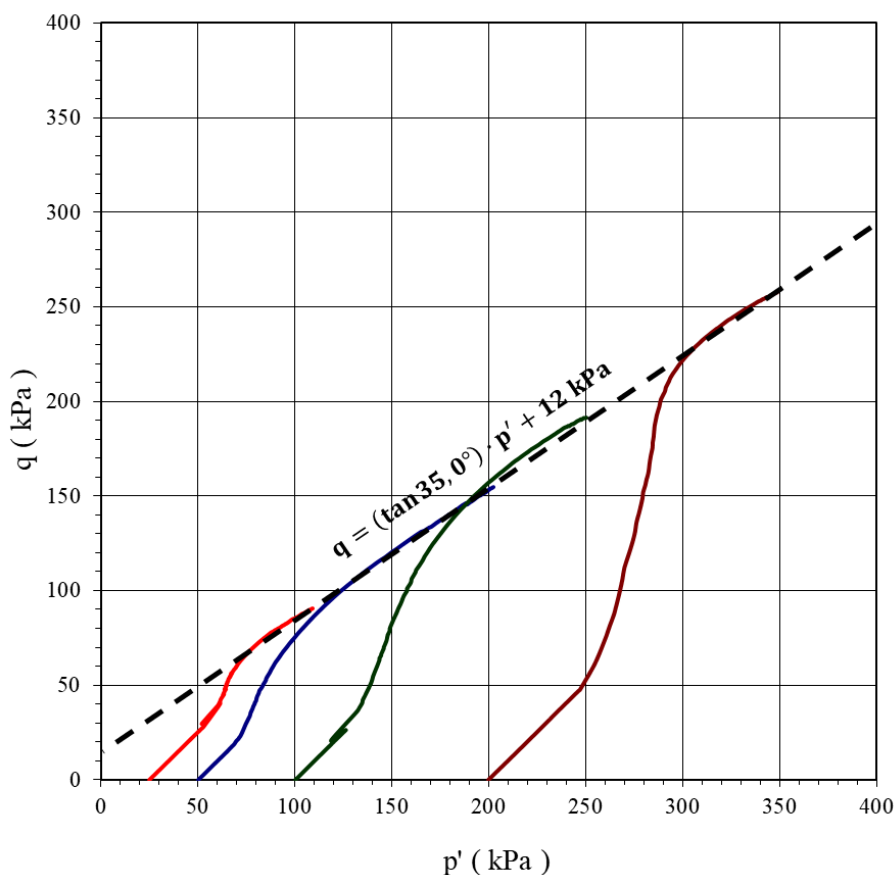


Figura 5.82 - Ensaio triaxial drenado (CIU) - Solo Residual de Filito/Cinza: Envoltórias das trajetórias de tensões.

Os resultados obtidos para o solo residual de Filito Cinza apresentaram menor dispersão que os de solo residual de Filito Laranja, o que permitiu a definição de uma envoltória de resistência para cada ensaio. De forma análoga aos procedimentos adotados no 5.4.1 -, foi possível determinar os parâmetros de resistência (Tabela 5.7), apresentados em valores inteiros. Assim, o ensaio CID resultou em ϕ' igual a $43,6^\circ$ e c' igual a $13,8$ kPa, enquanto o ensaio CIU apresentou ϕ' igual a $44,4^\circ$ e c' igual a $16,8$ kPa.

Tabela 5.7 - Parâmetros de Resistência obtidos ensaios triaxial CID e CIU (Cinza).

Ensaio Triaxial	Envoltória de Resistência	c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)
CID	E-5	14	44
CIU	E-6	17	44

Os parâmetros encontrados nos ensaios CIU foram maiores do que as faixas de valores trabalhadas por Silva (2006) e Soares (2008) ao estudarem filitos dolomíticos na região do Quadrilátero Ferrífero. Esta variação é mais visível no valor dos ângulos de atrito, visto que o

intercepto coesivo está contido dentro dos limites trabalhados pelos autores, apesar de que Silva (2006) não obteve intercepto coesivo nulo.

5.4.3 - SOLO RESIDUAL DE FILITO MARRON (MA01)

Os resultados apresentados nesta subseção foram obtidos por Gomes (2021), que realizou o ensaio de compressão triaxial do tipo CID utilizando o solo residual jovem de filito de coloração marrom, coletado no maciço MA01 em 2020 (SRJF 2020). A Figura 5.83 apresenta as trajetórias de tensões efetivas obtidas no ensaio em função das diferentes tensões de confinamento aplicadas, enquanto a Figura 5.84 mostra a relação entre a deformação axial e a tensão de desvio ao longo da etapa de carregamento. A Figura 5.85 apresenta a envoltória de resistência obtida no ensaio de compressão triaxial drenado.

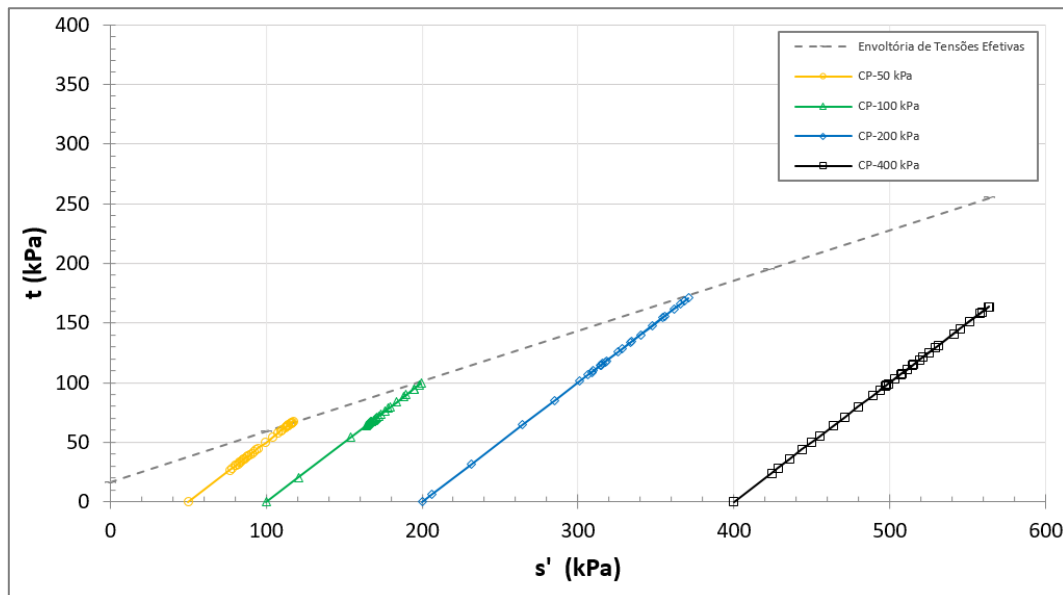


Figura 5.83 – Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Marron: Trajetória de tensões efetivas (Fonte: Gomes, 2021).

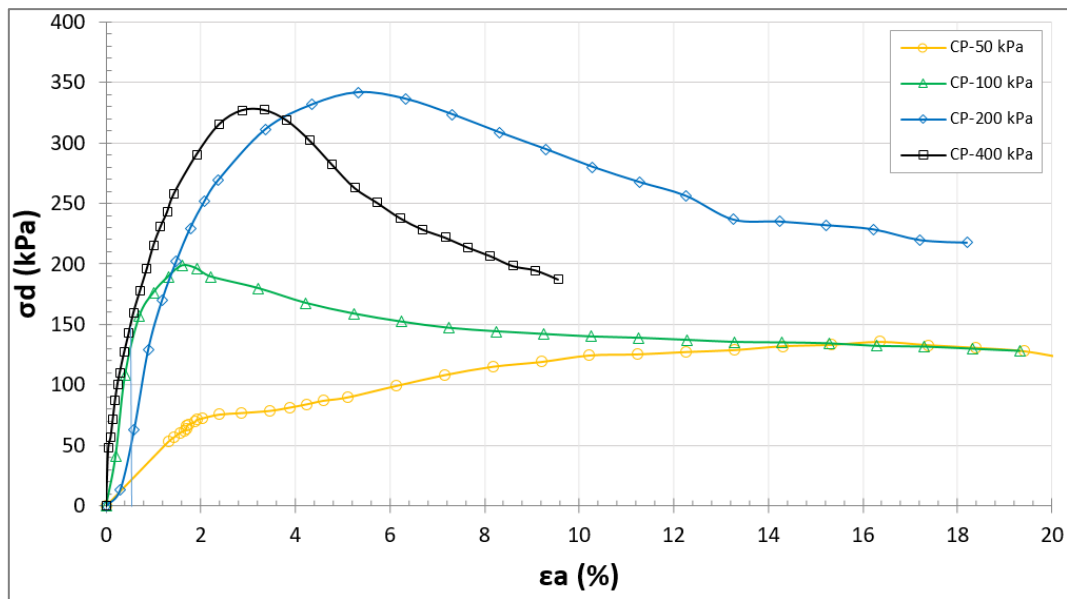


Figura 5.84 – Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Marrom: tensão desvio (σ_d) versus deformação axial específica (ϵ_a) (Fonte: Gomes, 2021).

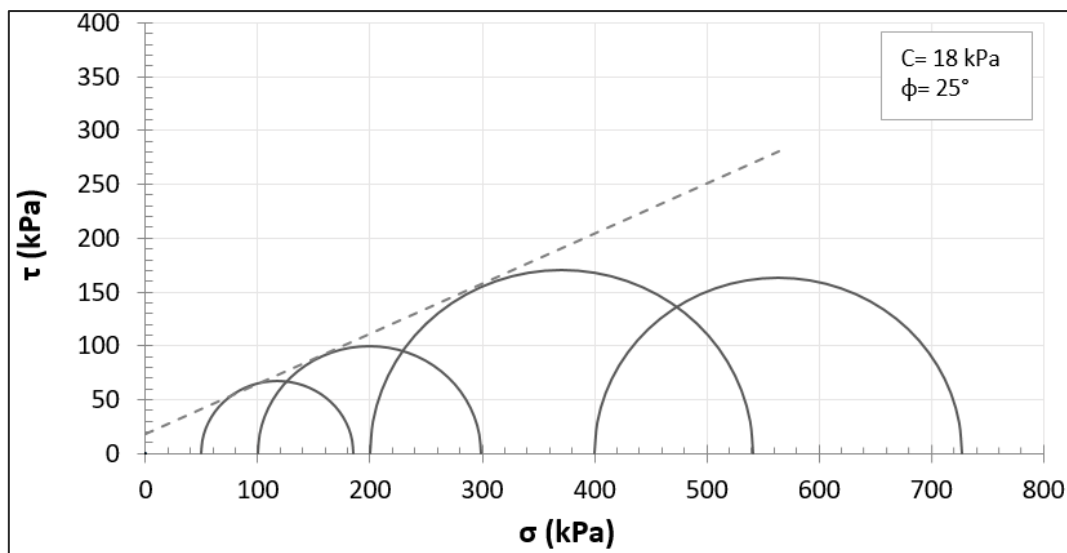


Figura 5.85 – Ensaio triaxial drenado (CID) - Solo Residual de Filito/Marrom: Envoltórias das trajetórias de tensões (Fonte: Gomes, 2021).

O corpo de prova consolidado a 400 kPa apresentou resistência ao cisalhamento inferior à do ensaio realizado com 200 kPa, mesmo estando submetido à maior tensão confinante na fase de consolidação. Por se distanciar do comportamento observado nos demais ensaios, esse resultado não foi considerado na definição da envoltória de resistência. Em solos estruturados, a presença de planos preferenciais de cisalhamento faz com que a variação do estado de tensões nem sempre seja o fator predominante; muitas vezes, o que controla a resistência mobilizada é a relação entre o carregamento aplicado e a orientação dessas foliações.

A Figura 5.86 apresenta os corpos de prova após a aplicação da tensão de desvio na última fase do ensaio. Observa-se que as superfícies de ruptura desenvolvidas possuem forte

relação com as feições estruturais do solo, especialmente com a orientação das foliações. No corpo de prova consolidado a 400 kPa, identifica-se um padrão distinto dos demais, pois a ruptura ocorreu na porção inferior do corpo de prova, reforçando que o cisalhamento tende a se concentrar em planos específicos condicionados pela estrutura do filito. A Tabela 5.8 apresenta o resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios de compressão triaxial – CID para o solo residual de filito marrom (MA01).

Tabela 5.8 – Parâmetros de Resistência obtidos esnaos triaxial CID (Marrom)

Material	Ensaio Inundado	
	c (kPa)	ϕ (°)
Solo residual de filito marrom (MA01)	18	25

Considerando as características do material, o filito apresenta textura essencialmente siltosa e possui planos de foliação e descontinuidades com superfícies lisas. A Figura 5.87 apresenta a superfície de ruptura típica do solo residual de filito, na qual os planos de fraqueza que controlam o cisalhamento são formados, em geral, por uma fina camada de material de textura sedosa e bastante escorregadia. Gomes (2021) ressalta que essas características favorecem a mobilização da resistência residual em deslocamentos maiores e explicam a formação de superfícies espelhadas (*slickensided*), resultantes do alinhamento de partículas finas durante o cisalhamento, condição especialmente evidente nas partículas lamelares das argilas.



Figura 5.86 – Corpos de prova após ruptura no ensaio de compressão triaxial (Fonte: Gomes, 2021).



Figura 5.87 – Superfície de ruptura do corpo de prova (Fonte: Gomes, 2021).

5.4.4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS

Os resultados obtidos nos ensaios triaxiais demonstram que a resistência mobilizada nos solos residuais de filito é controlada por uma combinação entre a resistência da matriz e a influência da estrutura reliquiar herdada da rocha matriz. No solo laranja e no solo marrom, a heterogeneidade estrutural resultou em múltiplas envoltórias possíveis, refletindo a atuação simultânea de mecanismos estruturais e da matriz de solo. No solo cinza, mais intemperizado, predominou o controle da matriz do solo, fornecendo resultados mais homogêneos nos ensaios CID e CIU.

O ensaio triaxial, em solos residuais de filito, representa um cenário intermediário entre a mobilização direta da resistência estrutural do plano reliquiar e a resistência da matriz do solo. Como o plano de ruptura não é imposto, a superfície cisalhante se desenvolve em uma inclinação controlada pelo estado de tensões aplicado, que pode ser aproximada por $\theta = 45^\circ + \varphi'/2$ segundo o critério de Mohr-Coulomb. É importante destacar que esse φ' corresponde ao

atrito efetivo da amostra como um todo, e não ao ângulo de atrito de um plano de foliação específico. Assim, quando a foliação apresenta ângulo muito inferior ao plano crítico de ruptura θ , sua orientação não coincide com a direção preferencial de cisalhamento, fazendo com que ela não seja mobilizada no ensaio. Nessa condição, a foliação mais frágil não é integralmente solicitada, seja pela orientação favorável em relação a σ_1 , seja pela restrição imposta pelo confinamento de σ_3 . Nessas situações, o triaxial tende a refletir predominantemente a resistência da matriz de solo, resultando em valores superiores aos obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, embora ainda possa preservar parcialmente a influência estrutural quando a foliação se aproxima da direção de ruptura natural.

Neste trabalho, os ensaios triaxiais dos solos residuais de filito do MA05, laranja e cinza, resultaram em valores de ϕ' predominantemente superiores a 39° , comportamento compatível com situações em que a ruptura mobiliza boa parte da resistência da matriz do solo. O solo residual de filito marrom (MA01), por sua vez, apresentou ϕ' em torno de 25° , valor semelhante ao obtido nos ensaios de cisalhamento direto, o que é coerente com seu caráter de solo residual jovem e com a maior preservação da estrutura reliquiar, que controla o cisalhamento quando sua orientação é compatível com o plano de ruptura que se desenvolve sob o estado de tensões aplicado no ensaio.

Os resultados também mostram que a dispersão observada está associada ao grau de intemperismo dos materiais. No solo residual de filito marrom, menos alterado, a estrutura reliquiar ainda é marcante e produz respostas diferentes conforme sua orientação em relação ao plano de cisalhamento que se desenvolve no ensaio. No solo residual de filito cinza, o mais intemperizado, a degradação da estrutura é mais avançada, fazendo com que a ruptura ocorra predominantemente através da matriz do solo e resultando em comportamento mais homogêneo. Já o solo residual de filito laranja, com grau de alteração intermediário, combina porções ainda estruturadas com regiões já dominadas pela matriz, o que naturalmente aumenta a variabilidade entre os corpos de prova.

Esse comportamento se reflete diretamente na interpretação de campo. Ao longo de uma mesma seção de corte, um único conjunto de foliações pode ser favorável à ruptura em um talude e neutro no talude oposto, simplesmente em função da geometria do terreno e o grau de alteração. Taludes esquerdo e direito estabelecem relações diferentes com a mesma estrutura geológica: quando a foliação mergulha para fora do talude, atua como plano preferencial para ruptura planar; quando mergulha para dentro, tende a ser estabilizada pelo próprio maciço. Assim, dois taludes de um mesmo perfil podem desenvolver mecanismos completamente distintos, mesmo compartilhando a mesma estrutura reliquiar. A Figura 5.88 apresenta um

exemplo desse comportamento na Ferrovia de Integração Centro-Oeste, em Santa Terezinha de Goiás: A Figura 5.88A mostra uma ruptura planar desenvolvida integralmente sobre uma estrutura reliquiar preservada, enquanto o talude oposto não apresentou rupturas.



