

RODRIGO DE ANDRADE MACHADO

VARIAÇÃO SAZONAL DA SUCÇÃO MATRICIAL E ESTABILIDADE DE
TALUDES DE SOLOS RESIDUAIS NÃO SATURADOS.

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2005

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M149v
2005

Machado, Rodrigo de Andrade, 1979-

Variação sazonal da sucção matricial e estabilidade de taludes de solos residuais não saturados. / Rodrigo de Andrade Machado. – Viçosa: UFV, 2005.
xv, 122f : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referência bibliográfica: f.103-108.

1. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 2. Solos Compactação. 3. Mecânica do solo. 4. Cisalhamento. I. Universidade Federal de Viçosa. II.Título.

CDD 22.ed. 624.15136

RODRIGO DE ANDRADE MACHADO

**VARIAÇÃO SAZONAL DA SUCÇÃO MATRICIAL E ESTABILIDADE
DE TALUDES DE SOLOS RESIDUAIS NÃO SATURADOS.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

Aprovada: 8 de Julho de 2005.

Dr. Paulo Roberto Costa Cella

Dr. José Luiz Rangel Paes

Prof. Dario Cardoso de Lima
(Conselheiro)

Prof. João Tinoco Pereira Neto
(Conselheiro)

Prof. Cláudio Henrique de Carvalho Silva
(Orientador)

A Deus.
Aos meus pais e à Gesane.

Agradecimentos

A Deus, pela vida.

A todos os professores que participam do programa de pós-graduação da UFV, aos quais sempre pude recorrer.

A todos os funcionários do LEC, que contribuíram muito para realização deste trabalho.

Aos meus familiares, a Gesane, e aos meus amigos, que estiveram sempre presentes, pelo apoio e pela compreensão.

À Universidade Federal de Viçosa e à CAPES, pelo apoio na realização deste trabalho.

Em especial, aos professores Cláudio, Dario, Paulo Sérgio e Ferraz, ao técnico Julinho e aos alunos de graduação Aline, Messias, Priscila e Roberta, que me ajudaram na realização dos trabalhos de laboratório e campo e me deram idéias para o desenvolvimento e conclusão dessa pesquisa.

Biografia

RODRIGO DE ANDRADE MACHADO, filho de Carlos Taquete Machado e Maria Alice de Andrade Machado, nasceu em 21 de setembro de 1979, na cidade de Vitória-ES.

Em abril de 2003, graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, em Vitória-ES.

Em março de 2003, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil, com área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, submetendo-se à defesa de tese em 08 de julho de 2005.

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. Introdução	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Escopo da tese.....	4
2. Revisão de literatura.....	6
2.1. Introdução	6
2.2. Solos residuais.....	6
2.3. Sucção no solo.....	8
2.3.1. Generalidades.....	8
2.3.2. Componentes da sucção	9
2.3.3. Determinação da curva característica de retenção de água dos solos	
10	
2.3.4. Sucção matricial relacionada a parâmetros de resistência ao	
cisalhamento	11
2.4. Medidas de sucção: campo e laboratório.....	15
2.4.1. Tensiômetro	15
2.4.2. Técnica do papel-filtro.....	19
2.4.3. Câmara de pressão.....	20
2.5. Estabilidade de taludes	20

3.	Características da área de estudo.....	23
4.	Material e métodos.....	26
4.1.	Introdução	26
4.2.	Material	26
4.3.	Metodologia de campo	31
4.3.1.	Monitoramento da sucção matricial.....	32
4.4.	Metodologia de laboratório.....	41
4.4.1.	Ensaio para caracterização geotécnica dos solos.....	42
4.4.2.	Ensaio de resistência mecânica dos solos.....	42
4.4.3.	Ensaio para medição da sucção matricial com papel-filtro.....	43
4.4.4.	Ensaio para determinação da curva de retenção de água dos solos com câmara de pressão.....	48
4.4.5.	Análises de estabilidade	52
5.	Resultados e discussão.....	54
5.1.	Ensaio de caracterização	54
5.2.	Ensaio para medição de sucção.....	57
5.2.1.	Câmara de pressão.....	57
5.2.2.	Papel-filtro.....	64
5.2.3.	Tensiômetro	67
5.2.4.	Comparação entre os métodos.....	77
5.3.	Ensaio de resistência mecânica	79
5.3.1.	Ensaio de cisalhamento direto	79
5.3.2.	Ensaio triaxiais com umidade natural.....	81
5.3.3.	Comparação entre os métodos.....	84
5.4.	Comparação entre coesão e sucção.....	84
5.5.	Plantas plani-altimétricas	88
5.6.	Análise da estabilidade dos taludes	91

6.	Conclusões.....	100
7.	Recomendações para trabalhos futuros.....	102
8.	Referências bibliográficas	103
9.	Normas técnicas.....	109
10.	Apêndice.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfis de intemperismo: (A) rochas ígneas; (B) rochas metamórficas (DEERE, 1971).....	8
Figura 2 – Exemplo de curva característica de retenção de água no solo: (A) características típicas; (B) exemplos para os solos: arenoso, siltoso e argiloso.	10
Figura 3 – Envoltórias de ruptura para solos não-saturados.	13
Figura 4 – Tensiômetros convencionais com vacuômetro.....	15
Figura 5 – Tensiômetros com medidores de: (A) mercúrio; (B) vacuômetro analógico; (C) transdutor de pressão (tensímetro).....	17
Figura 6 – Localização dos taludes no mapa da cidade de Viçosa.	28
Figura 7 – Foto do talude VG.....	29
Figura 8 – Foto do talude MB.	30
Figura 9 – Tensiômetros e trado utilizado nas suas instalações nos solos em estudo.	32
Figura 10 – Célula desenvolvida para aplicação de vácuo nos tensiômetros.....	33
Figura 11 – Aferição dos tensiômetros.	34
Figura 12 – Gráfico dos resultados da calibração dos tensiômetros.	34
Figura 13 – Teste dos tensiômetros em laboratório.....	35
Figura 14 – Foto dos tensiômetros instalados no talude VG.	36
Figura 15 – Gráfico da curva característica do papel-filtro Whatman no 42, dada em FREDLUND e RAHARDJO (1993).....	44
Figura 16 – Corpos-de-prova moldados para realização da técnica do papel-filtro.	45
Figura 17: Representação da colocação dos papéis-filtros nos corpos-de-prova.	45
Figura 18 – Foto dos enrolados em papéis-filmes de PVC e papéis-alumínios e guardados em uma vasilha plástica para estabilização.	46

Figura 19 – Representação da retirada dos papéis-filtros para pesagem em balança de precisão.	46
Figura 20 – Representação da pesagem dos papéis-filtros após estufa com resfriamento das cápsulas em bloco de alumínio, em balança de precisão.....	47
Figura 21 – Processo de saturação dos corpos-de-prova através de aplicação de vácuo.....	50
Figura 22 – Corpos-de-prova em cima da pedra porosa.	50
Figura 23 – Aparelhagem para ensaio de câmara de pressão, com aplicação de pressão de ar dentro de uma panela de pressão.....	51
Figura 24 – Curvas granulométricas obtidas para as amostras VGRM, VGRJ, MBRM e MBRJ.....	56
Figura 25 – Curvas características de sucção obtidas para as amostras de solo do talude VG: (A) VGRM e (B) VGRJ.....	58
Figura 26 – Curvas características de sucção obtidas para as amostras de solo do talude MB: (A) MBRM e (B) MBRJ.	59
Figura 27 – Pontos ajustados para a curva característica das amostras de solo: (A) VGRM e (B) VGRJ.	62
Figura 28 – Pontos ajustados para a curva característica das amostras de solo: (A) MBRM e (B) MBRJ.	63
Figura 29 – Representação gráfica das leituras de sucção matricial e umidade média obtidas pelos tensiômetros de 30 e 90 cm de profundidade no talude VG.....	73
Figura 30 – Representação gráfica das leituras de sucção matricial e umidade média obtidas pelos tensiômetros de 30 e 90 cm de profundidade no talude MB.	74
Figura 31 – Dados climáticos da região de Viçosa: precipitação e evaporação.	76
Figura 32 – Comparação entre as sucções medidas pelos tensiômetro, método do papel-filtro e câmara de pressão para as amostras: (A)VGRM; (B) MBRM.	77
Figura 33 – Comparação entre as sucções medidas pelos método do papel-filtro e câmara de pressão para as amostras: (A)VGRJ; (B) MBRJ.	78
Figura 34 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto com corpos-de-prova na umidade natural e inundado, para a amostra MBRJ.	79