Figura 5.88 - Ruptura em solo com planos reliquiares na Ferrovia de Integração Centro-Oeste, em Goiás: (A) ruptura planar associada à orientação da foliação; (B) talude oposto da mesma seção, sem registro de ruptura.

5.5 - PAPEL FILTRO

Nesta seção são apresentadas as curvas característica solo-água das amostras AM01-AM10, Figura 5.89 a Figura 5.92 determinadas pelo método do papel-filtro com papel Whatman nº 42 e calibração segundo Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992). Adotou-se o procedimento da ASTM D5298-22, mantendo as montagens seladas por sete dias a 25 °C até o equilíbrio. Os dados experimentais foram ajustados à equação de Fredlund e Xing (1994).

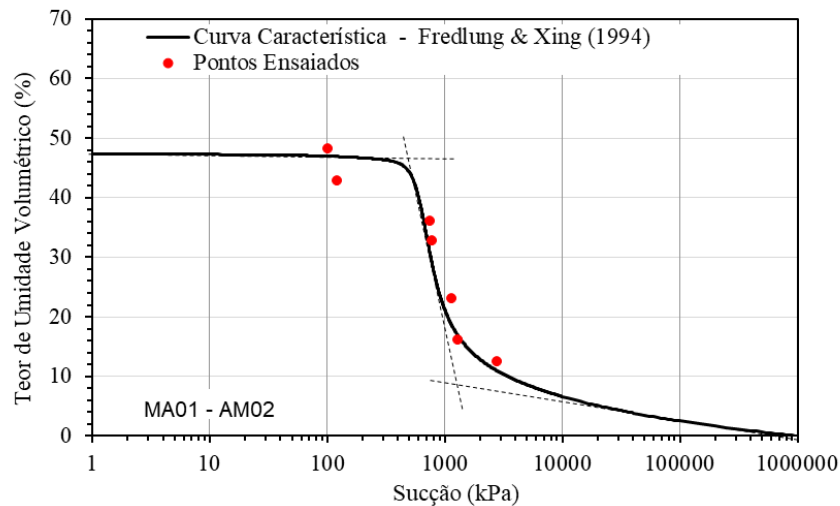
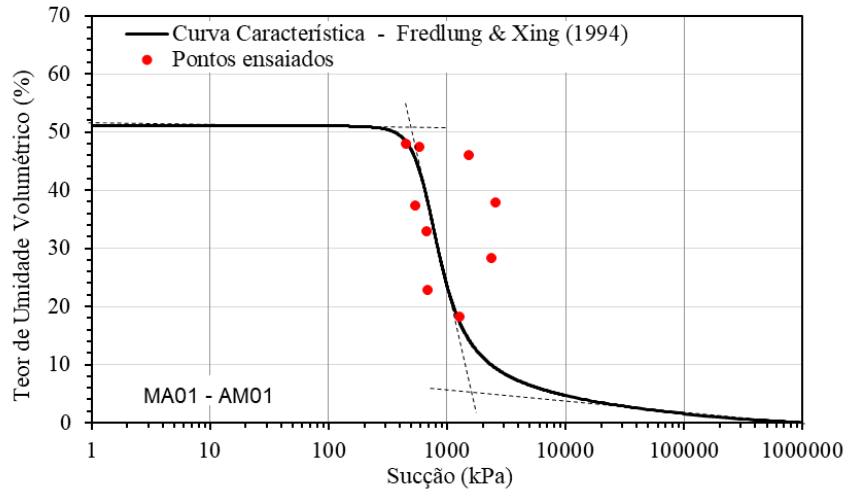


Figura 5.89 - MA01: Sucção vs. Teor de Umidade.

A Figura 5.89 apresenta as curvas características solo-água das amostras AM01 e AM02. Em ambas as curvas se observa que os teores de umidade volumétrica se mantêm elevados até aproximadamente 500 kPa de sucção, indicando o regime saturado. A partir desse ponto, há uma redução expressiva da umidade com o aumento da sucção, marcando a transição para o regime não saturado. Essa inflexão ocorre em torno de 50% para a AM01 (Figura 5.89a) e 49% para a AM02 (Figura 5.89b), sendo interpretada como o valor de entrada de ar nos macroporos do solo.

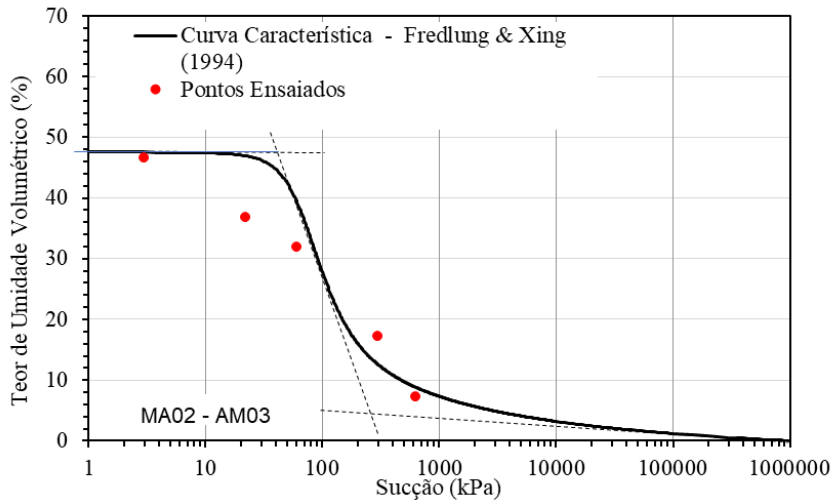
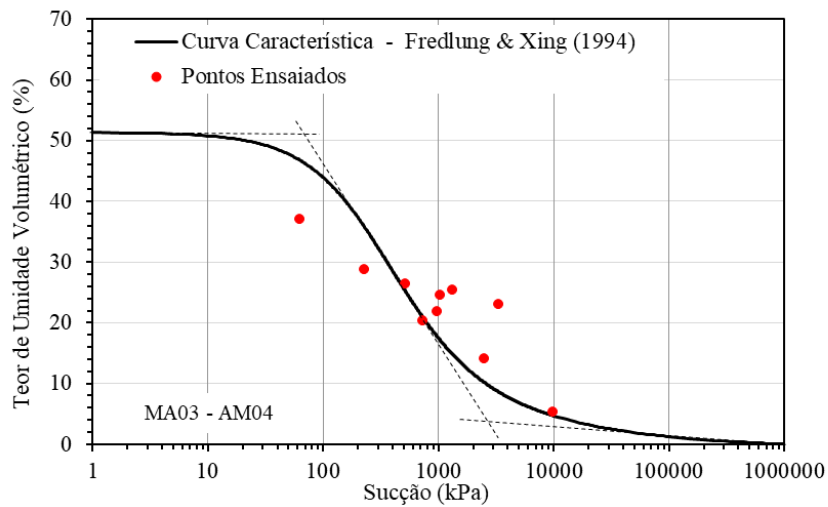


Figura 5.90 - MA02: Sucção vs. Teor de Umidade.

A Figura 5.90 apresenta a curva característica da amostra AM03. Observa-se que o teor de umidade volumétrica permanece constante, próximo de 46%, para sucções abaixo de aproximadamente 40 kPa, indicando condição de saturação. A partir desse ponto, a elevação da sucção provoca uma redução moderada da umidade, que se intensifica entre 30% e 20%, caracterizando a transição para o regime não saturado.



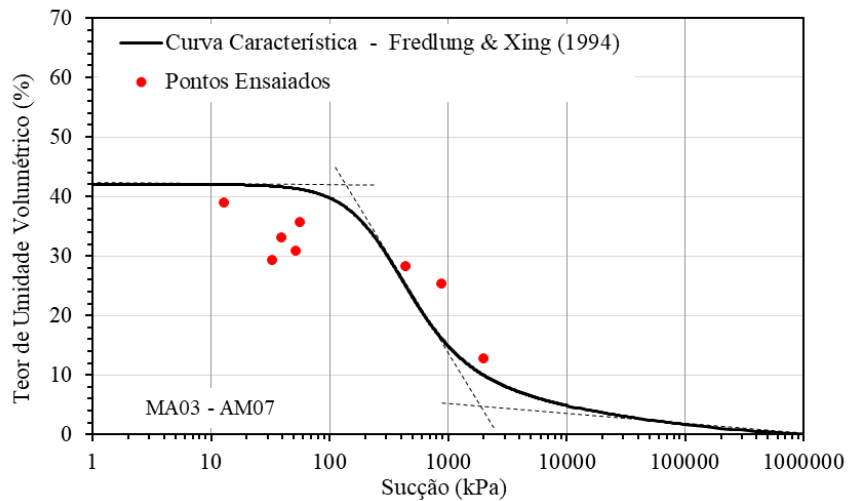
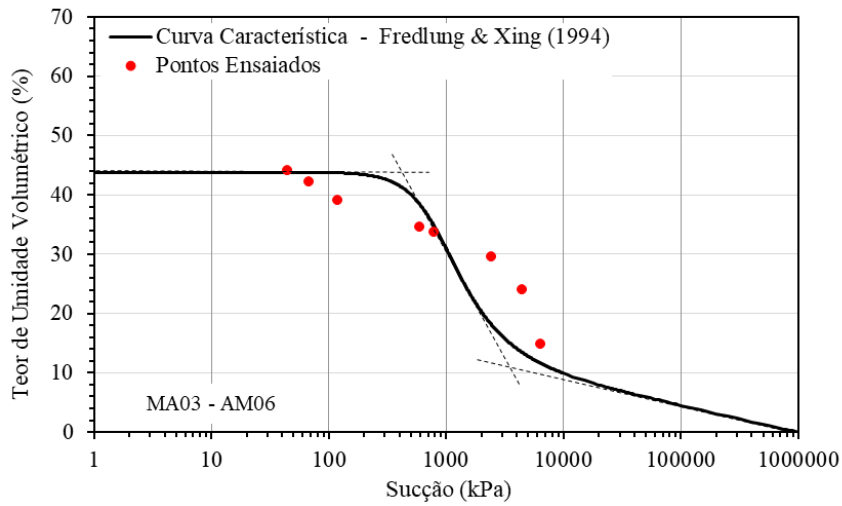
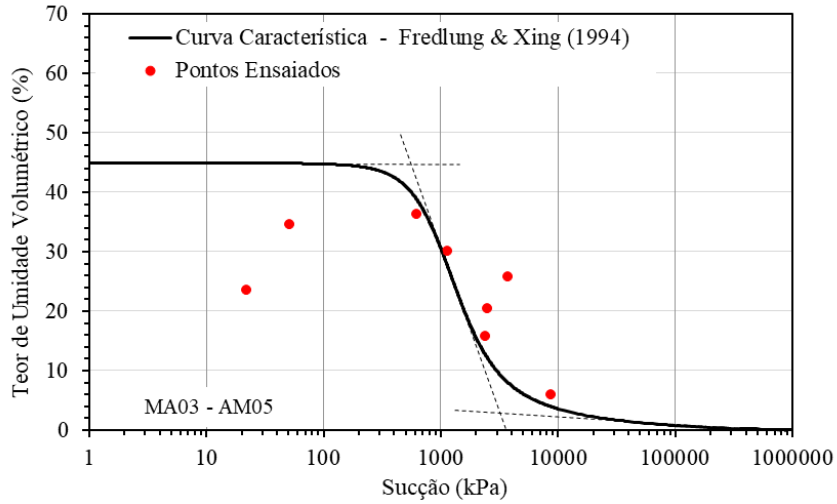


Figura 5.91 - MA03: Sucção vs. Teor de Umidade.

A Figura 5.91 apresenta as curvas características solo-água das amostras AM04 (Figura 5.91a), AM05 (Figura 5.91b), AM06 (Figura 5.91c) e AM07 (Figura 5.91d), obtidas por meio

do método do papel filtro. A amostra AM04 possui VEA em torno de 72 kPa, com umidade volumétrica de aproximadamente 50%. Já a AM05 apresenta valor mais elevado, cerca de 560 kPa, com umidade de 45%. A AM06 apresenta VEA de 420 kPa, com umidade volumétrica na transição de 45%, enquanto a AM07 possui o menor VEA do conjunto, cerca de 130 kPa, com umidade de 42%.

O maciço MA03 apresenta uma heterogeneidade hidráulica expressa nas curvas características solo-água. As diferenças nos valores de VEA e nos teores de umidade associados refletem variações nas propriedades físicas das amostras, como coloração, textura e comportamento plástico, observadas tanto em campo quanto em laboratório. Esses aspectos sugerem que os materiais do maciço possuem características distintas que influenciam diretamente a retenção de água.

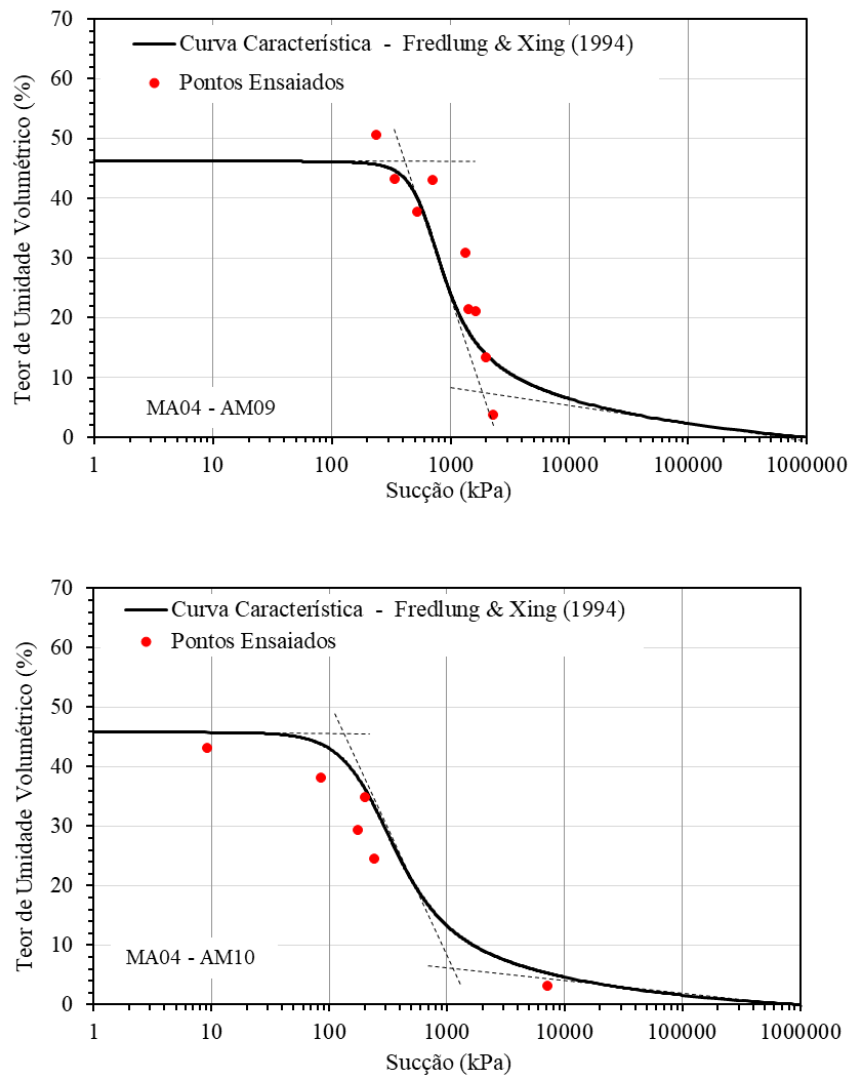


Figura 5.92 - MA04: Sucção vs. Teor de Umidade.

A Figura 5.92 apresenta as curvas características solo-água das amostras AM09 (Figura 5.92a) e AM10 (Figura 5.92b). A amostra AM09 apresenta VEA de aproximadamente 415 kPa, com umidade volumétrica na transição em torno de 56%. Já a amostra AM10 apresenta um VEA de cerca de 140 kPa, mantendo a umidade na transição, também próxima de 56%.

A Tabela 5.9 reúne, para cada amostra, o valor de entrada de ar e o teor de umidade residual. Já a Figura 5.93 apresenta as curvas características solo-água por maciço (MA01 a MA04), exibindo a relação entre sucção e teor de umidade Volumétrico.

Tabela 5.9 - Parâmetros de Sucção.