Figura 35 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto com corpos-de-prova na umidade natural e inundado, para a amostra MBRM.	80
Figura 36 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto com corpos-de-prova na umidade natural e inundado, para a amostra VGRJ.	80
Figura 37 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto com corpos-de-prova na umidade natural e inundado, para a amostra VGRM.	81
Figura 38 – Envoltória de ruptura para o gráfico de trajetória de tensões da amostra MBRJ.....	82
Figura 39 – Envoltória de ruptura para o gráfico de trajetória de tensões da amostra MBRM.	82
Figura 40 – Envoltória de ruptura para o gráfico de trajetória de tensões da amostra VGRJ.....	83
Figura 41 – Envoltória de ruptura para o gráfico de trajetória de tensões da amostra VGRM.....	83
Figura 42 – Gráfico de coesão aparente <i>versus</i> sucção matricial da amostra VGRJ.....	86
Figura 43 – Gráfico de coesão aparente <i>versus</i> sucção matricial da amostra VGRM.	86
Figura 44 – Gráfico de coesão aparente <i>versus</i> sucção matricial da amostra MBRJ.	87
Figura 45 – Gráfico de coesão aparente <i>versus</i> sucção matricial da amostra MBRM.	87
Figura 46 – Geometria do talude VG.	89
Figura 47 – Geometria do talude MB.....	90
Figura 48 – Análise da estabilidade do talude VG para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios triaxiais CIU-nat.....	92
Figura 49 – Análise da estabilidade do talude VG para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios de cisalhamento direto com o solo na umidade natural.	93

Figura 50 – Análise da estabilidade do talude VG para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios de cisalhamento direto com o solo inundado.	94
Figura 51 – Análise da estabilidade do talude MB para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios triaxiais CIU-nat.....	95
Figura 52 – Análise da estabilidade do talude MB para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios de cisalhamento direto com o solo na umidade natural.	96
Figura 53 – Análise da estabilidade do talude MB para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios de cisalhamento direto com o solo inundado.	97
Figura 54 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo MBRJ na umidade natural: (A) gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical <i>versus</i> deformação horizontal.	111
Figura 55 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo MBRJ inundado: (A) gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical <i>versus</i> deformação horizontal.	112
Figura 56 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo MBRM na umidade natural: (A) gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical <i>versus</i> deformação horizontal.	113
Figura 57 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo MBRM inundado: (A) gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical <i>versus</i> deformação horizontal.	114
Figura 58 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo VGRJ na umidade natural: (A) gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical <i>versus</i> deformação horizontal.	115
Figura 59 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo VGRJ inundado: (A) gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical <i>versus</i> deformação horizontal.	116
Figura 60 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo VGRM na umidade natural: (A) gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical <i>versus</i> deformação horizontal.	117

Figura 61 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo VGRM inundado: (A) gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal. 118

Figura 62 – Gráficos dos ensaios triaxiais do solo MBRJ: (A) tensão desviadora *versus* deformação axial; (B) deformação volumétrica *versus* deformação axial. 119

Figura 63 – Gráficos dos ensaios triaxiais do solo MBRM: (A) tensão desviadora *versus* deformação axial; (B) deformação volumétrica *versus* deformação axial. 120

Figura 64 – Gráficos dos ensaios triaxiais do solo VGRJ: (A) tensão desviadora *versus* deformação axial; (B) deformação volumétrica *versus* deformação axial. 121

Figura 65 – Gráficos dos ensaios triaxiais do solo VGRM: (A) tensão desviadora *versus* deformação axial; (B) deformação volumétrica *versus* deformação axial. 122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cronograma do monitoramento da sucção matricial feito através dos tensiômetros.....	36
Tabela 2 – Condições dos ensaios triaxiais.....	42
Tabela 3 – Condições dos ensaios de cisalhamento direto.....	43
Tabela 4 – Ensaios realizados pela técnica do papel-filtro	48
Tabela 5 – Dados dos corpos-de-prova das amostras de solo retiradas do talude MB.....	52
Tabela 6 – Dados dos corpos-de-prova das amostras de solo retiradas do talude VG	52
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de caracterização para as amostras de solo retiradas do talude VG	55
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de caracterização para as amostras de solo retiradas do talude MB	55
Tabela 9 – Classificação geotécnica das amostras de solo estudadas	57
Tabela 10 – Parâmetros utilizados no ajuste aos dados experimentais da curva característica de sucção no solo	61
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de papel-filtro para a amostra MBRM.	64
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de papel-filtro para a amostra MBRJ	65
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de papel-filtro para a amostra VGRM	66
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de papel-filtro para a amostra VGRJ.....	67
Tabela 15 – Leituras dos tensiômetros feitas no taludes.....	68
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento.....	84
Tabela 17 – Resultados das análises de estabilidade.....	98

RESUMO

MACHADO, Rodrigo de Andrade, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2005.
Varição sazonal da sucção matricial e estabilidade de taludes de solos residuais não saturados. Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.
Conselheiros: Dario Cardoso de Lima e João Tinoco Pereira Neto.

No presente trabalho é monitorada a sucção matricial e avaliado a estabilidade de dois taludes em solos residuais não saturados da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, na cidade de Viçosa, Brasil. O programa de trabalho envolveu as seguintes atividades: (i) levantamento plano-altimétrico dos taludes; (ii) instrumentação dos taludes com tensiômetros, para monitoramento da variação da sucção matricial no período de junho de 2004 a abril de 2005; (iii) determinação, via ensaio de laboratório, da variação do teor de umidade dos solos, considerando-se o período de junho de 2004 a abril de 2005; (iv) caracterização geotécnica dos solos incluindo a determinação de suas curvas características de sucção; (v) determinação da resistência ao cisalhamento, via ensaios triaxiais CIU em amostras naturais; (vi) determinação da resistência ao cisalhamento dos solos por meio de ensaios de cisalhamento direto com e sem inundação. Esses dados foram utilizados em análises de estabilidade dos taludes, empregando-se o software Geoslope. Os resultados mostraram que os fatores de segurança variaram de 1 a 2, para as condições inundada e não-saturada, respectivamente.

ABSTRACT

Machado, Rodrigo de Andrade, M.S., Universidade Federal de Viçosa, July 2005.
Seasonal variation of the matric suction and stability of slope on unsaturated residual soils. Adviser: Claudio Henrique de Carvalho Silva.
Counselors: Dario Cardoso de Lima and João Tinoco Pereira Neto.

This work was intended to study the variation of soil suction and evaluate the stability of two slopes in residual unsaturated soil, in Viçosa - MG, Brazil. The research tasks involved the following activities: (i) survey mapping with elevation of slopes; (ii) slope instrumentation with tensiometer, for monitoring the variation of matric suction from June 2004 to April 2005; (iii) determination of soil water content, through laboratory tests, considering the period from June 2004 to April 2005; (iv) geotechnical characterization of soils including determination of soil-water characteristic curve (SWCC); (v) determination of soil strength properties, through triaxial CIU tests performed in undisturbed samples; (vi) determination of soil shearing strength through direct shear testing with and without saturation. These experimental data were used in analyses of slope stability using Geoslope software. The slope stability analysis shown that factors of safety varied from 1 to 2, considering saturated and unsaturated conditions, respectively.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

Na Zona da Mata Norte de Minas Gerais, especificamente na área de influência geográfica da cidade de Viçosa, Brasil, tem-se observado a ocorrência de um grande número de deslizamentos de terra, geralmente em épocas de chuva. Isso indica que, com o aumento da pluviosidade, ocorre queda na resistência ao cisalhamento dos solos, com a conseqüente diminuição do fator de segurança e das condições de estabilidade desses taludes.

A partir de dados obtidos por PITANGA (2002), confirma-se a diferença na resistência ao cisalhamento dos solos dessa região quando se comparam os resultados de ensaios de cisalhamento direto para o solo no estado de umidade natural e no estado inundado ou saturado. A explicação para esse fato pode ser encontrada no estudo da Mecânica dos Solos Não-Saturados, em que aumentos no teor de umidade podem ser responsáveis por reduções na sucção e, conseqüentemente, na resistência ao cisalhamento dos solos.

LUÍS (2000) analisou as condições de estabilidade em solos residuais da cidade de Viçosa, mencionando a importância da análise da frente de saturação no fator de segurança. Foi observado que os taludes analisados em épocas de seca poderiam se desestabilizar com a ocorrência de um longo período de precipitação, provocando aumento da profundidade da frente de saturação.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, pode-se avançar nos estudos de resistência ao cisalhamento dos solos residuais não-saturados, com a incorporação de

instrumentação de campo para monitoramento de parâmetros importantes para a análise de estabilidade de taludes. Com o objetivo de estudar as variações das poropressões de água e ar e sua influência na resistência ao cisalhamento dos solos, é de interesse monitorar os valores de suas sucções matriciais e determinar os seus parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Em uma análise de estabilidade deve-se conhecer a geometria do talude e os parâmetros de resistência dos solos deste talude. A variação desses dois fatores implica uma variação no fator de segurança. As mudanças na geometria geralmente são ocasionadas pela ação do homem; já aquelas observadas nos parâmetros de resistência dos solos geralmente se devem à ação da variação da umidade do solo e intemperismo. A variação da umidade é devido a períodos chuvosos e secos. Os desmatamentos também contribuem para o aumento da variação da umidade e da erosão do solo.

A medição do valor da sucção matricial do solo é uma maneira que se pode utilizar para quantificar essa variação da umidade e relacionar com a variação da resistência mecânica do solo. Esse tratamento vem sendo apresentado nos estudos mais recentes da mecânica dos solos.

1.2. Justificativa

Os deslizamentos de solo são um dos desastres naturais que mais afligem os brasileiros. Por estar localizado em uma região tropical, o Brasil possui características que lhe conferem predisposição à ocorrência de fenômenos de deslizamentos, como alto índice pluviométrico no verão, espesso manto de intemperismo, que atinge dezenas de metros, e grande quantidade de frações silte e areia nos solos, com maior susceptibilidade aos agentes erosivos. Além disso, a ocupação desordenada das encostas tem gerado ambientes absolutamente propícios a problemas de estabilidade de taludes, com a ocorrência dos escorregamentos das encostas. Como exemplo, têm-se as favelas formadas nas grandes metrópoles, que são localizadas em geral nas encostas naturais. Na região de Viçosa também se pode observar que esse tipo de ocupação causa grandes problemas sociais e de infra-estrutura para a população.

O problema gerado pela ocupação desordenada das encostas atinge enorme proporção, tornando praticamente inviável economicamente a implantação de estruturas de contenção ou a remoção das pessoas das áreas de risco, o que geraria um grande problema social.

Os taludes naturais, do ponto de vista geotécnico, estão expostos a uma contínua variação do meio ambiente, como, por exemplo, ocorrência de chuvas e conseqüente caminhamento da frente de saturação. Quando um engenheiro é submetido para investigar a estabilidade de um talude, ele deverá emitir um parecer sobre a segurança deste para uma determinada geometria e condições de drenagem, podendo-se levantar determinadas questões, como (FREDLUND e RAHARDJO, 1993):

- que mudanças na geometria teriam efeito nas condições de poro-pressões?
- que mudanças ocorreriam na poro-pressão devido a um longo período de precipitação? Qual variação na poro-pressão poderia ser esperada sob determinadas condições?
- a locação de uma superfície potencial de deslizamento pode mudar em função de uma determinada precipitação?
- como uma análise de estabilidade de talude poderia ser significativamente afetada, se as poro-pressões negativas fossem ignoradas?
- como considerar o fator tempo e as conseqüentes variações sazonais nas análises de estabilidade de taludes empregando-se a Teoria do Equilíbrio Limite?

Para obter respostas a essas questões, é necessário estudar o comportamento dos solos nas variadas condições de umidade de campo, de modo a contribuir para um melhor entendimento da variação de sua resistência ao cisalhamento, relacionando-a com a variação da suas umidades naturais.

1.3. Objetivos

Nesta pesquisa foram considerados como elementos de análise dois taludes de solos residuais não-saturados localizados na área de influência da cidade de Viçosa, localizada na Zona da Mata Norte de Minas Gerais. Os objetivos estabelecidos foram:

- monitorar a variação de sucção matricial nos taludes, com o emprego de tensiômetros, no período de junho de 2004 a abril de 2005;
- monitorar a variação do teor de umidade nos taludes no período de junho de 2004 a abril de 2005;
- comparar os dados de sucção medidos no campo, com tensiômetros, com aqueles determinados em laboratório, com o uso da técnica do papel-filtro e curva característica de retenção de água no solo;
- determinar parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, nas condições de umidade natural e inundada, e realizar análises de estabilidade de taludes.

1.4. Escopo da tese

O estudo foi assim estruturado: no item 2 é feita uma revisão de literatura em que são apresentados temas considerados de interesse para o desenvolvimento deste trabalho; no item 3 é apresentada uma revisão de literatura, abordando as características da região de estudo, como solo, clima e relevo; no item 4, são apresentados os equipamentos e métodos utilizados na realização dos diversos ensaios; no item 5 são apresentados os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios descritos no item 4 e também as discussões pertinentes a estes resultados; no item 6 encontram-se as conclusões finais do trabalho; no item 7 são feitas algumas recomendações para trabalhos futuros; e, por fim tem-se a bibliografia utilizada, seguida de apêndice.

Esta pesquisa foi desenvolvida com a intenção de obter um banco de dados sobre parâmetros geotécnicos de interesse para o comportamento dos solos e para estudo de estabilidade de taludes. Buscou-se apresentar dados sobre sucção matricial

desses solos e analisar como se comporta a variação desta sucção durante um período maior de tempo, o qual foi limitado pelo tempo de realização da pesquisa. Segue algumas limitações da pesquisa:

- i. não se apresentou, aqui, uma análise estatística dos resultados obtidos em cada tipo de solo, bem como na análise da estabilidade dos taludes, devido à utilização de uma só amostra por solo;
- ii. quanto às análises de estabilidade, não foram feitas relações com a frente de saturação do solo. Apesar de os ensaios de tensiômetro mostrarem o comportamento da variação da sucção e umidade, só se obteve resultados para até noventa centímetros de profundidade, que não foram suficientes para se tirar conclusões sobre a profundidade da frente de saturação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Introdução

Desenvolve-se, neste tópico, uma abordagem relacionada aos conceitos dos materiais de estudo considerados de importância para esta pesquisa, considerando-se os solos estudados e os conceitos básicos necessários para realização deste trabalho, como se segue: os ensaios de resistência mecânica; as medições de sucção matricial por tensiômetros, papel-filtro e câmara de pressão; e as análises de estabilidade de taludes.