Amostras	Valor de Entrada de Ar (kPa)	Teor de Umidade Residual (%)
AM01	540	5.2
AM02	510	8.0
AM03	45	4.8
AM04	72	4.2
AM05	560	3.7
AM06	420	11.2
AM07	130	5.1
AM09	415	7.7
AM10	140	5.3

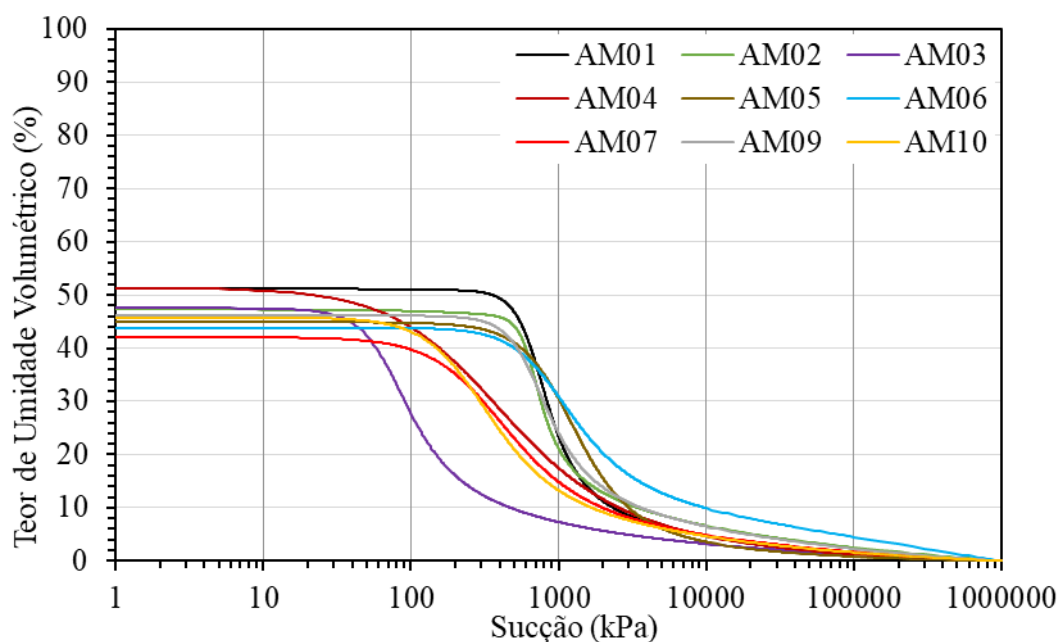


Figura 5.93 - MA01 a MA04: Sucção vs. Teor de Umidade.

A Tabela 5.9 e a Figura 5.93 evidenciam três faixas de valor de entrada de ar. O MA01 (AM01 e AM02) reúne os maiores VEA, na faixa de 510 kPa a 540 kPa. Já o MA02 (AM03)

apresenta o menor valor (45 kPa). Entre esses limites, o maciço 3 (AM04, AM05, AM06 e AM07) cobre praticamente toda a faixa intermediária (70 kPa a 560 kPa), o que confirma sua heterogeneidade interna. O MA04 (AM09 e AM10) fica entre 140 kPa e 415 kPa, com variação menos acentuada que a observada no MA03.

Quando a sucção se eleva a níveis muito altos, quase todas as amostras estabilizam o teor de umidade residual entre 5 % e 8 %, com exceção a AM06, que retém cerca de 11 %. De modo geral, as diferenças textural e estrutural dos maciços afetam sobretudo o valor de entrada de ar, isto é, o momento em que a desaturação se intensifica.

5.6 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA

O ensaio do furo de agulha foi realizado conforme a ABNT 14144-2022, que classifica os solos em quatro categorias: dispersivas (D1, D2) e não dispersivas (ND1, ND2), de acordo com a variação do diâmetro do furo, a turbidez do efluente e a vazão medida após cinco minutos de ensaio. A Tabela 5.10 apresenta os resultados dos ensaios.

Tabela 5.10 - Erodibilidade (*Pinhole Test*).

Maciço	Amostra	Classificação Dispersiva
MA02	AM03	D1
MA03	AM04	ND2
MA03	AM05	ND1
MA03	AM06	ND1
MA03	AM07	D1
MA04	AM14	ND1

O Maciço 2, AM03, apresenta-se classificado como dispersivo (D1), no Maciço 3, apenas a AM07 apresentou o mesmo comportamento dispersivo, enquanto AM04, AM05 e AM06 ficaram nas classes ND1/ND2, indicando baixa tendência à dispersão, já no Maciço 4, a amostra AM14 também foi enquadrada como ND1, risco reduzido de erosão interna nesses pontos.

5.7 - DESAGREGAÇÃO

A Tabela 5.11 apresentam os resultados dos ensaios de desagregação com inundação parcial.

Tabela 5.11 - Erodibilidade (Desagregação).

Locais de Estudo	Amostras	Desagregação			
		Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4
MA02	AM03 C.N.	Sem Resposta	Leve Dispersão	Leve Dispersão	Fraturamento
MA02	AM03 S.A.	Sem Resposta	Leve Dispersão e Abatimento Abaixo do NA	Abatimento Abaixo do NA e Fraturamento	Abatimento Total
MA03	AM04	Dispersão	Dispersão e Abatimento	Dispersão e Abatimento Total	Dispersão
MA03	AM06	Ok	Leve Dispersão	Dispersão, Fraturamento e Abatimento	Sispersão e Abatimento
MA03	AM07	Abatimento	Dispersão e Abatimento	Dispersão e Abatimento Total	-
MA03	AM08	Sem Resposta	Leve Dispersão	Leve Dispersão	Fraturamento e Pequenos Abatimentos

C.N.: Condição Natural; S.A.: Seco ao Ar

Nos ensaios de desagregação sob inundação parcial, as amostras AM04, AM06 e AM07 sofreram abatimento completo, evidenciando alta suscetibilidade à ruptura estrutural quando parcialmente saturadas. Já na AM08, o mecanismo predominante foi o fraturamento, o que reforça a hipótese de que a orientação dos planos de foliação influencia diretamente o potencial erosivo do solo.

Para avaliar o papel da umidade, a AM03 foi testada em condição natural e após 72 h de secagem ao ar. O solo seco ao ar colapsou logo nos primeiros estágios do ensaio, enquanto a mesma amostra em condição natural se manteve estável por mais tempo. Esses resultados indicam que as primeiras chuvas após períodos prolongados de seca constituem o momento mais crítico para o surgimento de feições erosivas.

5.8 - DISPERSÃO

A Tabela 5.12 apresentam os resultados dos ensaios de dispersão (*crumb test*).

Tabela 5.12 - Erodibilidade (Dispersão).

Locais de Estudo	Amostras	Dispersão			
		H ₂ O C.N.	NaOH C.N.	H ₂ O S.A.	NaOH S.A.
MA02	AM03	GRAU 2	GRAU 2	GRAU 1	GRAU 3
MA03	AM04	GRAU 2	GRAU 2	GRAU 1	GRAU 3
MA03	AM05	GRAU 2	GRAU 2	GRAU 1	GRAU 1
MA03	AM06	GRAU 1	GRAU 2	GRAU 1	GRAU 2
MA03	AM07	GRAU 2	GRAU 3	GRAU 2	GRAU 2
MA03	AM08	GRAU 1	GRAU 1	GRAU 1	GRAU 1

C.N.: Condição Natural S.A.: Seco ao Ar

Nos ensaios de dispersão (*Crumb test*) as amostras apresentaram comportamento não dispersivo (GRAU 1 e GRAU 2), com exceção das AM03, AM04 e AM07 em condições adversas (Solução de NaOH). De tal forma, é possível identificar que os materiais desse solo são poucos dispersivos. Vale ressaltar que dentre as amostras ensaiadas as AM04 e AM07 são as que possuem maior quantidade da fração argila.

5.9 - INDERBTIZEN MODIFICADO

O ensaio Inderbitzen Modificado foi aplicado para quantificar a erodibilidade superficial dos solos, incorporando simultaneamente escoamento laminar e impacto de gotas (*splash*), condição mais próxima da chuva real, conforme o aparato proposto por Freire (2001) e aperfeiçoado por Grando (2011). A Tabela 5.13 sintetiza os percentuais de solo erodido e as medidas de erosão obtidas para cada amostra nas condições “natural” e “seca ao ar” (72 h).

Tabela 5.13 - Erodibilidade (Inderbitzen).

Locais de Estudo	Amostras	Medida de Erosão (g/cm ²)	Porcetagem erodida (%)
MA02	AM03	8.00	98.00
MA03	AM04	7.00	98.00
MA03	AM07 S.A.	7.10	85.00
MA03	AM07 C.N.	7.50	95.00
MA03	AM08 S.A.	0.10	0.90
MA03	AM08 C.N.	0.28	3.00
MA04	AM14 S.A.	0.40	7.00
MA04	AM14 C.N.	0.80	11.00

C.N.: Condição Natural; S.A.: Seco ao Ar

As amostras AM07, AM08 e AM14 foram ensaiadas em condição natural e após 72 h de secagem ao ar. Na condição seca ao ar, a AM14 apresentou 7 % de solo erodido, com medida de erosão de 0,4 g cm⁻², enquanto a AM08 exibiu apenas 0,9 % de solo erodido e 0,1 g cm⁻². Em condição natural, esses valores aumentaram: a AM14 registrou 11 % de material erodido e

0,8 g cm⁻²; já a AM08 atingiu 3 % de solo erodido e 0,3 g cm⁻². A principal diferença entre as condições concentrou-se na última etapa de coleta de sedimentos, quando se observou deslocamento em ambas as amostras, mais pronunciado na condição natural. Desconsiderando esse fenômeno, o solo seco ao ar tenderia a erodir ligeiramente mais; ainda assim, ambas as amostras revelam baixo potencial erosivo.

Em contraste, a AM07 apresentou comportamento muito mais agressivo: após 72 h de secagem ao ar, perdeu 85 % de sua massa, com medida de 7,1 g cm⁻²; em condição natural, a perda chegou a 95 % e 7,5 g cm⁻². Além disso, na AM07 seca ao ar a perda de massa concentrou-se no início do ensaio, indicando elevada suscetibilidade inicial.

As amostras AM03 e AM04, ensaiadas apenas em condição natural, apresentaram 98 % de material erodido. A AM03 atingiu medida de 8,0 g cm⁻², ligeiramente superior aos 7,0 g cm⁻² da AM04. Esses valores aproximam AM03 e AM04 do comportamento observado para a AM07, sugerindo elevada propensão à formação de feições erosivas nos respectivos maciços.

5.10 - ESPECTOMETRIA DE FLUORÊNCIA DE RAIOS X

A Tabela 5.14 apresenta os resultados dos ensaios de espectrometria por fluorescência de raio-X e indica os percentuais dos principais óxidos que constituem as amostras.

Tabela 5.14 - Análises químicas por espectrometria por fluorescência de raios-X.

Locais de Estudo	MA02	MA03	MA03	MA03	MA03	MA04
Amostras	AM03	AM04	AM06	AM07	AM08	AM14
SiO ₂ (%)	47,6	40,4	42,4	39,8	38,8	51,8
Al ₂ O ₃ (%)	21,4	22	29,5	29,2	30,9	20,4
Fe ₂ O ₃ (%)	19,9	23,7	15	16	15,8	17,4
CaO (%)	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,1
MgO (%)	0,77	0,23	0,22	0,2	0,22	0,33
TiO ₂ (%)	1,8	1,21	1,02	1,12	1,19	0,95
P ₂ O ₅ (%)	0,05	0,39	0,09	0,08	0,09	0,1
Na ₂ O (%)	0,3	0,47	0,5	0,4	0,5	0,35
K ₂ O (%)	3,84	2,97	3,67	3,13	3,8	4,55
MnO (%)	0,05	0,06	0,02	<0,01	0,01	0,26
LOI (%)	5,09	7,6	7,7	8,63	8,21	4,54

Os solos são compostos, majoritariamente, por sílica, alumina e hematita (>85%). Este resultado já era esperado visto a abundância de minerais ferrosos na região do Quadrilátero Ferrífero. Apesar das quantidades dos óxidos serem diferentes para cada amostra, esta diferença

não é visualizada no comportamento dos solos da região. Solos com características químicas similares, como a AM07 e AM08, reproduziram resultados divergentes nos ensaios de erodibilidade, sendo a AM07 considerada erodível, diferentemente da AM08. Dessa forma, a respeito da erodibilidade, a estrutura do solo tem maior influência do que a composição química para os solos analisados.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES - DADOS DE MONITORAMENTO DOS MACIÇOS E RETROANÁLISES

Nesta seção são apresentados os dados de monitoramento dos maciços avaliados, acompanhados das interpretações e das retroanálises correspondentes.

6.1 - MA01 - KM 578+500

A partir da análise das campanhas de investigação realizadas, das seções geológicas apresentadas por Endo *et al.* (2019) e das imagens de satélite do local, desenvolveu-se a interpretação e estabelecimento de um modelo geológico simplificado, apresentado por Gomes (2021) na Figura 6.1. A definição de um possível nível freático para o modelo geológico foi fundamentada na imagem aérea sobre a topografia e hidrografia.

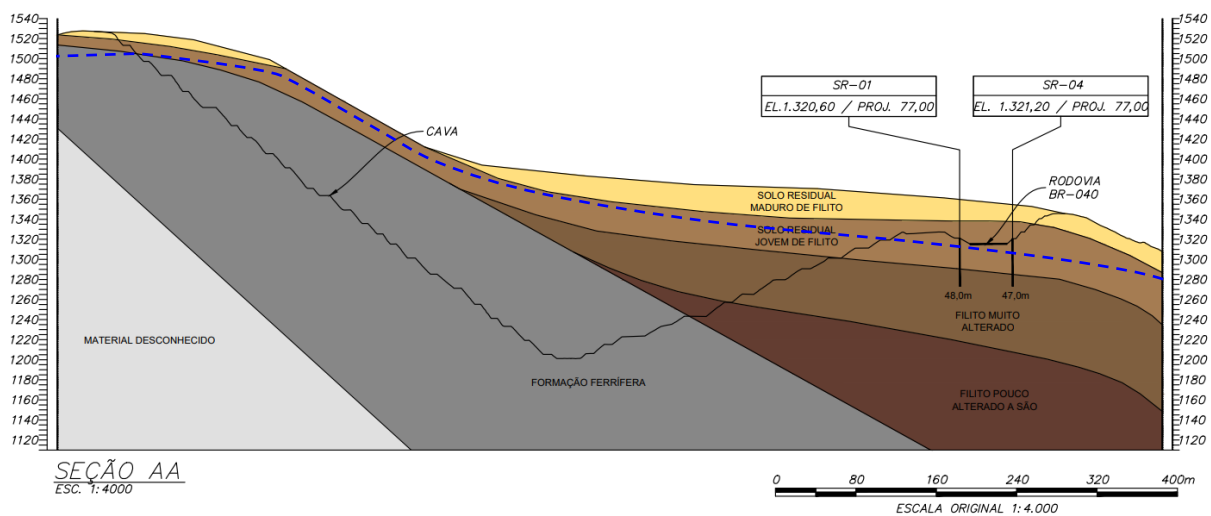


Figura 6.1 - Modelo geológico interpretado a partir da campanha investigação geotécnica (Fonte: Gomes, 2021).

A análise integrada das investigações geológicas, das campanhas de instrumentação e dos perfis geofísicos permite compreender que o comportamento do maciço em filito ao longo da BR-040 está condicionado tanto às características intrínsecas do material quanto ao contexto estrutural e geométrico no qual o talude está inserido. Conforme discutido por Gomes (2021), a região apresenta dobramentos marcantes, com presença de anticlinais e sinclinais muito próximas, que influenciam a orientação das tensões principais e permitem a existência de tensões horizontais residuais elevadas, por vezes superiores à tensão vertical. Esse arranjo

tectônico, associado ao intenso intemperismo que caracteriza os solos residuais jovens de filito, gera um ambiente geotécnico sensível às variações de confinamento impostas por escavações de grande porte.

A seção geológica simplificada evidencia que o volume removido pela cava é muito superior ao da escavação rodoviária, resultando em significativo alívio de tensões no entorno. Gomes (2021) já apontava que esse desconfinamento pode favorecer pequenas deformações distribuídas no maciço, sem necessariamente formar superfícies de ruptura bem definidas.

A planta de instrumentação (Figura 6.2) mostra que os vetores de deslocamento horizontal obtidos pelos cinco inclinômetros instalados apresentam orientação predominante voltada para a cava, conforme também observado por Gomes (2021). Esse padrão ocorre tanto no talude norte quanto no sul, ainda que as magnitudes variem entre instrumentos, com valores acumulados entre aproximadamente 6 mm e 47 mm no período analisado. A coincidência espacial entre o sentido dos deslocamentos e a direção da cava reforça a interpretação de movimentos associados ao desconfinamento regional, sem indicação de instabilidade localizada restrita ao talude rodoviário.

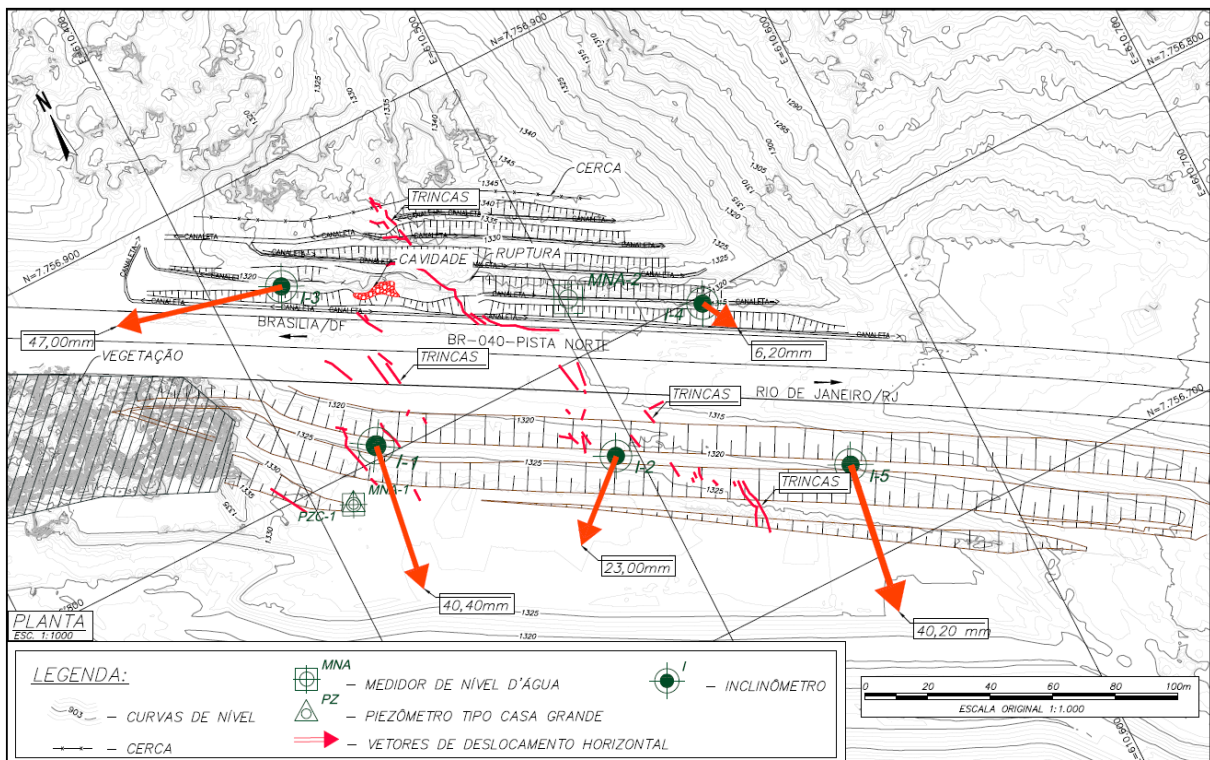


Figura 6.2 - Disposição dos instrumentos em planta com vetores de deslocamento horizontal dos inclinômetros (Fonte: Gomes, 2021).

Os registros de inclinometria analisados para o presente estudo mostram justamente esse comportamento: deslocamentos horizontais contínuos, direcionados predominantemente em direção à cava, com velocidades extremamente lentas (da ordem de 0,05 m/ano) e sem inflexões características de ruptura ao longo do fuste dos inclinômetros. Observa-se que o incremento de deslocamento não apresenta correlação direta com a precipitação, reforçando a predominância de fatores estruturais e de redistribuição de tensões sobre mecanismos induzidos por variações sazonais de umidade.

Esse padrão é compatível com uma resposta progressiva do maciço, em que a mobilização da resistência ocorre de forma distribuída e sem definição clara de uma zona de cisalhamento. Tal interpretação também é coerente com os resultados laboratoriais apresentados no Capítulo 5 desta dissertação, os quais mostram que o filito residual possui ângulos de atrito relativamente baixos e comportamento mecânico fortemente influenciado pela foliação e pelo estado de intemperismo, como documentado por Gomes (2021).

As seções inclinométricas I-1, I-2, I-3 e I-4 (Figura 6.3 e Figura 6.4) confirmam a ausência de inflexões marcantes nos perfis de deslocamento em profundidade, indicando que não há evidência clara de superfície de deslizamento interceptando os tubos. Os deslocamentos se concentram nos metros superficiais, reduzindo gradualmente até maiores profundidades, sem sinal de mudança abrupta de inclinação ao longo do fuste. Esse comportamento é congruente com o que Gomes (2021) aponta como deformação distribuída, possivelmente associada ao alívio de tensões gerado pela cava e à anisotropia estrutural do filito.

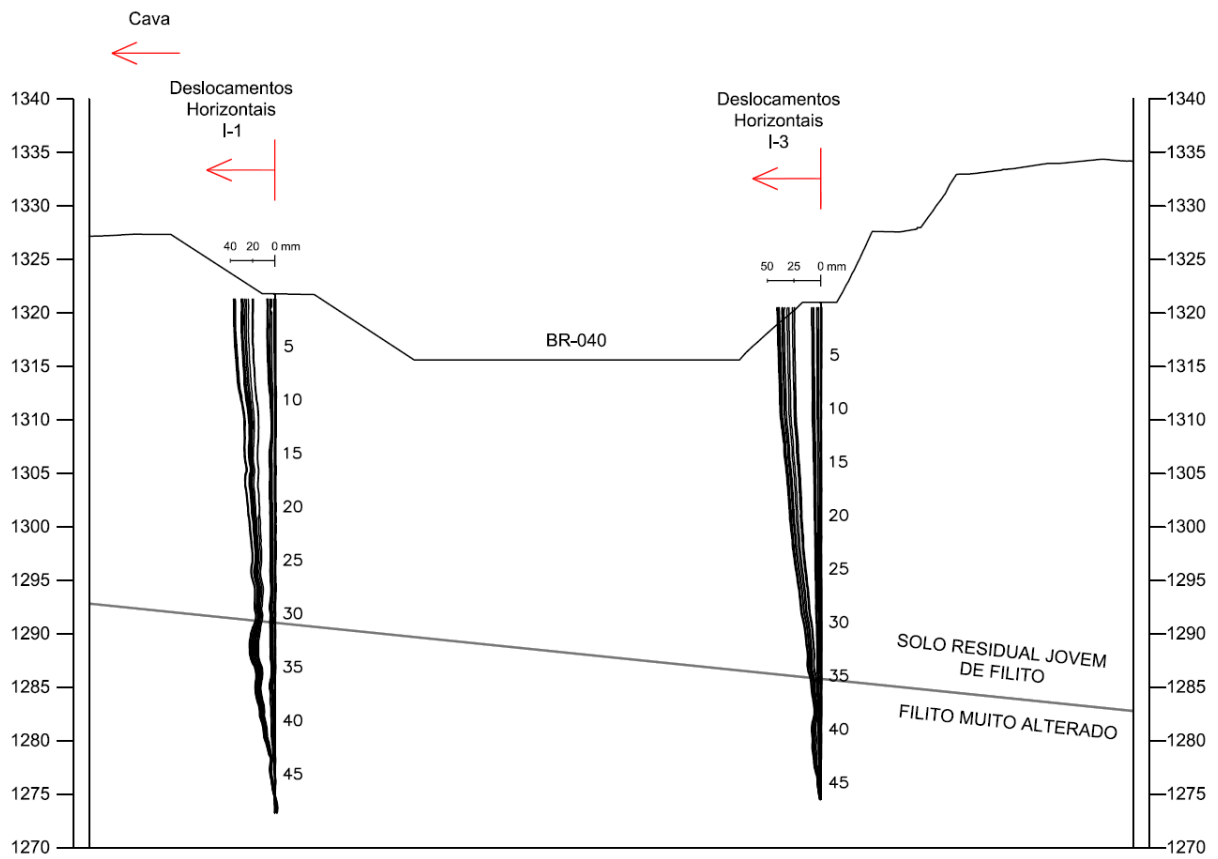


Figura 6.3 - Verticais inclinométricas dos instrumentos I-1 e I-3 (Fonte: Silva *et al.*, 2020a).

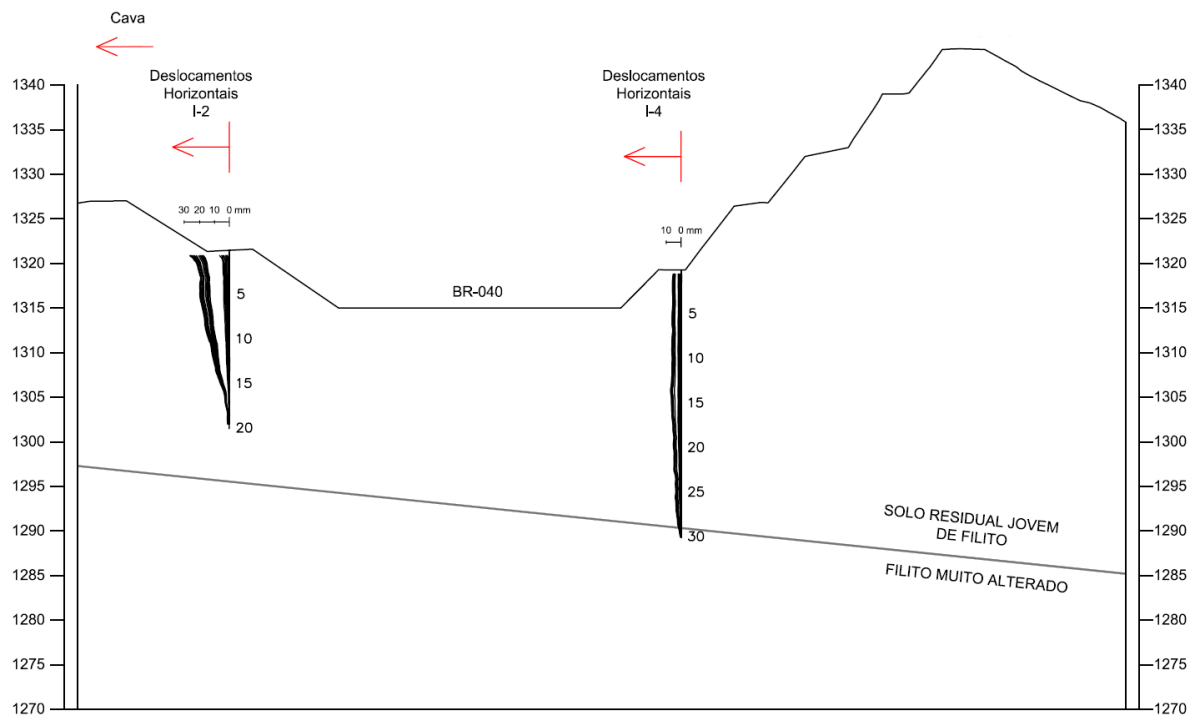


Figura 6.4 - Verticais inclinométricas dos instrumentos I-2 e I-4 (Fonte: Silva *et al.*, 2020a).

A geofísica complementa essa leitura. As seções de resistividade apresentadas por Gomes (2021) identificam zonas de alta resistividade compatíveis com possíveis cavidades ou discontinuidades internas no maciço. Essas feições aparecem próximas aos pontos onde foram observadas trincas no pavimento, sugerindo relações geométricas importantes, embora não conclusivas. Também segundo Gomes (2021), o nível d'água monitorado em MNA-1 apresentou rebaixamento aproximado de 10 m no período de medição, sem relação direta com o regime de chuvas, reforçando a hipótese de redistribuição do fluxo subterrâneo em direção à cava.

As seções geolétricas (Figura 6.5) exibem zonas de alta resistividade em diversos trechos do talude, com valores da ordem de $2 \times 10^4 \Omega \cdot m$, compatíveis com cavidades ou espaços vazios, segundo interpretação de Cardoso (2016) citada por Gomes (2021). Essas zonas apresentam boa correspondência espacial com regiões onde foram mapeadas trincas no pavimento e com o local onde uma cavidade aflorante foi identificada em campo. Embora não permitam determinar forma, continuidade ou volume dessas feições, as imagens reforçam a presença de heterogeneidades internas significativas no maciço.

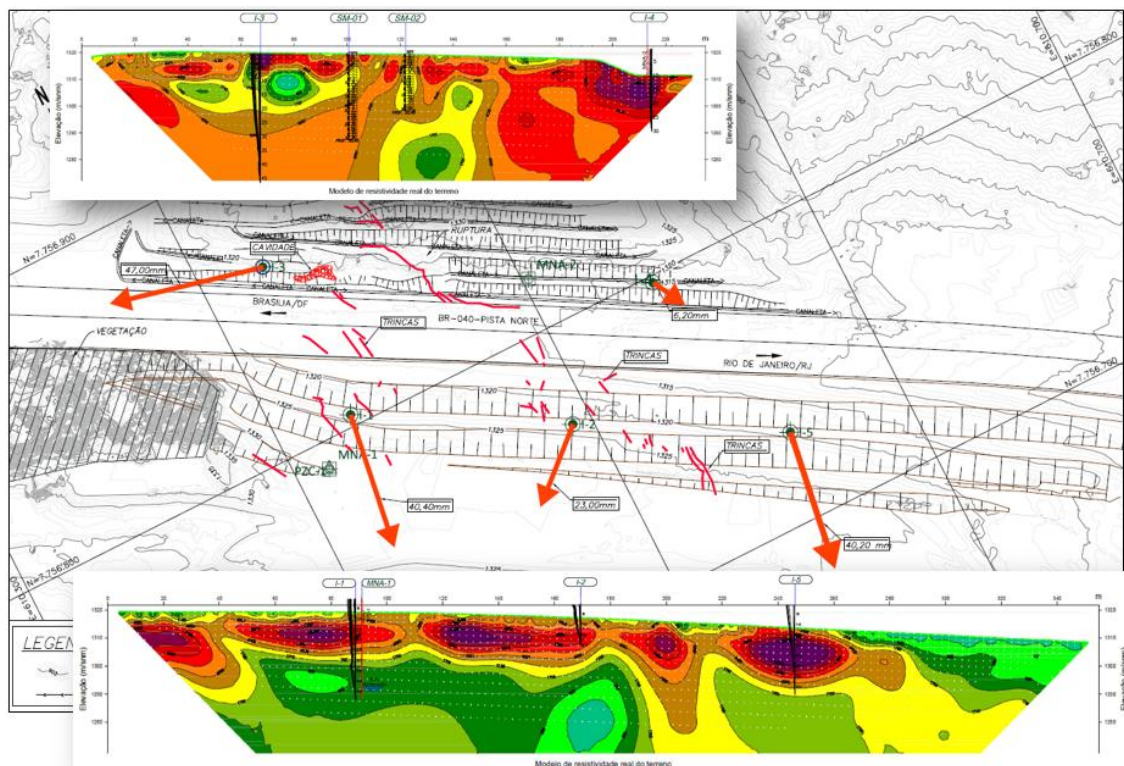


Figura 6.5 - Relação entre instrumentação, investigações geofísicas e as trincas observadas na rodovia (Fonte: Gomes, 2021).

Em conjunto, esses elementos confirmam que o maciço apresenta comportamento condicionado por:

- (i) anisotropia estrutural associada ao filito;
- (ii) intemperismo avançado nos horizontes superficiais;
- (iii) possível presença de cavidades ou zonas de elevado contraste geofísico;
- (iv) redistribuição das tensões e da água subterrânea conforme descrito por Gomes (2021).

Essas evidências auxiliam na interpretação, em escala real, dos parâmetros mecânicos obtidos em laboratório, permitindo estabelecer uma ponte entre os ensaios geotécnicos e o comportamento observado no campo. Embora não se tenha identificado uma superfície de ruptura, os deslocamentos extremamente lentos, direcionados à cava, e a influência da estrutura do filito convergem para uma resposta compatível com deformações progressivas e redistribuição de tensões em maciços metamórficos foliados, em conformidade com as hipóteses já apresentadas por Gomes (2021).

6.2 - MA02 - KM 579+300

O talude MA02 corresponde a um corte escalonado cuja configuração atual resulta de intervenções realizadas após a ruptura que afetou o trecho adjacente da BR-040. A Figura 6.6 apresenta a planialtimetria da área já na condição pós-ruptura, imediatamente anterior às obras de realudamento, destacando o traçado do platô rodoviário e a geometria remanescente do talude. As seções transversais S1 e S2, mostradas na Figura 6.7 e Figura 6.8, foram extraídas dessa base planialtimétrica a partir da locação dos alinhamentos indicados em planta.

A seção S1 corta exatamente a região onde a ruptura foi registrada, representando a geometria deformada do talude no trecho crítico. A seção S2, por sua vez, situa-se em um segmento adjacente que não sofreu ruptura e preserva a configuração original do corte antes da instabilização. Por esse motivo, a seção S2 constitui referência apropriada para procedimentos de retroanálise, permitindo reconstruir numericamente a geometria pré-ruptura da seção S1 e, assim, investigar combinações de parâmetros de resistência e condições piezométricas capazes de reproduzir a superfície de ruptura observada em campo.

Com base nos resultados das sondagens SPT e nos levantamentos planialtimétricos, foi elaborado o modelo geotécnico do talude. Não foi identificado nível d'água nos furos de sondagem. Para a análise de estabilidade, a geometria da ruptura foi reconstituída com base nas dimensões da seção adjacente não colapsada (Seção S2), representada já com a estratigrafia interpretada.