2.2. Solos residuais

Os solos de encostas naturais se formam por decomposição das rochas, que se apresentam próximas à superfície da terra, fraturadas e fragmentadas, em função da sua própria origem, ou em virtude de movimentos tectônicos, ou ainda pela ação do meio ambiente. Os solos podem ser, assim, encarados como resultado de uma espécie de equilíbrio, temporário, entre o meio ambiente e as rochas. Dessa forma, encontram-se nas encostas naturais os solos residuais e coluvionares. É de interesse neste trabalho apresentar um pouco das características dos solos residuais.

Os solos residuais são formados por decomposição de rocha, que permanece no mesmo local de sua formação. O tipo de solo resultante vai depender de uma série de fatores, como: a natureza da rocha matriz; o clima; a topografia; as condições de drenagem; e, os processos orgânicos.

No Brasil, influenciado pelo clima tropical úmido, em geral, são encontrados os seguintes tipos de solos residuais: oriundos de granitos, constituídos pelos minerais quartzo, feldspato e mica, que se decompõem, dando origem a solos micáceos, com partículas de argila (do feldspato) e grãos de areia (do quartzo); oriundos de gnaisses e micaxistos, que geram solos predominantemente siltosos e micáceos; derivados de basaltos, que são constituídos de feldspatos, que alteram-se essencialmente em argilas; e, os advindos de arenitos, que não contêm feldspato nem mica, mas quartzo cimentado, que decompõem-se liberando o quartzo e dando origem a solos arenosos (MASSAD, 2003).

VARGAS (1977) propôs uma classificação dos solos residuais em três horizontes, em função da intensidade do intemperismo:

- solos residuais maduros, que perderam toda a estrutura original da rocha matriz;
- solos residuais jovens ou saprolíticos, que apresentam materiais que aparentam ser rochas, preservando sua textura, mas que se desmancham com a pressão dos dedos ou com o uso de ferramentas pontiagudas;
- solos em material alterado, que corresponde ao horizonte da rocha alterada, ou seja, trata-se de um material de transição entre o solo e a rocha.

Na Figura 1 apresenta-se um perfil de intemperismo para as rochas ígneas e metamórficas, em que se observam os horizontes em função da intensidade do intemperismo, segundo a concepção de DEERE (1971).

Os solos residuais, principalmente os saprolíticos, apresentam em geral baixa resistência à erosão e, por isso mesmo, precisam ser protegidos em obras que envolvem cortes e escavações em encostas naturais. Vale destacar que embora os solos saprolíticos possam apresentar elevada resistência ao cisalhamento, não raro, no entanto, existem também planos de maior fraqueza ao longo das estruturas herdadas da rocha, como, por exemplo, juntas ou fraturas preenchidas com solo de baixa resistência, que, numa situação de corte e escavação, podem levar os taludes a situações de escorregamentos (MASSAD, 2003).

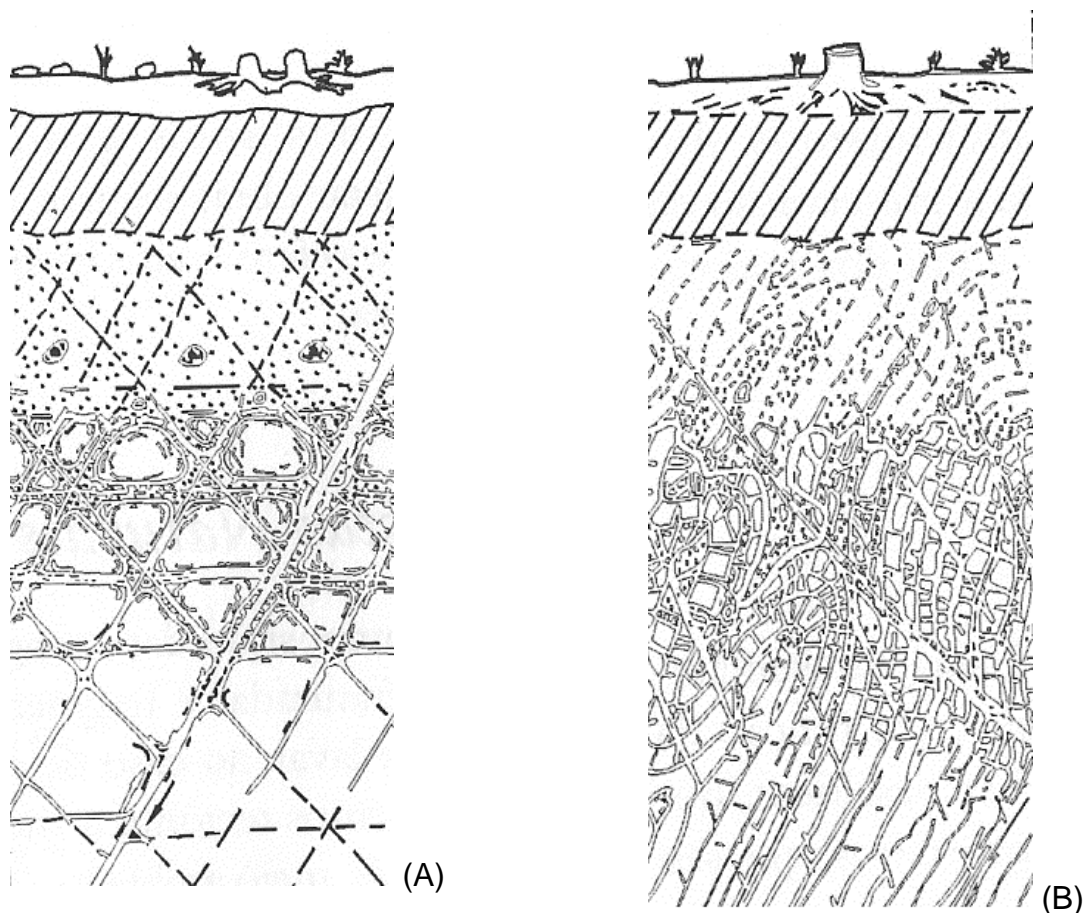


Figura 1 – Perfis de intemperismo: (A) rochas ígneas; (B) rochas metamórficas (DEERE, 1971).

2.3. Sucção no solo

2.3.1. Generalidades

Com o ar contido nos vazios dos solos não-saturados, tem-se a chamada interface solo-água, que é de importância para a caracterização do comportamento geotécnico dos solos não-saturados, pois a forma com que a água se distribui nos seus vazios gera grandes variações das suas características de deformabilidade, resistência ao cisalhamento e permeabilidade (MACHADO, 1998).

Os primeiros conceitos a respeito do assunto surgiram no início do século XX, primeiro com BUCKINGHAM (1907), que introduziu o conceito da capilaridade. Posteriormente, outros autores continuaram a pesquisar esse tópico, mas só a partir da década de 1950 é que se começou a estudar a sucção no âmbito da geotecnia.