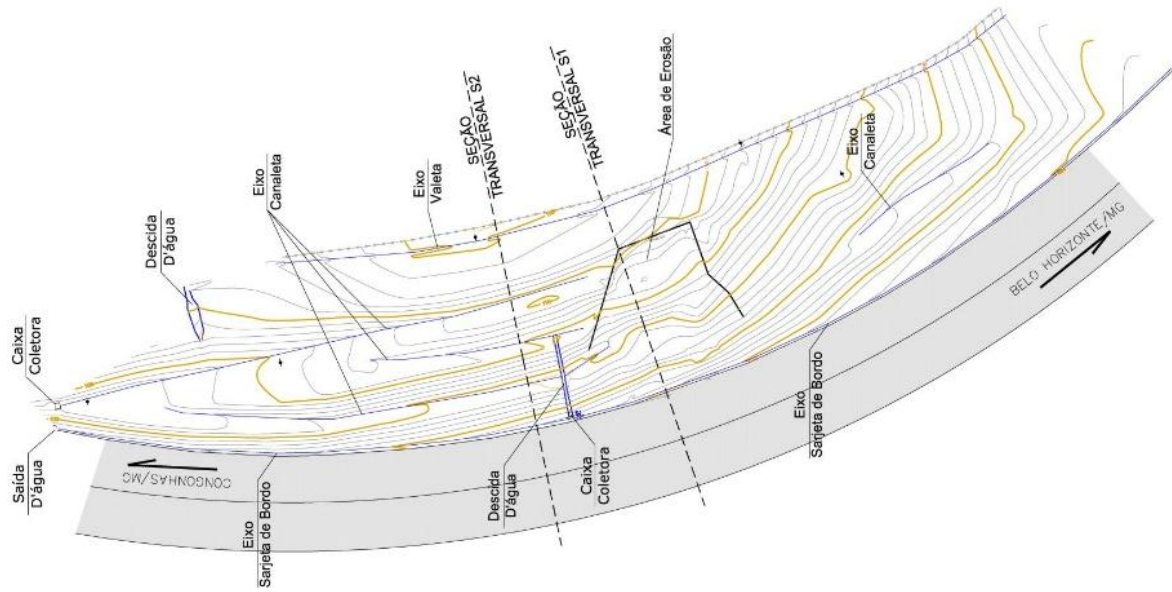


Figura 6.6 - Planta baixa MA02, condição logo após ruptura.

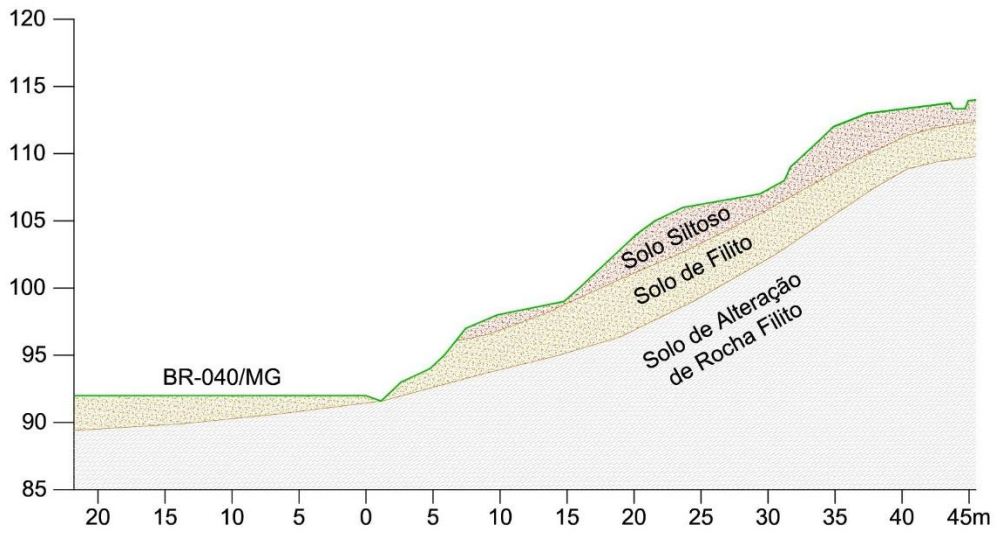


Figura 6.7 - Seção transversal S1, MA02 (seção em que ocorreu a ruptura do talude).

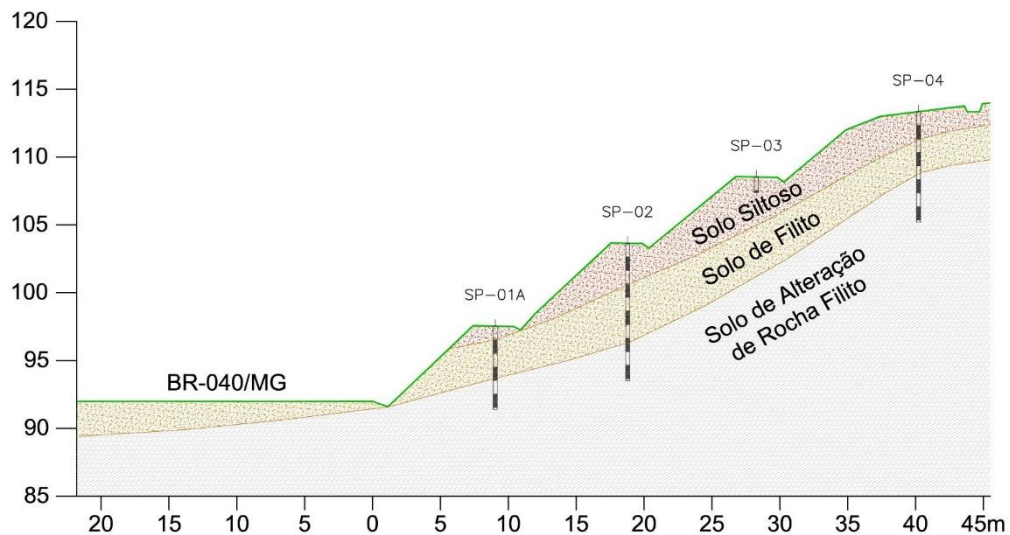


Figura 6.8 - Seção transversal S2, MA02 (seção preservada).

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo do MA02 (km 579+300) foram obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto realizados na amostra AM03. A interpretação seguiu a metodologia preconizada pela norma ABNT NBR 11682:2009, a qual estabelece diretrizes para definição de envoltórias de resistência aplicáveis à análise de estabilidade de taludes. O estudo considerou a condição de pico de tensão e resultou na definição da envoltórias média, superior, inferior e de projeto. A Tabela 6.1 apresenta o resumo dos cálculos realizados, os quais incluíram o tratamento estatístico das tensões normais e cisalhantes obtidas nos ensaios.

Tabela 6.1 - Cálculos de acordo com a norma ABNT NBR 11682:2009

Parâmetros de Entrada						Desvio Padrão					
N	R ²	R		C	tg (φ)	φ°					
19	0,84	0,92		7,05	0,041	2,046					
t(N-2)	φ' Médio	C' Médio		Coeficiente de Variação (CV)							
2,4908	21,41	15,95		44,22%	10,50%	9,55%					
σ _n de Ensaio (kPa)	σ _n Ruptura	Tensão Cisalhante (kPa)		MSE	353,9446	V(c)	49,75	V(tgφ)	0,002	LIMITES	
		Ensaio (τ _i)	Média (τ)	(τ _i -τ)	(τ _i -τ) ²	(σ _{ni} - σ _n)	(σ _{ni} - σ _n) ²	V(τ)	Desvio (τ)	τ MAX	τ MIN
25	33,27	31,30	28,99	2,30	5,30	-102,18	10440,12	390,2859	19,76	78,20	-20,21
50	59,46	41,03	39,26	1,77	3,13	-75,99	5774,18	382,3697	19,55	87,97	-9,44
100	114,99	43,55	61,04	-17,48	305,68	-20,46	418,52	373,2833	19,32	109,16	12,91
200	218,71	70,99	101,71	-30,72	943,60	83,26	6932,95	384,3357	19,60	150,54	52,87
300	309,00	180,00	137,11	42,89	1839,65	173,56	30121,80	423,6777	20,58	188,38	85,84
25	32,23	34,67	28,59	6,09	37,04	-103,22	10653,60	390,6481	19,76	77,82	-20,64
50	57,97	39,85	38,68	1,16	1,36	-77,47	6001,44	382,7553	19,56	87,41	-10,05
100	108,83	50,80	58,62	-7,83	61,25	-26,61	708,03	373,7745	19,33	106,78	10,47
200	214,15	62,44	99,92	-37,48	1404,48	78,71	6195,08	383,0838	19,57	148,67	51,17
300	329,04	117,04	144,97	-27,92	779,77	193,59	37477,99	436,1582	20,88	196,98	92,95
25	34,38	34,97	29,43	5,54	30,68	-101,07	10214,72	389,9035	19,75	78,61	-19,75
50	59,46	43,21	39,26	3,95	15,61	-75,99	5774,18	382,3697	19,55	87,97	-9,44
100	109,29	71,54	58,80	12,74	162,33	-26,16	684,26	373,7342	19,33	106,95	10,65
200	218,71	107,40	101,71	5,70	32,47	83,26	6932,95	384,3357	19,60	150,54	52,87
300	34,38	34,97	29,43	5,54	30,68	-101,07	10214,72	389,9035	19,75	78,61	-19,75
25	33,27	41,05	28,99	12,06	145,33	-102,18	10440,12	390,2859	19,76	78,20	-20,21
50	57,97	41,65	38,68	2,96	8,79	-77,47	6001,44	382,7553	19,56	87,41	-10,05
300	324,88	152,04	143,34	8,71	75,84	189,44	35887,11	433,4591	20,82	195,19	91,48
200	223,46	91,99	103,57	-11,58	134,06	88,02	7747,47	385,7176	19,64	152,49	54,65
σ _n Médio (kPa)	135,44			Σ (τ _i -τ) ²		Σ (σ _{ni} - σ _n) ²					
				6017,06	6017,06	208620,69	208620,69				

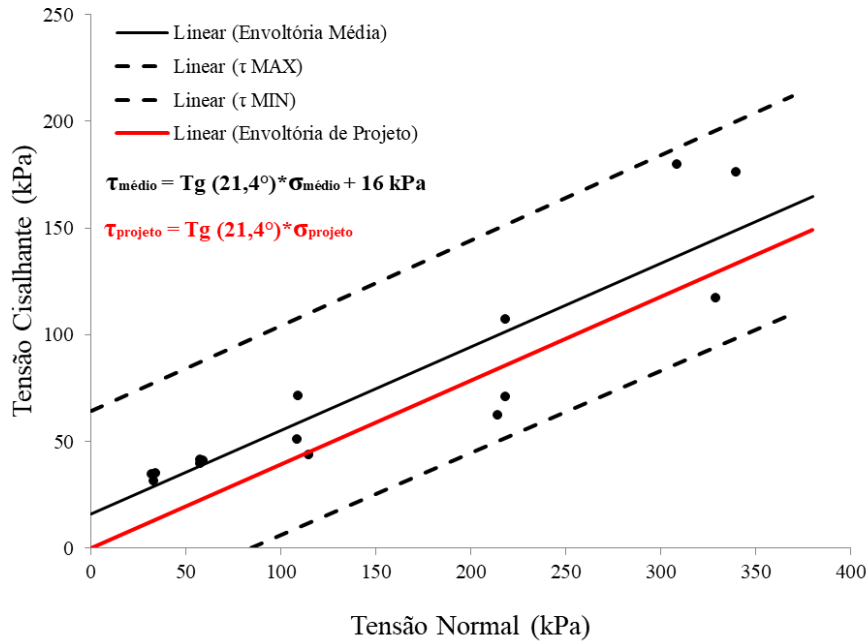


Figura 6.9 - Envoltória de resistência de acordo com a norma ABNT NBR 11682:2009.

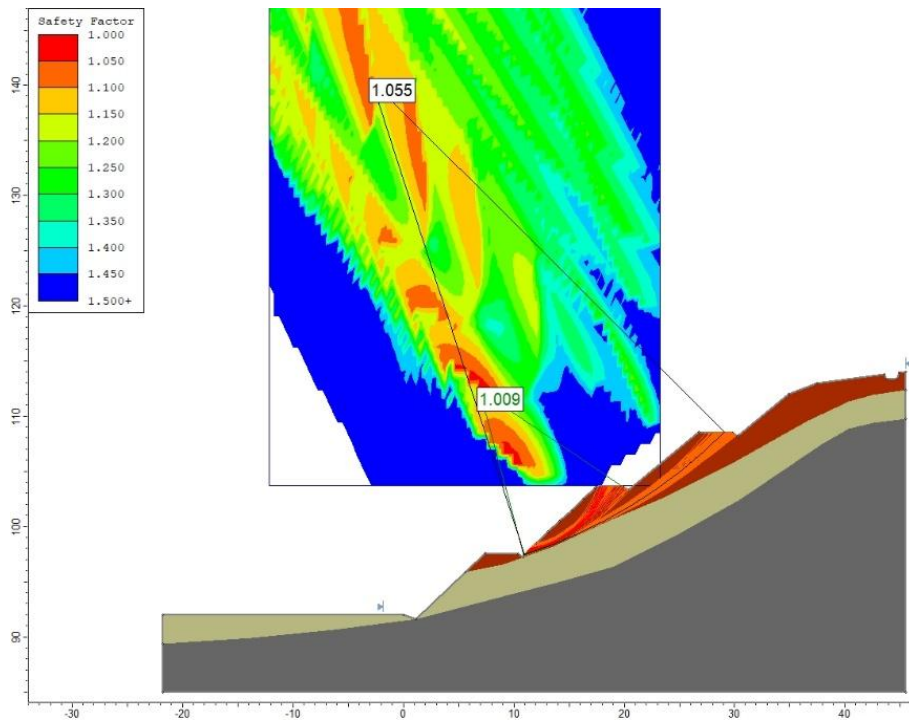
A Figura 6.9 apresenta as envoltórias de resistência obtidas, evidenciando a dispersão dos pontos experimentais e os ajustes lineares correspondentes às diferentes condições. Para a envoltória média, foram determinados um ângulo de atrito de $21,4^\circ$ e uma coesão de 16 kPa. Na envoltória de projeto, o mesmo ângulo de atrito foi mantido, porém a coesão foi adotada como nula. Essa adoção está de acordo com a ABNT NBR 11682:2009, que estabelece que, quando o valor da coesão obtido pelo critério estatístico for negativo, deve-se assumir coesão de projeto igual a zero.

Para o estudo de retroanálise dos parâmetros de resistência dos materiais que compõem o maciço MA02, o ângulo de atrito efetivo da camada mais superficial, constituída por solo siltoso, foi definido com base nos resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados no km 578+500, nos quais foi obtido $\phi' = 22^\circ$. O valor do intercepto coesivo para esse mesmo material foi determinado por meio da retroanálise da ruptura ocorrida no km 579+300. Como os solos das duas localidades apresentam características semelhantes e estão próximos, considerou-se tecnicamente aceitável adotar o mesmo valor de ϕ' para ambas as situações.

Para o solo residual de filito, foram adotados os parâmetros de resistência obtidos em ensaio de cisalhamento direto realizado com amostras indeformadas, embebidas por 48 horas antes do ensaio. Consideraram-se os valores de resistência de pico, com $\phi' = 21,4^\circ$ e $c' = 16$ kPa, conforme apresentado na Figura 6.10. Por fim, para a camada inferior, classificada como solo de alteração de filito, adotaram-se os parâmetros $\phi' = 23^\circ$ e $c' = 30$ kPa.

O registro fotográfico realizado na ocasião da ruptura no talude de corte sugere que o colapso teve início nas banquetas superiores. O material desprendido deslizou ao longo do talude, danificando a banquetta inferior. Com base nessa interpretação de campo, compatível com a geometria observada na seção S1, a retroanálise consistiu na variação do c' do solo siltoso até a obtenção de fator de segurança próximo da unidade, representando a condição de ruptura. A Figura 6.10 apresenta o resultado dessa análise.

Os resultados indicaram que um intercepto coesivo de 5,8 kPa nesse solo levaria o talude à condição de instabilidade. Como não foi observado nível d'água nos furos de sondagem realizados no local, o cenário analisado considerou a possibilidade de redução da coesão aparente em função da infiltração superficial, podendo ter contribuído para a perda de resistência na camada superior.