Quantitativamente, o valor da sucção para uma determinada umidade do solo é a diferença entre a pressão do ar ambiente e da água no solo. Em solos com um determinado valor de sucção, quando a pressão do ar é atmosférica, a poro-pressão da água é negativa (AITCHISON e RICHARDS, 1965; RIDLEY e BURLAND, 1993).

2.3.2. Componentes da sucção

Para a mecânica dos solos não-saturados, a sucção total é a energia livre de água no solo, sendo dividida em matricial e osmótica (RICHARDS, 1928; FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Em forma de equação, pode ser assim escrita:

Equação 1

$$y = (u_a - u_w) + p$$

em que:

- y = sucção total;
- u_a = poro-pressão do ar;
- u_w = poro-pressão da água.
- $(u_a - u_w)$ = sucção matricial; e
- p = sucção osmótica;

A sucção matricial se deve a efeitos combinados de capilaridade e de adsorção, sendo a primeira uma particularidade dos solos arenosos e a segunda uma particularidade dos solos argilosos. Mas, este comportamento não é tão evidente em solos residuais, como os estudados no presente trabalho.

O fenômeno da capilaridade é explicado pela tensão superficial e pelo raio equivalente entre os grãos de solo e a água. Esse é o principal fator para a geração da sucção.

A parcela da sucção devida à adsorção tem uma atividade maior para as altas sucções, sendo este o caso de solo com poros de diâmetro pequeno. Nesse existe predominância dos fenômenos de superfície, gerados pelo mineral argila.

A sucção osmótica, ou de osmose, se deve à presença de íons dissolvidos na água. Ela tem a mesma importância relativa, tanto em solos saturados como, em não-saturados.

2.3.3. Determinação da curva característica de retenção de água dos solos

A curva característica de retenção de água no solo representa o valor da umidade em função da sucção matricial do solo. Ela é obtida utilizando-se um equipamento para fazer a medição da sucção para um determinado valor de umidade, ou fazer a medição da umidade para um determinado valor de sucção. A curva tem grande importância na correlação com os parâmetros de resistência e de permeabilidade dos solos não-saturados.

Na Figura 2 é mostrado um exemplo de uma curva característica de um solo, com seu elementos típicos para os solos arenoso, siltoso e argiloso. Alguns pontos da curva se tornam fundamentais, como a pressão de entrada de ar e a sucção residual.

A curva característica de sucção, de modo geral, apresenta histerese, isto é, os pares ordenados de umidade *versus* sucção obtidos no ramo de secagem da curva não são os mesmos obtidos no ramo de umedecimento. Esse fenômeno pode ser atribuído a diversas causas: geometria não-uniforme dos poros individuais, intercomunicados por pequenas passagens; ar aprisionado nos vazios do solo ou liberação do ar dissolvido na água; mudanças diferenciais da estrutura do solo, em decorrência de fenômenos como inchamento ou retração, etc.

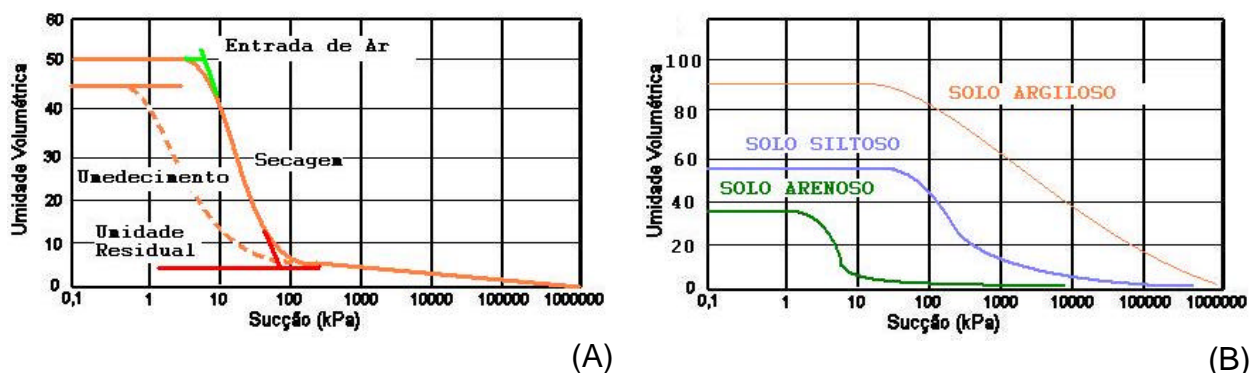


Figura 2 – Exemplo de curva característica de retenção de água no solo: (A) características típicas; (B) exemplos para os solos: arenoso, siltoso e argiloso.

Uma das maneiras de obter a curva característica de sucção é pelo método de translação de eixos, desenvolvido por HILF (1956). O grande problema na utilização

desse método é o tempo gasto nos ensaios. Outros métodos vêm sendo testados para que se tenha a obtenção mais rápida dos resultados, sendo que um destes é a utilização da técnica do papel-filtro, que pode se visto em FEUERHARMEL et al. (2004).

Para melhor relacionar a curva característica de um solo com outros parâmetros como, resistência ao cisalhamento e permeabilidade, FREDLUND e XING (1994) propuseram a seguinte equação para descrever a curva característica de retenção de água de um solo:

Equação 2

$$q = q_{SAT} \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{y}{y_R}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1.000.000}{y_R}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{y}{a}\right)^n\right)} \right]^m$$

em que:

r = valor da sucção para umidade volumétrica residual, r ;

y = valor da sucção;

y_R = valor da umidade volumétrica;

q_{SAT} = valor da umidade volumétrica para o solo saturado;

e = base dos algarismos neperianos ($e = 2,718$);

a = uma aproximação do valor de entrada de ar do solo;

n = parâmetro que controla a inclinação do ponto de inflexão da curva característica de sucção do solo; e

m = parâmetro relacionado com a umidade volumétrica residual.

2.3.4. Sucção matricial relacionada a parâmetros de resistência ao cisalhamento

Um solo não saturado apresenta características de resistência ao cisalhamento que variam significativamente, dependendo do valor da sucção nele atuante. O estado tensional do solo não-saturado, do ponto de vista micro-estrutural, é resultado das

diferentes solicitações às quais o mesmo é submetido, assim como da natureza e propriedade de suas fases componentes (sólida, líquida, gasosa e interações entre estas).

De forma geral, o efeito da sucção na resistência do solo pode ser considerado um acréscimo na tensão efetiva atuante, isto é, a resistência ao cisalhamento cresce com incrementos na sua sucção. Assim, a ação interpartículas, gerada pela sucção, tende a manter mais fortemente unidas e rígidas as partículas de solo.

No estudo da resistência ao cisalhamento do solo, a influência gerada pela variação da umidade do solo pode ser estudada por meio da sucção, pelas seguintes razões (JUCÁ, 1990):

- a sucção pode variar como o estado de tensões a que está submetido o solo, mesmo que o teor de umidade se mantenha constante;
- em solos finos, compactados em um mesmo teor de umidade, a sucção estará influenciada pela estrutura e, portanto, também representa o tipo e a energia de compactação que foi utilizada;
- nas relações estabelecidas diretamente com a sucção o efeito da histerese é menos pronunciado que naquelas entre os parâmetros do solo e o teor de umidade.

Em um solo saturado, pode-se afirmar, pelo conceito de tensões efetivas proposto por Terzaghi, que apenas uma variável de estado controla a sua resistência ao cisalhamento, $(\sigma_n - u_w)$, isto é, a tensão total normal menos a poro-pressão de água. Contudo, no caso de solos parcialmente saturados, segundo FREDLUND et al. (1978), aparece mais uma variável relacionada com a pressão de ar, u_a ; assim, escrevendo a resistência ao cisalhamento dos solos em termos de variáveis de estado de tensões, a melhor combinação para se obtê-la, segundo estes autores, seria pela seguinte equação:

Equação 3

$$t = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \operatorname{tg} f + (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} f^b$$

em que:

t = resistência ao cisalhamento efetiva do solo;

c' = coesão efetiva do solo;

f' = ângulo de atrito interno efetivo do solo;

f^b = ângulo que indica a taxa de crescimento de τ em relação à sucção matricial;

s_N = tensão total normal;

u_a = pressão do ar no solo;

u_w = pressão de água no solo.

O ângulo f^b pode ser visualizado como um ângulo de atrito convencional, ou como uma componente da coesão ou, ainda, como o coeficiente angular da reta do gráfico que representa a coesão em função da sucção matricial. Na Figura 3 encontra-se o gráfico que representa a Equação 3.

Diversos autores apresentam resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada, comprovando o uso da Equação 3, entre eles FREDLUND et al (1978) e GULHATI e SATIJA (1981).

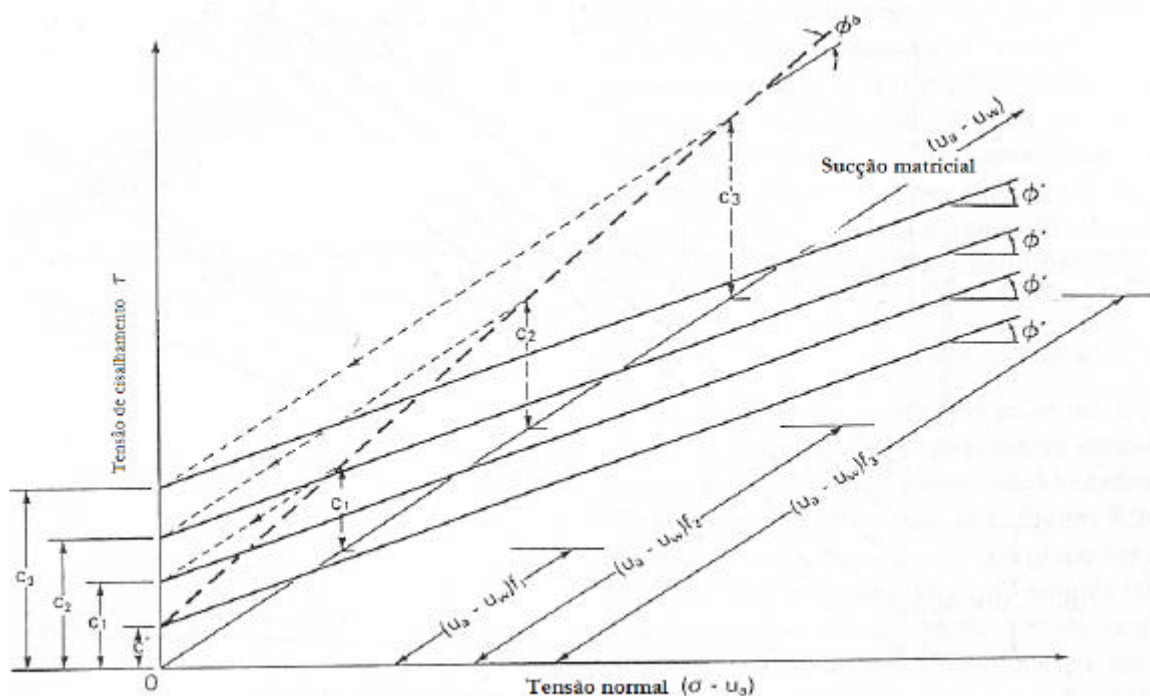


Figura 3 – Envoltórias de ruptura para solos não-saturados.

Existem algumas propostas no sentido de se estimar a resistência ao cisalhamento dos solos não-saturados com base na curva característica de retenção de água do solo. Dentre os trabalhos existentes, destaca-se o de ÖBERG e SÄLLFORS (1995), segundo os quais a influência da sucção matricial na tensão efetiva, e portanto na resistência ao cisalhamento, está diretamente relacionada com o grau de saturação do solo. Assim, para valores de sucção menores que o valor de entrada de ar do solo, considera-se $f^b=f'$. Segundo esses autores, a seguinte equação pode ser utilizada na representação da resistência ao cisalhamento de um solo não-saturado:

Equação 4

$$t = c' + (s - Sr \cdot u_w - (1 - Sr) \cdot u_a) \cdot \operatorname{tg} f' \quad \text{ou}$$

$$t = c' + (s - u_a) \cdot \operatorname{tg} f' + (u_a - u_w) \cdot Sr \cdot \operatorname{tg} f'$$

em que:

t = resistência ao cisalhamento efetiva do solo;

c' = coesão efetiva do solo;

f' = ângulo de atrito interno efetivo do solo;

s = tensão total normal;

u_a = pressão do ar no solo;

u_w = pressão de água no solo;

Sr = valor do grau de saturação do solo.

Os valores de Sr e $(u_a - u_w)$ são obtidos através da curva característica de retenção de água do solo.

FREDLUND et al. (1995), também, afirmam que existe uma forte relação entre a resistência ao cisalhamento de um solo e sua curva característica de retenção de água do solo. Os autores relatam que, para valores de sucção superiores ao valor de entrada de ar do solo, a contribuição dada pela sucção à resistência ao cisalhamento diminui com a sua não-saturação e resulta em uma variação não-linear de sua resistência ao cisalhamento e de sua curva característica de retenção de água do solo.

2.4. Medidas de sucção: campo e laboratório

A sucção pode ser medida por um grande número de ensaios de campo e de laboratório, podendo-se referir a: psicrômetro; papel-filtro; tensiômetro; câmara de pressão; e ensaio de intrusão de mercúrio. É de interesse, neste trabalho, apresentar, com mais detalhes, o tensiômetro, o papel-filtro e a câmara de pressão, o que será feito nos itens a seguir.

2.4.1. Tensiômetro

O tensiômetro (Figura 4) é um sensor da força ou tensão com que a água fica retida no solo, que opera com água na cavidade da cápsula porosa e tem resposta contínua. A maior dificuldade prática no uso do tensiômetro comum é o acúmulo de ar na cavidade, que precisa ser completada freqüentemente com água destilada. Essa dificuldade é maior quando a tensão se aproxima do limite de trabalho desses instrumentos (90 kPa).

No entanto, vêm sendo desenvolvidas pesquisas para a criação de tensiômetros com medidas de sucção maiores do que 90 KPa. MAHLER et al. (2004) e PACHECO (2001) obtiveram resultados satisfatório no desenvolvimento de um tensiômetro medindo valores de sucção da ordem de até 350 KPa.



Figura 4 – Tensiômetros convencionais com vacuômetro.

Em termos práticos, um tensiômetro mede as poro-pressões negativas de água em um solo. Ele possui uma entrada de ar “rígida”, que é um copo cerâmico poroso conectado a um medidor através de um fino tubo. O tubo é normalmente de plástico, devido à sua baixa condução de calor e natureza não-corrosiva, e possui um diâmetro

de aproximadamente 20 milímetros. O tubo e o copo são preenchidos com água deaerada ou fervida. O copo cerâmico deve ser inserido dentro de um furo no solo, feito com um trado de dimensões apropriadas, e deve ter, também, um bom contato com o solo.