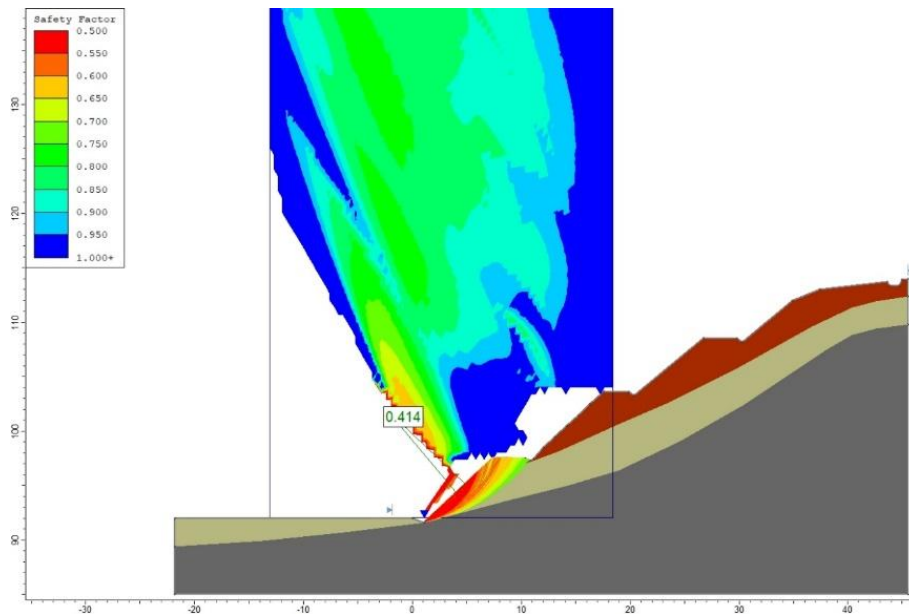
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Solo Siltoso		18	Mohr-Coulomb	5.8	22
Solo de Filito		19	Mohr-Coulomb	16	21.4
Solo de Alteração de Rocha Filito		20	Mohr-Coulomb	30	23

Figura 6.10 - MA02: Retroanálise da ruptura: parâmetros de resistência da envoltória média, definida a partir dos ensaios de cisalhamento direto ($FS \approx 1$).

Além da retroanálise, foi realizada uma análise de estabilidade para a condição pré-ruptura, considerando a envoltória de resistência de projeto indicada pela ABNT NBR 11682:2009 para a camada de solo residual de filito (camada intermediária), cujo resultado é apresentado na Figura 6.11. Observa-se que os parâmetros definidos conforme o critério normativo, que adota intercepto coesivo nulo, se mostraram conservadores e incapazes de fornecer fator de segurança compatível com a inclinação observada em campo, resultando em $FS < 1$. Nessas condições, a execução das banquetas com a geometria registrada não seria possível. Por outro lado, os parâmetros correspondentes à envoltória média mostraram-se mais adequados ao comportamento de estabilidade observado no talude analisado.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Solo Siltoso	■	18	Mohr-Coulomb	5.8	22
Solo de Filito	■	19	Mohr-Coulomb	0	21.4
Solo de Alteração de Rocha Filito	■	20	Mohr-Coulomb	30	23

Figura 6.11 - MA02 (km 579+300): Análise de estabilidade da condição anterior à ruptura: parâmetros de resistência da envoltória de projeto proposta pela norma (FS<1, inconsistente).

6.3 - MA03 – km 586+700

O maciço MA03, localizado no km 586+700 da Pista Sul da BR-040/MG, corresponde a um talude de corte desenvolvido em solo residual de filito, apresentando diferentes colorações e estágios de intemperismo. Os materiais preservam estruturas reliquias da rocha de origem, especialmente foliações marcantes nos solos menos intemperizados (Cinza e Roxo), enquanto os solos Marrom Roseado e Amarelo apresentam estrutura mais degradada. O talude foi selecionado por reunir, em uma mesma feição erosiva, solos com distintos graus de alteração e boa condição de acessibilidade para amostragem. A Figura 6.12 apresentam vistas gerais do maciço e da feição erosiva. Essas imagens auxiliaram na identificação de variações cromáticas, traços estruturais, caminhos preferenciais de escoamento superficial e pontos adequados para extração de amostras e execução das sondagens.



Figura 6.12 – Vista aérea do MA03, com registro dos processos erosivos mobilizando em solos com as colorações que foram ensaiados.

Além dos ensaios de caracterização e resistência utilizados para subsidiar as análises comparativas e de retroanálise, o MA03 contou com testes específicos de ascensão capilar, desagregação e dispersão, conduzidos para avaliar a erodibilidade dos materiais. Os resultados mostraram comportamento predominantemente não dispersivo, com maior suscetibilidade à desagregação nos solos mais argilosos e avançados em intemperismo (Marrom Roseado e Amarelo). Nos solos estruturalmente preservados (Cinza e Roxo), a erosão foi governada pelo fraturamento ao longo das foliações.

A caracterização geotécnica evidenciou que os solos do MA03 representam distintos estágios de intemperismo do filito, variando de materiais maciços e ricos em fração fina a solos com foliação marcante. Essa variação refletiu-se diretamente nos resultados de cisalhamento direto: os solos mais intemperizados apresentaram menor ângulo de atrito e maior perda de

resistência com a saturação, enquanto os solos com estrutura preservada tiveram sua resistência condicionada ao alinhamento dos planos de foliação. Os ensaios de erodibilidade reforçaram essa distinção, indicando que materiais argilosos tendem ao abatimento quando saturados, ao passo que solos foliados respondem por fraturamento estrutural.

Assim, a integração dos resultados mostra que a evolução erosiva do MA03 é controlada simultaneamente pelo grau de intemperismo, que governa a dispersão e a desagregação, e pela anisotropia estrutural, que condiciona a resistência ao cisalhamento. O talude representa, portanto, um caso típico dos solos residuais de filito da região, nos quais foliação, estágio de alteração e resposta hidráulica determinam tanto o comportamento mecânico quanto o desenvolvimento das feições erosivas. Esses achados fornecem base direta para as análises subsequentes desta dissertação, permitindo correlacionar anisotropia, erodibilidade e resistência dos materiais.

6.4 - MA04 - KM 590+175

O maciço MA04 corresponde a uma encosta composta por colúvio derivado do intemperismo e retrabalhamento de filitos da Serra da Moeda, apresentando forte controle estrutural exercido pela foliação original da rocha. Trata-se de um depósito com histórico de movimentos lentos, cuja superfície de deslizamento apresenta movimentação lenta ao longo do tempo, mas com variações significativas nas velocidades registradas por inclinometria. Monitoramentos executados em anos consecutivos mostraram que, embora a geometria e profundidade da superfície de deslizamento não tenham se alterado, as velocidades de deslocamento apresentaram diferenças importantes, acompanhadas por variações no nível d'água (Silva *et al.*, 2018). Essas mudanças de velocidade refletiram diretamente nos parâmetros de resistência obtidos por retroanálises independentes, sugerindo que o material não mobiliza resistência constante, mas dependente das condições hidráulicas e da taxa de deformação.

A Figura 6.13 apresenta a delimitação aproximada da feição instável em planta, destacando a geometria alongada da “língua” de instabilidade descrita por Silva *et al.* (2018). A disposição topográfica e a direção preferencial de deslocamento são compatíveis com o movimento gradual do colúvio em direção ao pavimento, reforçando o caráter não catastrófico do processo.

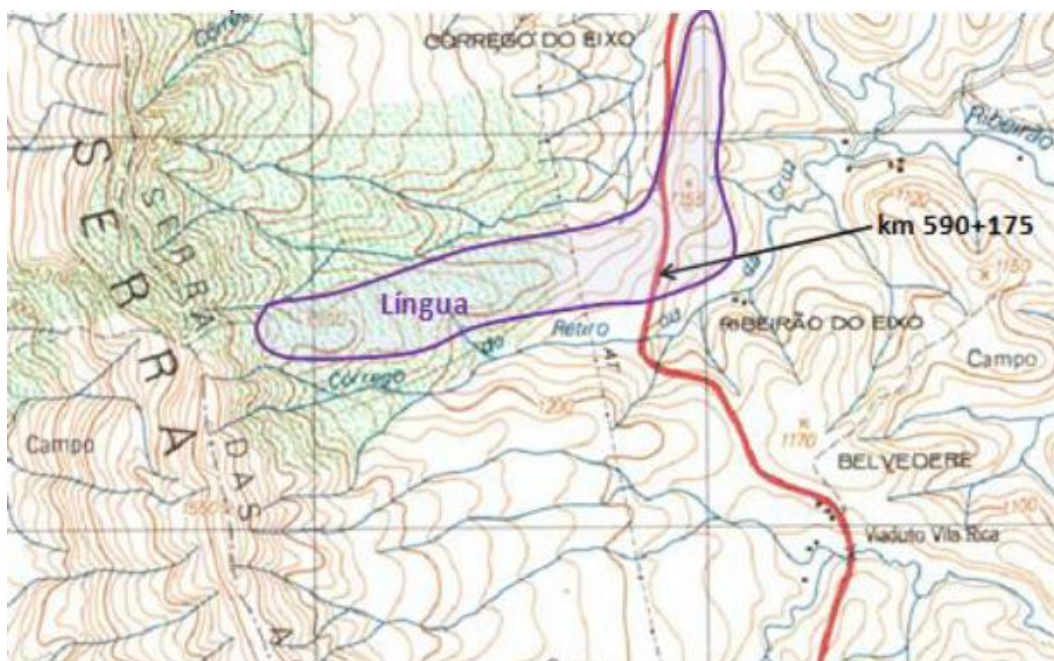


Figura 6.13 - Relevo e indicação da língua de colúvio (Fonte: Silva *et al.*, 2018).

Para a caracterização do MA04, foram executados o levantamento topográfico do maciço e sondagens à percussão e rotativa. Esses dados permitiram definir a estratigrafia, a geometria do talude e os materiais predominantes ao longo da seção avaliada. Com base nessas informações, elaborou-se o perfil geológico-geotécnico da área, apresentado na Figura 6.14, no qual também estão representadas as linhas estimadas do nível d'água máximo e mínimo observados durante o período de monitoramento.

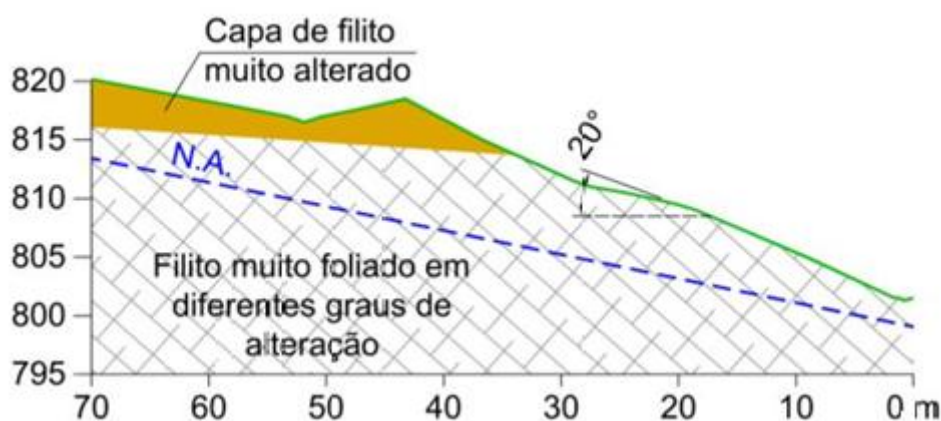


Figura 6.14 - Perfil geotécnico do maciço (Fonte: Silva *et al.*, 2018).

O solo residual de filito apresenta elevada resistência à perfuração nas sondagens à percussão e rotativas, exigindo equipamentos e esforços comparáveis aos empregados em

rochas sãs. Entretanto, esses esforços não refletem a resposta mecânica do maciço, cujo comportamento é governado pela anisotropia estrutural. A maior parte das sondagens foi rotativa, atingindo profundidades de 15 m a 45 m, sem atingir rocha sã. Estas indicaram um material pouco heterogêneo e alterado (sem recuperação) de baixa resistência. Conforme descrito por Silva *et al.* (2018), a foliação marcante dos filitos define planos preferenciais de fraqueza, que condicionam os mecanismos de ruptura observados em taludes desse tipo de material.

O modelo geológico-geotécnico conceitual é apresentado na Figura 6.15, destacando a influência da foliação, o papel dos acúmulos sazonais de água, a formação de trincas sucessivas e o direcionamento dos deslocamentos em direção à rodovia. A figura sintetiza o mecanismo de deslizamento lento interpretado para o MA04, envolvendo o rebaixamento e o avanço progressivo do colúvio sobre o filito mais estruturado.

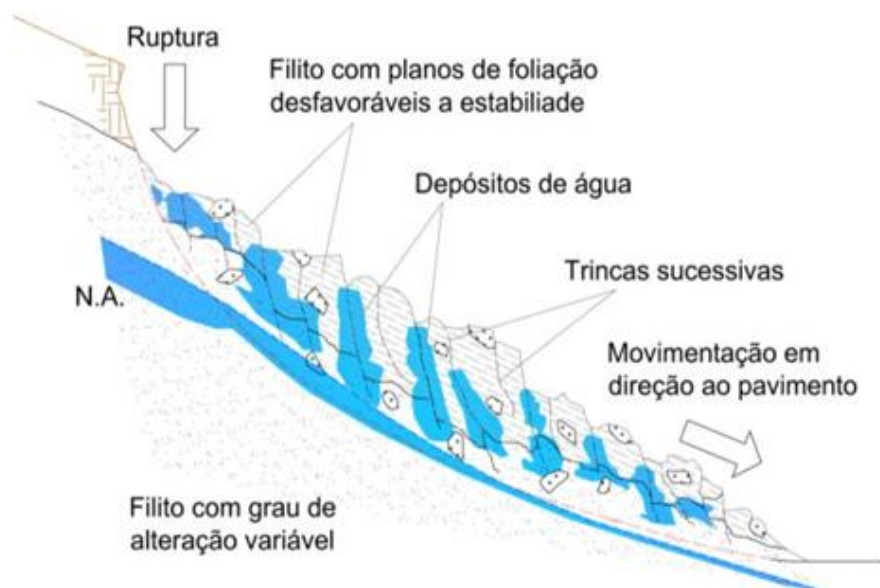


Figura 6.15 - Modelo geológico-geotécnico do mecanismo de deslizamento do maciço MA04 (Fonte: Silva *et al.*, 2018).

A instrumentação geotécnica instalada no talude, representada na Figura 6.16, permitiu identificar a posição aproximada da superfície de ruptura, bem como registrar a variação de deslocamentos ao longo do tempo. Verificou-se que o inclinométrico I1 apresentou aceleração dos deslocamentos nos períodos em que o nível d'água se aproximava do $NA_{máx}$, reduzindo-se significativamente quando o NA se deslocava para cotas mais baixas. Esse comportamento foi um dos fundamentos discutidos no artigo Silva *et al.* (2018), associado à sensibilidade do colúvio à variação do regime hídrico.

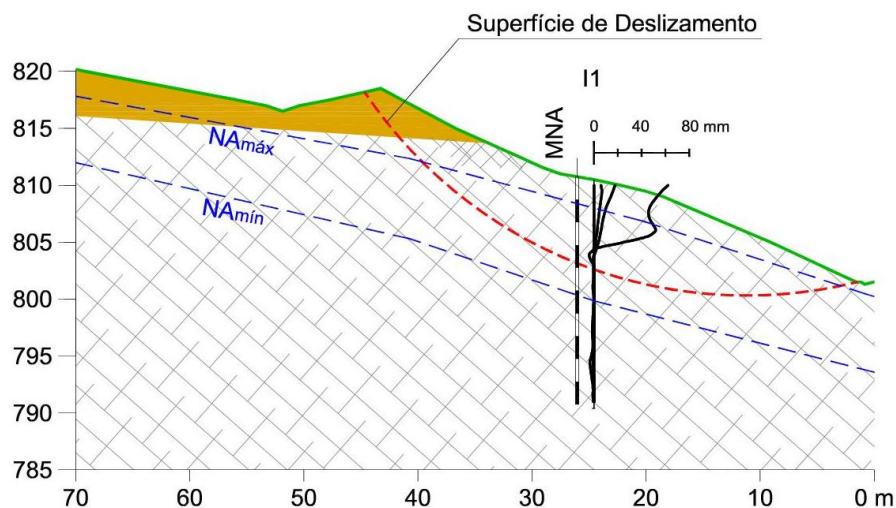


Figura 6.16 - Seção com N.A. máximo e mínimo, MNA de referência, inclinometria e a superfície de deslizamento (Fonte: Silva *et al.*, 2018).

As retroanálises (Figura 6.17) realizadas em períodos distintos conduziram a conjuntos diferentes de parâmetros de resistência, embora o mecanismo de ruptura permanecesse essencialmente o mesmo. Aventou-se a hipótese de que essa diferença poderia refletir não apenas a variação do nível d'água, mas também a mobilização de uma componente viscosa de resistência, compatível com a aceleração temporária dos deslocamentos observada no inclinômetro.

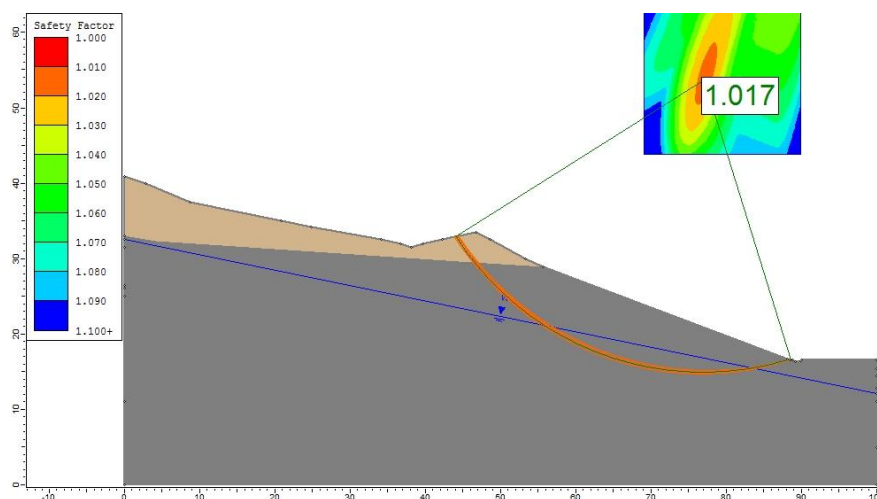


Figura 6.17 - Resultado do estudo de retroanálise.

Essa hipótese motivou, posteriormente, a realização de ensaios de cisalhamento direto em diferentes velocidades de deformação com o material coluvionar (AM09, AM10, AM11, AM12 e AM14). A AM14, ensaiada em 2018 e novamente em 2019, permitiu compreender a

influência da taxa de cisalhamento no comportamento resistente. Os resultados dos ensaios conduzidos em três velocidades (0,20 mm/min, 0,055 mm/min e 0,0055 mm/min) confirmaram a interpretação proposta em Silva *et al.* (2018): as maiores velocidades de cisalhamento resultaram em picos de resistência mais elevados, enquanto ensaios conduzidos em velocidades menores apresentaram comportamento mais dúctil, com valores convergindo para a resistência residual. Essa validação experimental consolidou a interpretação de que o colúvio do MA04 apresenta comportamento viscoplástico, no qual a resistência mobilizada depende da taxa de deformação.

Assim, o comportamento do MA04 resulta da interação entre foliação estrutural, regime hídrico variável e taxa de deformação, explicando simultaneamente as diferenças entre retroanálises realizadas em anos distintos e o padrão de deslocamentos registrados pela instrumentação. Essa compatibilização entre campo e laboratório fortalece a compreensão do comportamento geotécnico de colúvios derivados de filitos e demonstra a importância da consideração de efeitos viscosos na análise deste tipo de maciço.

6.5 - MA05 - km 590+400

O maciço MA05 localiza-se na Serra da Moeda, em região caracterizada por encostas íngremes constituídas por filitos muito alterados, fortemente foliados e submetidos a condições hidrogeológicas variáveis. Segundo Silva *et al.* (2020b), os movimentos de massa observados ao longo desta vertente são condicionados pela anisotropia estrutural, pela espessura da capa residual e pelas oscilações do nível d'água, que controlam a resistência efetiva mobilizada ao longo das superfícies de deslizamento. O comportamento geotécnico é fortemente condicionado pela anisotropia e pela orientação das foliações, nas quais foi observada predominância de mergulhos voltados para o fundo do vale.

Para caracterizar o maciço, foram executados levantamento topográfico detalhado, sondagens à percussão e rotativas e a instalação de instrumentação geotécnica, incluindo inclinômetro e piezômetro. Esses dados permitiram definir a geometria do talude, a estratigrafia e as condições hidráulicas prevalentes. Com base nessas informações, elaborou-se o perfil geológico-geotécnico da área, mostrado na Figura 6.18, no qual se destacam a capa de filito muito alterado, o filito intensamente foliado em diferentes graus de alteração e as linhas representativas do nível d'água mínimo e máximo observados durante o monitoramento. Na Figura 6.18 apresenta-se a solução de reforço da contenção e os perfis de deslocamentos horizontais em profundidade registrados pelo inclinômetros.

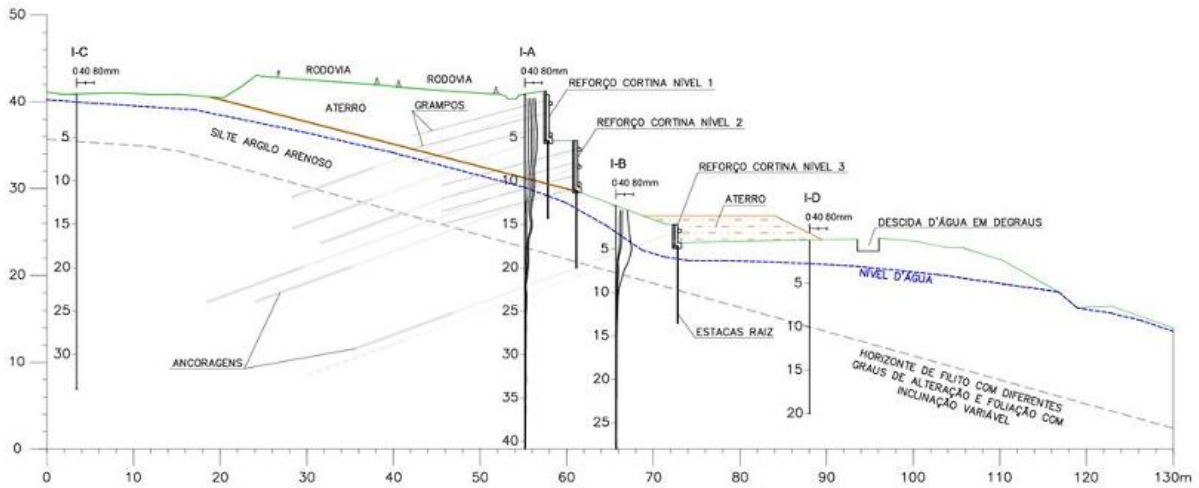


Figura 6.18 - Seção transversal com indicação do perfil geotécnico, inclinometria e nível d'água.

Ensaio laboratoriais de cisalhamento direto e compressão triaxial foram realizados para determinar os parâmetros de resistência dos materiais constituintes do maciço (Figura 6.26). Conforme apresentado por Silva *et al.* (2020b), os resultados mostram que a camada superficial apresenta baixa coesão e ângulo de atrito moderado, enquanto os materiais mais profundos exibem envelopes de resistência distintos associados ao grau de alteração e à orientação da foliação. A integração desses resultados com a geometria e as condições observadas em campo permitiu estabelecer hipóteses consistentes para a retroanálise.

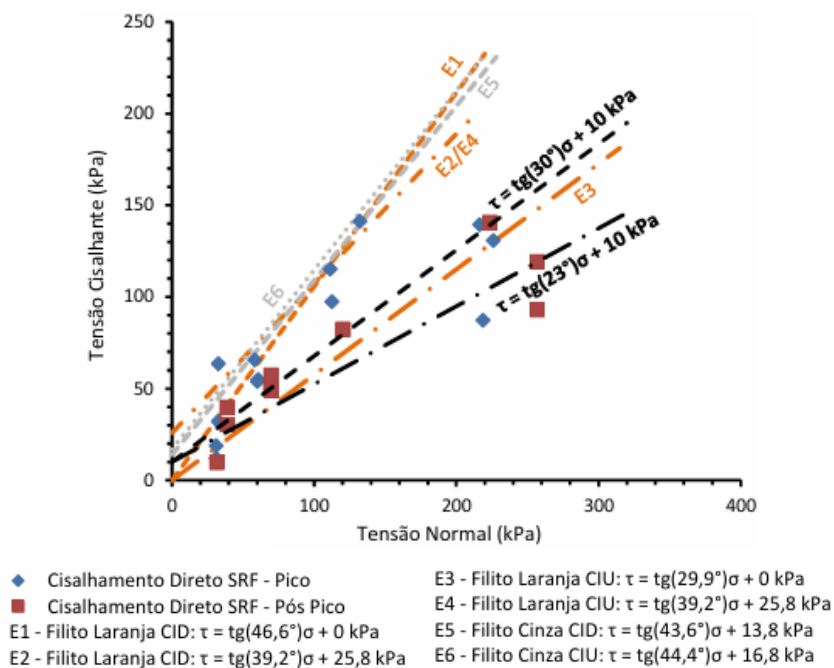


Figura 6.19 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial do filito (Fonte: Silva *et al.*, 2020b).

A retroanálise do estado anterior às intervenções foi conduzida considerando as condições hidráulicas mais desfavoráveis registradas pelo piezômetro e a superfície de ruptura identificada pelo inclinômetro. Com base na geometria reconstruída, Silva *et al.* (2020b) obtiveram um fator de segurança próximo da unidade ($FS \sim 1,05$), coerente com a condição de instabilidade observada. A Figura 6.20 apresenta o resultado da retroanálise antes das intervenções, evidenciando a superfície crítica compatível com o comportamento monitorado.

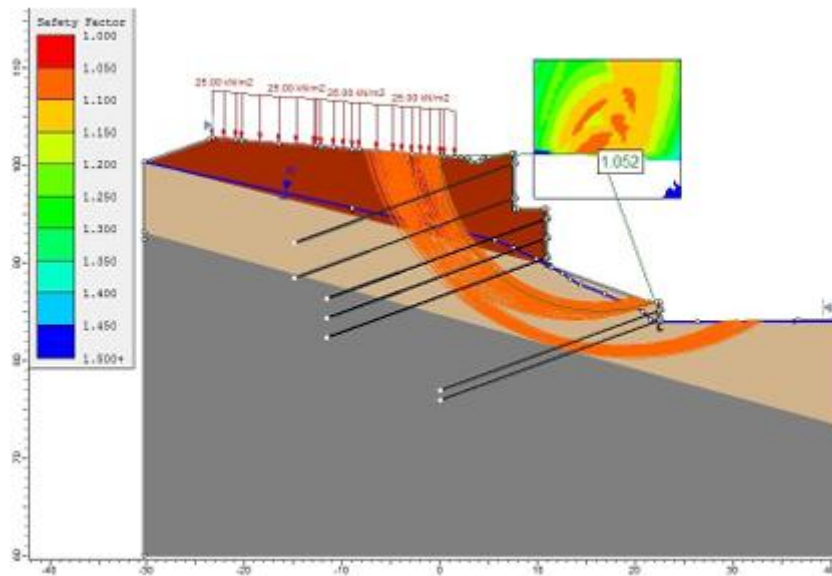


Figura 6.20 – Resultados do estudo de retroanálise na seção adjacente à ruptura (Fonte: Silva *et al.*, 2020b).

A partir dos parâmetros obtidos na retroanálise e confrontados com as envoltórias de resistência determinadas nos ensaios, foi possível avaliar a necessidade de medidas de reforço para a porção remanescente do talude. Demonstra-se que, com os parâmetros determinados e considerando as condições hidráulicas medidas, a estabilidade natural da encosta não seria garantida, justificando a adoção de um sistema de contenção reforçado. A solução projetada, apresentada na Figura 6.21, consistiu em cortina ancorada, bermas intermediárias, grampeamento e sistema de drenagem profunda e superficial. Após a implementação das intervenções, o fator de segurança obtido nas análises numéricas aumentou significativamente ($FS > 1,50$), confirmando a eficácia do reforço.

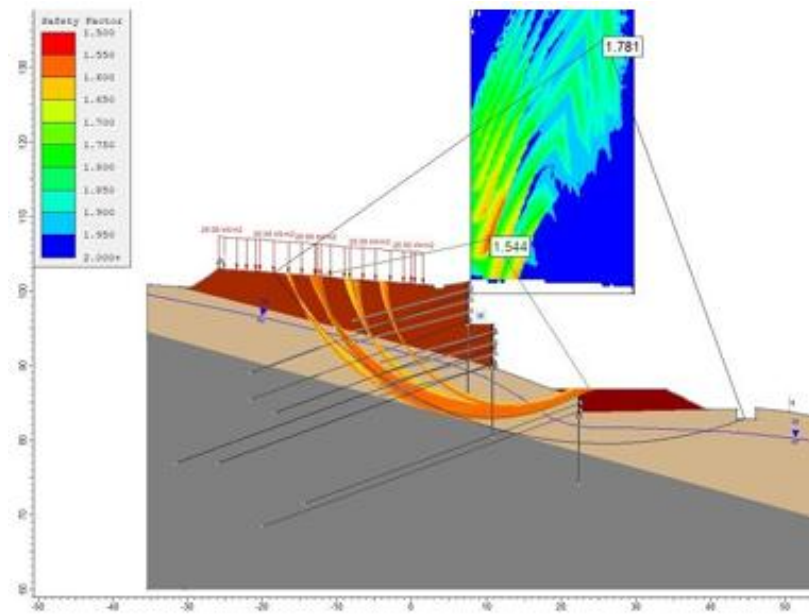


Figura 6.21 – Análise de estabilidade da solução de reforço da contenção (Fonte: Silva *et al.*, 2020b).

Assim, o caso MA05 ilustra de forma clara a importância da compatibilização campo-laboratório nas análises de estabilidade de taludes em filito alterado. A articulação entre instrumentação, ensaios e retroanálise permitiu determinar parâmetros de resistência consistentes com o comportamento do maciço, orientar o projeto de contenção e validar, numericamente, a eficácia da intervenção.

7 - 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 com intenção de complementar os resultados e a compreensão até aqui obtidos.

7.1 - CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o comportamento geotécnico de solos residuais derivados de filito no Quadrilátero Ferrífero, integrando resultados de ensaios laboratoriais, observações estruturais e informações obtidas nos maciços estudados. As análises permitiram compreender como a anisotropia estrutural, o grau de saturação e o estágio de deformação influenciam o desempenho geotécnico desses materiais.

A caracterização geológica confirmou a presença de foliações preservadas nos perfis estudados. As campanhas de sondagem SPT e rotativa registraram valores elevados de resistência à cravação, mas essas observações não correspondem ao comportamento obtido nos ensaios de resistência ao cisalhamento, evidenciando que a resposta do solo residual de filito depende predominantemente da orientação das foliações. A resistência mobilizada durante as sondagens, solicitando o material de maneira aproximadamente perpendicular às estruturas, não representa a resistência efetiva ao longo dos planos nos quais o cisalhamento tende a se desenvolver.

Os ensaios de cisalhamento direto mostraram que a resistência ao cisalhamento é sensível ao grau de saturação e à orientação da foliação. Em condição inundada, observou-se redução significativa da coesão, associada à eliminação da sucção. Também se verificou que a resistência de pico ocorre em pequenas deformações e tende a reduzir de forma expressiva à medida que o cisalhamento progride, aspecto típico de solos estruturados e que deve ser considerado na interpretação dos parâmetros resistentes. Os parâmetros obtidos apresentaram ampla variação, refletindo a anisotropia estrutural e o alinhamento entre planos de foliação e planos potenciais de ruptura.

Os ensaios triaxiais, tanto do tipo CID quanto CIU, contribuíram para a avaliação das trajetórias de tensão, mas não captaram completamente o comportamento anisotrópico do solo residual de filito. Como o plano de ruptura não é controlado nesse tipo de ensaio, a foliação nem sempre é mobilizada, o que tende a resultar em valores de resistência superiores aos

observados no cisalhamento direto. Esse comportamento é típico de solos estruturados e reforça a necessidade de considerar a orientação das foliações na caracterização dos maciços.

Os resultados de permeabilidade indicaram valores compatíveis com materiais siltosos, porém insuficientes para descrever o regime de fluxo em escala de talude. Verificou-se que a circulação de água depende principalmente da estrutura do maciço, incluindo foliações, trincas e contatos litológicos contrastantes. Essa configuração controla a distribuição de pressões neutras e a conectividade hidráulica ao longo do perfil, influenciando diretamente a resposta do maciço em condições de variação de saturação.

A comparação entre os ensaios de cisalhamento direto na condição embebida e os dados de monitoração mostrou coerência entre a redução da resistência provocada pelo aumento do grau de saturação e a mobilização de deslocamentos em campo. Nos maciços MA04 e MA05, variações registradas pelos medidores de nível d'água e pelos piezômetros foram acompanhadas por deslocamentos detectados nos inclinômetros. Em laboratório, verificou-se a perda praticamente completa da coesão efetiva na condição saturada, fenômeno consistente com o comportamento observado nos maciços monitorados.

De forma geral, verificou-se nos maciços analisados uma tendência consistente de redução marcante entre os parâmetros de pico e pós-pico quando a ruptura se desenvolve ao longo de planos pré-existentes de fraqueza. Um exemplo representativo ocorre no MA04, no qual a coesão efetiva reduziu de 49 para 12 kPa na condição embebida, correspondendo a uma diminuição superior a 70% após o estabelecimento da superfície de cisalhamento.

Essa perda de resistência é compatível com a atuação de *slickensides*, sejam eles herdados da estrutura do protólito, sejam desenvolvidos posteriormente por creep. Mesmo quando cicatrizados, esses planos não recuperam o intertravamento original. A interface resultante é lisa, por vezes espelhada, e apresenta resposta pós-pico de caráter frágil devido à ausência de intertravamento, com resistência controlada por uma cimentação devido ao processo de laterização. Essa hipótese é sustentada pelos resultados de FRX, que indicam enriquecimento relativo em óxidos de ferro e alumínio nas amostras analisadas. Assim, esses planos apresentam resistência mecânica inferior e ruptura de caráter frágil em relação ao material circundante, favorecendo reativações mesmo sob variações moderadas de carregamento.