Uma vez que se atinge o equilíbrio entre o solo e o sistema de medição, a água no tensiômetro apresenta a mesma pressão negativa que a pressão de água no solo. Destaca-se que, comumente, a máxima poro-pressão negativa de água que pode ser medida em um tensiômetro é limitada para aproximadamente 90 KPa negativo, pois, a partir deste valor de poro-pressão existe a possibilidade de cavitação da água dentro do tensiômetro, não se tornando a medida confiável. A poro-pressão negativa medida é numericamente igual ao valor da sucção matricial quando a poro-pressão do ar é atmosférica; quando esta é maior que a atmosférica, à leitura do tensiômetro deve ser adicionada a leitura da poro-pressão do ar ambiente para se obter a sucção matricial do solo corrigida.

Há vários tipos de tensiômetros disponíveis no mercado. Na Figura 5 é mostrado um tensiômetro regular com um vacuômetro para medir a poro-pressão negativa da água. A poro-pressão negativa em um tensiômetro também pode ser medida usando o manômetro de mercúrio ou um transdutor de pressão elétrica, também mostrados na Figura 5. Cassel e Klute (1986), citados por FREDLUND e RAHARJIO (1993), discutiram a sensibilidade de vários dispositivos de medição em função do tempo de reação de um tensiômetro. Em geral, um aumento na sensibilidade do medidor causa diminuição do tempo de reação do tensiômetro, bem como menor movimento de água entre o solo e o tensiômetro e, conseqüentemente, em uma medição mais precisa da sucção. Observa-se que uma maior permeabilidade do copo cerâmico, também, resulta em um tempo de reação menor do tensiômetro.

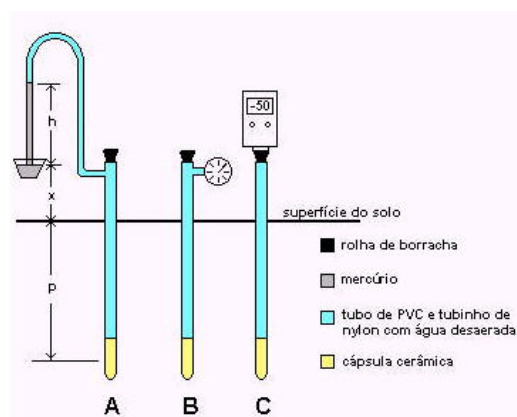


Figura 5 – Tensiômetros com medidores de: (A) mercúrio; (B) vacuômetro analógico; (C) transdutor de pressão (tensímetro).

O tubo do tensiômetro tem um diâmetro de, aproximadamente, 20 mm e vários comprimentos, de até 1,5 m. Em outras palavras, copos de tensiômetro podem ser instalados, no campo, a uma profundidade de até 1,5 m abaixo da superfície. Entretanto, uma poro-pressão negativa de água anotada na superfície do terreno deve ser corrigida para a elevação correspondente da coluna de água no tensiômetro. Assim, quanto mais longo for o tubo do tensiômetro, maior será a correção, a qual, resulta em uma maior pressão negativa de água sendo medida do que a anotada pelo dispositivo de medição. Refere-se que o comprimento de 1,5 m corresponde a uma correção da pressão de 15 KPa.

Alguns procedimentos para a instalação de um tensiômetro no campo, descritos por FREDLUND e RAHARJIO (1993), são apresentados a seguir:

- a tampa localizada no topo do tensiômetro é usada para facilitar a vedação do tubo com a água deaerada devido ao selo impermeável. O tensiômetro deve ser testado corretamente antes do uso no campo, a fim de se obter um resultado confiável. Durante a preparação para instalação do tensiômetro, o copo cerâmico deve ser saturado e o tempo de resposta do tensiômetro deve ser checado;
- o copo cerâmico pode ser checado colocando o tensiômetro vazio e aberto em um balde com água e deixando-o mergulhado neste durante uma noite, para permitir a entrada de água dentro do tubo do tensiômetro;

- a remoção das bolhas de ar é conseguida pela aplicação de um vácuo, no topo do tubo do tensiômetro, de aproximadamente 80 KPa, por um tempo de 30 a 60 segundos. O vácuo pode ser aplicado usando uma bomba de vácuo. Esse processo removerá as bolhas de ar que estão no copo cerâmico e nas imperfeições da parede do tubo. Tendo feito a aplicação do vácuo, adiciona-se a água deaerada ao tubo e a tampa é apertada. A água do tubo é então submetida a uma pressão negativa de aproximadamente até 80 KPa, permitindo-se a sua evaporação a partir do copo cerâmico. Abaixo dessa tensão negativa, ou seja, com a sucção maior que 80 KPa, as bolhas de ar podem reaparecer no tubo e o procedimento acima deve ser repetido até que este esteja completamente livre das mesmas. Isso é importante para se medir as leituras corretamente e se conseguir uma resposta rápida do mesmo;
- o tempo de resposta do tensiômetro pode ser checado pelo desenvolvimento de uma pressão negativa de água, por evaporação a partir do copo cerâmico, de aproximadamente até 80 KPa, e então o copo cerâmico deve ser imerso na água. Cinco minutos após a imersão, a pressão negativa da água no tensiômetro deve aumentar em direção à pressão atmosférica. Uma resposta ociosa pode indicar: um copo poroso entupido; a presença de entrada de ar no sistema; ou a falha do relógio medidor, o que irá requerer calibração do tensiômetro.
- o copo cerâmico deve ser mergulhado em água, antes da sua instalação, visando evitar desaturação devido à evaporação de água no seu interior. O tensiômetro preparado pode ser instalado em um furo no campo ou em uma amostra de solo em laboratório. É importante assegurar um bom contato entre o copo cerâmico e o solo, a fim de se estabelecer continuidade entre a água nos poros do solo e a água no tubo do tensiômetro.

Após a instalação do tensiômetro, podem-se apresentar alguns detalhes, descritos por FREDLUND e RAHARJIO (1993):

- na prática, a mínima pressão que pode ser medida em um tensiômetro é de, aproximadamente, -90 KPa, por causa da rápida acumulação de bolhas de ar quando a pressão de vapor da água se aproxima. Adicionalmente, a poro-

pressão do ar passa através do copo cerâmico, se a sucção matricial do solo exceder o valor de entrada de ar do solo;

- deve-se observar que o tensiômetro já possui um valor de pressão, que é a altura de coluna d'água dentro do tubo; por isso, deve ser anotada a sua influência na medição.

Detalhes sobre preparação, instalação e manejo também podem ser vistos em CASSEL e KLUTE (1986).

2.4.2. Técnica do papel-filtro

Normalizada pela ASTM (D5298-92), esta técnica consiste em colocar um papel-filtro em contato com o solo e, sem permitir a evaporação, deixar que o equilíbrio de umidade se estabeleça entre ambos. A partir da umidade final do papel-filtro e da calibração, é possível determinar o valor da sucção no solo.

Dependendo do contato do papel-filtro com o solo, pode-se medir a sucção matricial, quando este é colocado em contato com o solo, ou a total quando este é colocado sem contato com o solo.

Este método foi desenvolvido na disciplina da área ciência dos solos e, desde então, tem sido usado extensivamente. Contudo, segundo, FREDLUND e RAHARJIO (1993), o uso na geotecnia ainda não tem aceitação geral, necessitando-se de mais pesquisas. Uma descrição do ensaio e da calibração do papel filtro pode ser vista com detalhes em BULUT et al. (2001).

Trabalhos mais recentes na literatura nacional, como os de FEUERHARMEL et al. (2004) e LEVIS e KORMANN (2004), apresentam procedimentos e resultados com o uso do papel-filtro para medição da sucção matricial na determinação da curva característica de retenção de água no solo.