De modo geral, os resultados obtidos revelam que a resistência, a permeabilidade e a própria resposta hidromecânica dos solos residuais de filito não podem ser compreendidas de forma isolada. A interação entre estrutura reliquiar, variação de umidade e estágio de deformação define o comportamento desses materiais, tanto em laboratório quanto em

condições de campo. A combinação entre anisotropia estrutural, eliminação de sucção e desenvolvimento de superfícies de cisalhamento progressivas explica a amplitude de variação observada nas envoltórias de resistência e no regime de fluxo. Assim, a interpretação integrada dos ensaios e das evidências estruturais reforça que a estabilidade dos maciços depende essencialmente da forma como essas descontinuidades são mobilizadas, conectadas e reativadas ao longo do tempo.

As investigações de campo e os ensaios de laboratório mostraram que o comportamento dos solos residuais de filito é governado pela interação entre a estrutura herdada da rocha, o grau de saturação e a evolução das deformações. Os resultados convergiram ao indicar que a mobilização da resistência depende do alinhamento entre a sollicitação e os planos estruturais, o que reforça que a resposta do maciço não pode ser compreendida apenas com base em parâmetros obtidos em condições controladas. Dessa forma, a caracterização e a interpretação de maciços constituídos por materiais estruturados exigem a consideração conjunta dos aspectos geológicos, hidráulicos e mecânicos que condicionam a formação e a progressão das superfícies de ruptura.

7.2 - SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Considerando os avanços obtidos neste estudo, identificam-se oportunidades para aprofundamento em trabalhos futuros, entre as quais se destacam:

- Construir modelos numéricos que representem a orientação estrutural do filito, a fim de avaliar seus efeitos mecânicos e hidráulicos no comportamento dos solos residuais.
- Realizar análises probabilísticas de estabilidade, incorporando a variabilidade e as incertezas dos parâmetros anisotrópicos de resistência e permeabilidade dos solos residuais de filito.
- Avaliar numericamente o efeito da sucção na resistência ao cisalhamento, utilizando curvas solo-água (SWCC) e relações da literatura para estimar a perda de resistência durante a embebição.
- Avaliar a utilização de diferentes critérios de resistência, incluindo o modelo de Hoek-Brown, na representação do comportamento mecânico de solos residuais de alteração de filito, em função da resposta mecânica pseudo-rochosa associada ao caráter estrutural herdado desses materiais.

- Realizar amostragens orientadas integradas ao mapeamento estrutural e geomorfológico, visando compreender como a orientação da foliação e as variações do relevo controlam a gênese e a evolução das instabilidades nos maciços estudados.
- Aplicar ensaios de abrasão Los Angeles para avaliar a susceptibilidade à degradação mecânica dos solos residuais de alteração de filitos, visando evidenciar processos de ciclagem, desagregação progressiva e seus efeitos na redução de resistência

Essas linhas complementares podem consolidar a compreensão do comportamento dos solos residuais derivados de filito e fortalecer a aplicabilidade de metodologias de análise e projeto em terrenos de alta complexidade estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (2009). NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2020). NBR 13601: Solo — Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). Rio de Janeiro.
- ABNT. (2022). NBR 14114: Solo — Solos argilosos dispersivos — Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (pinhole test). Rio de Janeiro.
- ABNT. (2021). NBR 14545: Solo — Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2016). NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e de caracterização. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2016). NBR 6459: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2016). NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2016). NBR 7181: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. (2024). Ferro 2024 – ano-base 2023. Sumário Mineral Brasileiro. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2024/ferro-2024-ano-base-2023>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- ARAI, T. (2006). Introduction. In: BECKHOFF, B.; KANNGIESSER, B.; LANGHOFF, N.; WEDELL, R.; WOLFF, H. (eds.). Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis. Berlin; Heidelberg: Springer, p. 1–32.
- ASTM (2011). D2487-11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM (2011). D3080-11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM (2020). D2435/D2435M-11: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM (2011). D4767-11: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM (2016). D5298-16: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM (2020). D7181-20: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- AUGUSTO FILHO, O. (1992). Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS – COBRAE, 1., Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro, RJ: ABMS/ABGE, p. 721–733.
- BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. (2007). Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 471–499.
- BECKHOFF, B.; KANNGIEBER, B.; LANGHOFF, N.; WEDELL, R.; WOLFF, H. (orgs.). (2006). *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. Berlin; Heidelberg: Springer.
- BICALHO, K. V.; CORREIA, A. G.; FERREIRA, S.; FLEUREAU, J.-M.; MARINHO, F. A. M. (2007). Filter paper method of soil suction measurement. XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Margarita, Venezuela, 1–6.
- BURDINE, N. T. (1953). Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Petroleum Transactions, AIME*, v. 198, p. 71–75.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; SILVA MELO, M. T. (2006). *Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro*. Finatec/UnB, Brasília, DF, 464 p.
- CAMPOS, T. M. P.; CARRILHO, P. L. (1995). Ajuste hiperbólico de curvas tensão-deformação em ensaios de cisalhamento direto. *Solos e Rochas*, v. 18, n. 3, p. 203–213.
- 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.
- CASTRO, P. T. A.; ENDO, I.; GANDINI, A. L. (orgs.). (2020). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. 3i Editora, Belo Horizonte, MG.
- CASTRO, P. T. A.; NALINI JÚNIOR, H. A.; LIMA, H. M. de. (2015). *Entendendo a mineração no Quadrilátero Ferrífero*. Belo Horizonte, MG: Ecológico – Comunicação em Meio Ambiente. Disponível em: https://qfe2050.ufop.br/sites/default/files/qfe2050/files/quadrilatero_ferriero_portugues.pdf. Acesso em: 22 mai. 2025.
- CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). Influence of weathering on the strength of London Clay. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 25, p. 252–260.
- CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. (1986). Influence of stress history and laboratory procedures on the soil-water characteristic curves of London Clay. *Géotechnique*, v. 36, n. 1, p. 41–49.
- COSTA, T. A. V. da. (2009). *Caracterização geológico-geotécnica e modos de ruptura do minério hematítico friável nas minas da Vale, borda oeste do Quadrilátero Ferrífero – MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

- DAS, B. M. (2013). Principles of Geotechnical Engineering. 8th ed. Stamford, CT: Cengage Learning.
- DE MELLO, V. F. B. (1972). Thoughts on Soil Engineering Applicable to Residual Soils. In: SOUTHEAST ASIAN CONFERENCE ON SOIL ENGINEERING, 3., 1972, Hong Kong. Proceedings... Hong Kong: [s.n.], p. 1–34.
- DILÁSCIO, M. V (2005). Estabilidade de taludes em filitos na Região Metropolitana de Belo Horizonte – mecanismos não convencionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 16., 2005, Salvador. Anais... Salvador, BA: ABMS.
- DILÁSCIO, M. V. & FIGUEIREDO, R.P. (2005). Estudo computacional do mecanismo de tombamento flexural em filitos. REM: Revista Escola de Minas, 58(1): 21-26.
- DORR, J. V. N. (1969). Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1969. (Geological Survey Professional Paper, 641-A).
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. (2005). Soil Strength and Slope Stability. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- DUNNICLIFF, J. (1988). Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. New York, NY: John Wiley & Sons.
- EHRlich, M.; COSTA, D. P.; SILVA, R. C. (2018). Behavior of a colluvial slope located in southeastern Brazil. Landslides. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0964-6>.
- ENDO, I.; GALBIATTI, H. F.; DELGADO, C. E. R.; OLIVEIRA, M. M. F.; ZAPPAROLI, A. C.; MOURA, L. G. B.; PERES, G. G.; OLIVEIRA, A. H.; ZAVAGLIA, G.; DANDERFER FILHO, A.; GOMES, C. J. S.; CARNEIRO, M. A.; NALINI JR., H. A.; CASTRO, P. T. A.; SUITA, M. T. F.; TAZAVA, E.; LANA, C. C.; MARTINS-NETO, M. A.; MARTINS, M. S.; FERREIRA FILHO, 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: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969). Ouro Preto: Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero. Disponível em: <<https://qfe2050.ufop.br/mapa-geologico-doquadrilatero-ferrifero-2019>>. Acesso em: out. 2025.
- FEUERHARMEL, C. (2003). Aspectos do comportamento não saturado de dois solos coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- FERNANDES, J. A. (2011). Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentim, RS. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York, NY: John Wiley & Sons.

- FREDLUND, D. G.; XING, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, n. 3, p. 521–532.
- FREIRE, E. P. (2001). Ensaio Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROÇÃO, 7., 2001, Goiânia. Anais... Goiânia, GO: ABGE/IBGE/UFGO.
- FUNDAÇÃO GEO-RIO. (2014). Manual Técnico de Encostas. v. 1. Rio de Janeiro, RJ: GEO-RIO.
- GARCIA, F. A. F.; IYOMASA, W. S. (2018). Contribuição acerca dos parâmetros geomecânicos do filito Itaberaba em condições específicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 18., 2018, São Paulo. Anais... São Paulo, SP: ABGE.
- GARDNER, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, v. 85, n. 4, p. 228–232.
- GERSCOVICH, D. M. S. (2016). Estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos.
- GOFAR, N.; KASSIM, K. A.; LEE, L. M. (2008). Effect of relict joint on the mass permeability of residual soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITE CHARACTERIZATION – ISC-3, 3., 2008, Taipei. Proceedings... London: Taylor & Francis, 2008. p. 141–146.
- GOMES, T. B. G. (2021). Comportamento de um maciço em solo residual de filito adjacente a uma cava de mineração. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- GRANDO, Â. (2011). Monitoramento e modelagem hidrossedimentológica em uma microbacia hidrográfica experimental. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- GRAY, D. H.; LEISER, A. T. (1982). *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. New York, NY: Van Nostrand Reinhold.
- GROTZINGER, J.; JORDAN, T. (2013). *Para entender a terra*. 6. ed. Porto Alegre, RS: Bookman.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. (1984). Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo, SP: Blucher, 302 p.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. (2012). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, 900 p.
- HEAD, K. H. (1982). *Manual of soil laboratory testing. Volume 2: Permeability, shear strength and compressibility tests*. London: Pentech Press.

- HOEK, E. & BRAY, J.W. (1977). Rock slope engineering. Cambridge: The Institution of Mining and Metallurgy.
- HOEK, E. (1983). *Strength of jointed rock masses*. Géotechnique, v. 33, n. 3, p. 187–223.
- INDERBITZEN, A. P. L. (1961). An erosion test for soils. Materials Research Standards, p. 553–554.
- LAMBE, P. C. (1996) Residual soils. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (ed.). Landslides: Investigation and Mitigation. Washington, D.C.: TRB/NRC, p. 507-524. (Special Report, 247).
- LACERDA, W. A. (2004) The behavior of colluvial slopes in a tropical environment. In: Landslides: Evaluation and Stabilization / Glissement de Terrain: Evaluation et Stabilisation. Leiden: Balkema, p. 1315–1342. DOI: 10.1201/b16816-191.
- LEÃO, M. F.; BARROSO, E. V.; POLIVANOV, H.; MARQUES, E. A. G.; VARGAS JÚNIOR, 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, v. 40, n. 3, p. 398–406.
- LEONG, E. C.; HE, L.; RAHARDJO, H. (2002). Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. Geotechnical Testing Journal, v. 25, n. 3, p. 322–335.
- LOPES, M. B. L. (2006). Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- MARINHO, F. A. M. (1997). Medição de sucção em solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3., 1997, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 1997. p. 373–397.
- MARINHO, F. A. M. (1995). A técnica do papel filtro para a medição de sucção. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, RS: [s.n.], p. 112–125.
- MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. (2006). The filter paper method revisited. Geotechnical Testing Journal, v. 29, n. 3, p. 250–258.
- MARSHAK, S.; ALKMIM, F. F. (1989). Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. Tectonics, v. 8, n. 3, p. 555–571.
- MCQUEEN, I. S.; MILLER, R. F. (1968). Calibration and evaluation of a wide-range gravimetric method for measuring moisture stress. Soil Science, v. 106, p. 225–231.
- MITCHELL, J. K. (1976). Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, New York, USA, 422 p.

- MORAES, L. R. (2022). Melhoria de um solo dispersivo com o aditivo lignosulfonato de cálcio. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- MUALEM, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v. 12, n. 3, p. 513–522.
- PARIZZI, M. G.; SOBREIRA, F. G.; GALVÃO, T. C. B.; ARANHA, P. R. A.; ELMIRO, M. A. T.; BEIRIGO, E. A. (2011). Processos de movimentos de massa em Belo Horizonte, MG. *Geografias (UFMG)*, v. 7, n. 1, p. 58–87.
- PELOGGIA, A. U. G. (1997). Parâmetros geomecânicos de solos saprolíticos do município de São Paulo (SP). *Solos e Rochas*, v. 20, n. 3, p. 209–213.
- PIMENTEL, J.; TEIXEIRA, C. Z.; SILVA, F. M. (2005). Geotecnia. Projeto APA Sul RMBH: Estudo do Meio Físico. Belo Horizonte, MG: CPRM/SEMAD/CEMIG.
- PIRES, R. R.; RIBEIRO JÚNIOR, I. (2016). Estudo da resistência ao cisalhamento dos solos residuais saprolíticos de filito da Baixada Cuiabana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, MG: ABMS.
- PINTO, C. S.; GOBARA, W.; PERES, J. E. E.; NADER, J. J. (1993). Propriedades dos solos residuais. In: CINTRA, J. C. A.; ALBIERO, J. H. (eds.). *Solos do Interior de São Paulo*. São Carlos, SP: ABMS/USP, cap. 5, p. 95–142.
- PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J., JORDAN, T.H. (2006). Para entender a terra. Ed. Bookman, Porto Alegre, RS, 768 p.
- RAMMLMAIR, D.; MÜLLER, A.; BAUWEN, J.; SOBOLIK, M. (2005). Advances in X-ray spectrometry for mineral exploration. *Spectrochimica Acta Part B*, v. 60, p. 87–105.
- RAMSAY, J. G.; HUBER, M. I. (1987). *The Techniques of Modern Structural Geology*. v. 2: Folds and Fractures. London, UK: Academic Press.
- RICCIO FILHO, M. V. (2007). Comportamento de um muro de solo reforçado com solos finos tropicais. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- RODRIGUES, S.; SATHLER, L.; ROCHA, G.; LOURES, S. (2023). Caracterização geológico-geotécnica dos solos de alteração do filito dolomítico provenientes da Formação Fecho do Funil, Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 34., 2023, Foz do Iguaçu. Anais... Rio de Janeiro, RJ: CBDB.
- ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JUNIOR, F. (2000). Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero: uma visão geral e discussão. *Geonomos*, v. 8, n. 2, p. 27–43.
- SANGLARD, J. C. D.; 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. *Geologia USP. Série Científica*, São Paulo, Brasil, v. 14, n. 1, p. 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.
- SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R. (1976). Pinhole test for identifying dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, v. 102, n. GT1, p. 69–85.
- SILVA, C.H. & LANA, M.S. (2014). Numerical modeling of buckling failure in a mine slope. *REM: Revista Escola de Minas*, 67(1): 81-86. DOI: 10.1590/S0370-44672014000100012.
- 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.
- SILVA, R. C. (2010). Análise do comportamento de estruturas de solo grampeado através da monitoração de obra e modelos físicos (escala 1:1). Dissertação de Mestrado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- 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: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. Anais... Salvador, BA: ABMS.
- SILVA, R. C.; GOMES, T. B. G.; EHRLICH, M.; COSTA, D. P. (2020a). Comportamento de um maciço em solo residual de filito adjacente a uma cava de mineração no Quadrilátero Ferrífero. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Campinas. Anais... Campinas, SP: ABMS.
- SILVA, R. C.; COSTA, D. P.; EHRLICH, M. (2020b). Análise do comportamento de cortina ancorada executada sobre solo de filito. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Campinas. Anais... Campinas, SP: ABMS.
- SKEMPTON, A. W. (1964). Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique*, v. 14, n. 2, p. 77–101.
- SKEMPTON, A. W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Géotechnique*, v. 35, n. 1, p. 3–18.
- SOARES, E. P. (2008). Caracterizações geotécnica e mineralógica de um filito dolomítico do Quadrilátero Ferrífero com vistas ao estudo de estabilidade de taludes incorporando a sucção. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SOUZA, L. A. P.; GANDOLFO, O. C. B. (2012). Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, v. 2, n. 2, p. 7–30.

- TALIB, Z. A.; KASSIM, K. A.; YUNUSA, G. H. (2016). Influence of relict joints on permeability of residual soil. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 136, p. 1–9..
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1967. 729 p.
- VAN GENUCHTEN, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, v. 44, p. 892–898.
- VARNES, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (eds.). Landslides: Analysis and Control. Washington, DC: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 1978. (Special Report, 176). p. 11–33.
- VIEIRA, L.H.; LEITE, M.L.; RODRIGUEZ, T.T. (2017). Erodibilidade dos Solos Residuais do Complexo Juiz de Fora. GEOCENTRO 2017, Goiânia, GO, Brasil, 1-6.