Os procedimentos para o uso da técnica do papel-filtro encontrados na literatura consistem, geralmente, em: moldar o corpo-de-prova; colocar o papel-filtro em contato com o solo; deixar estabilizar por no mínimo sete dias, de forma que não tenha variação de umidade e temperatura; pesar o papel-filtro em uma balança em gramas, com precisão de quatro dígitos; determinar a umidade do papel-filtro; e, comparar a

umidade do papel-filtro com sua curva característica obtendo o valor da sucção do papel-filtro que é igual a sucção do solo.

2.4.3. Câmara de pressão

É utilizada em medidas de sucção matricial em laboratório, por meio da técnica de translação de eixo de HILF (1956). Esse autor mostra que o aumento da pressão no ar atmosférico corresponde à mesma magnitude da pressão na água intersticial; assim, a sucção matricial permanece constante, para fins práticos.

O ensaio consiste em aplicar ao corpo-de-prova uma sucção matricial definida para se obter o peso resultante do corpo-de-prova e, assim, calcular sua umidade e seu grau de saturação.

A utilização desta técnica pode ser vista com mais detalhes em MACHADO (1998), LUIZ (2000), CUSTÓDIO et al. (2004), PRESA et al. (1994), FONSECA (1991), ROHM (1992), PRESA (1991) e CHANG (1969).

2.5. Estabilidade de taludes

Os movimentos de massas solos e rochas podem não merecer muita atenção, como também podem vir a serem desastrosos, no que se refere aos efeitos, à proporção e à frequência com que ocorrem. São vários os termos utilizados para descrever esses movimentos, mas dados da literatura sugerem que a adoção de um sistema único de classificação é inviável. Várias classificações têm sido propostas, podendo-se citar, a partir de GUIDICINI e NIEBLE (1984), as de: Terzaghi, Sharpe, Varnes, e Hutchinson. No Brasil, os mesmos autores citam: Freire, Vargas, e Costa Nunes.

Entender e, ou, explicar os fatores que levam uma encosta à condição de equilíbrio instável e os que desencadeiam esse processo é de essencial importância, pois a esse entendimento estão interligadas as possibilidades de se evitar acidentes ou se atenuar os danos, nos casos em que não é possível se evitar a sua ocorrência.

Muitos pesquisadores estudaram as causas e os agentes do processo de instabilização das massas de solo, entre eles podendo se referir a GUIDICINI e

NIEBLE (1984) e TERZAGHI (1952). Contudo deve ser ressaltado que, dificilmente, uma encosta se movimenta devido à ação de um agente ou de uma causa individual. O que ocorre é uma combinação de fatores, causas e agentes que, num dado momento, fazem com que seja rompido o equilíbrio estável de uma massa de solo, e esta, na tentativa de encontrar uma nova condição de equilíbrio, desce encosta abaixo.

Utilizando o conceito de equilíbrio plástico descrito em LUIZ (2000) para se explicar os fenômenos de movimentação de massas, pode-se afirmar que se atinge a condição de ruptura quando as tensões de cisalhamento atuantes superam a resistência ao cisalhamento do solo em um dos pontos do maciço em questão. Então, rompido o equilíbrio plástico, esse ponto não mais colabora para a condição de ruptura; alcança-se, então, uma condição de instabilidade no maciço, pois em qualquer ponto no qual as tensões solicitantes superam as tensões resistentes ocorre um descarregamento de tensões em pontos vizinhos, os quais, por estarem na condição de equilíbrio plástico, não resistem às novas solicitações. Assim, o fenômeno de transferência de tensões ocorre ponto a ponto na superfície de escorregamento e, portanto, atinge-se a condição de instabilidade, desencadeando o fenômeno de deslizamento. A superfície formada pela união dos pontos que atingem a condição de ruptura recebe o nome de superfície crítica de ruptura. Vale destacar que todas as análises e cálculos de estabilidade de encostas desenvolvidos segundo as hipóteses do equilíbrio limite referem-se a esta superfície de ruptura.

As chuvas são muitas vezes acusadas de serem o principal fator para a ocorrência de deslizamentos. No entanto, essa influência depende, entre outros fatores, das condições climáticas, da topografia da área, da estrutura geológica das encostas e da permeabilidade do solo. A relação entre a quantidade de chuvas e a frequência de deslizamentos vem sendo estudada por diversos autores, como, por exemplo, Pincher (1957), Costa Nunes (1969) e Vargas (1970), citados por GUIDICINI e NIEBLE (1984).

De acordo com Nielsen e Turner (1975), citados por LUIZ (2000), três fatores são essenciais para se estudar correlações entre pluviosidade e escorregamentos: duração da chuva, quantidade de água acumulada no solo antes do início da chuva e intensidade de períodos de tempestades. Esses fatores influenciam o avanço da frente de saturação e a sucção sobre os solos residuais. Trabalhos como os de LUMB (1975),

BRAND (1981, 1982), PRADO DE CAMPOS (1984) e WOLLE e HACHICH (1989), entre outros, são direcionados à análise de estabilidade de taludes citando a influência benéfica da sucção na resistência ao cisalhamento dos solos e ao mecanismo de instabilização originado pela presença de águas de chuvas responsáveis por reduções na sucção.

Além dessas correlações, é importante mencionar o estudo da influência de variações de fluxo causadas por pequenas variações da condutividade hidráulica. Esse tópico pode ser visto no trabalho de SANTOS e VILAR (2004), que apresentou estudo sobre a influência de condutividade hidráulica e da curva de retenção na infiltração e na estabilidade de taludes em solos não-saturados.

Os métodos de análise de estabilidade de taludes, na sua maioria, foram desenvolvidos segundo a abordagem do equilíbrio plástico limite, em que se assume inicialmente a existência de uma superfície de escorregamento que determina, acima desta, a porção instável do maciço. Assume-se que o solo limitado por esta superfície obedece a um critério de ruptura, e aplica-se a esta superfície adotada um critério de resistência, em geral o de Mohr-Coulomb.

Dos métodos de análise de estabilidade de taludes existentes, podem-se citar os de BISHOP (1955), MORGENSTERN e PRICE (1965), bem como SPENCER (1967). Além desses, pode-se referir ao método clássico de Fellenius, de 1936.

Os métodos citados tratam dos deslizamentos de volume de solos ao longo de superfícies de ruptura bem definidas, cilíndricas ou planares, descritos por VARGAS (1977) como escorregamentos verdadeiros. No entanto, as causas que levam a esse fenômeno são: alteração da geometria do talude, colocação de sobrecargas no topo das encostas, infiltração de águas de chuvas, e desmatamento.

3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A microrregião de Viçosa, localizada no Complexo da Mantiqueira, apresenta em sua geologia rochas do Embasamento Granito-Gnáissico Indiviso, referentes ao período Pré-cambriano. As rochas são constituídas de gnaisses moderadamente indiferenciados a bastante alterados, apresentando níveis quartzosos intercalados com níveis micáceos. Tem-se também a presença de intrusões de rocha metabásica, que às vezes são concordantes (e outras discordantes) com a foliação da rocha local (LUIZ, 2000).

Segundo FERRAZ (1994), encontra-se uma cobertura terciária pouco espessa e, ao longo dos vales e das vias fluviais, aparecem os sedimentos quaternários, que constituem os depósitos aluvionares de caráter argiloso, argilo-arenoso ou arenoso. Morfoestruturalmente, a região integra o Domínio dos Planaltos Cristalinos Rebaixados. O espesso manto de alteração, nas áreas de declividade fraca a média, são resultado da atuação conjunta de processos químicos e biogênicos próprios das zonas intertropicais úmidas.

O relevo da região onde se localiza a área em estudo é fortemente ondulado. O segmento do relevo é constituído pelo planalto cristalino, sobre o qual atuam processos morfogenéticos tropicais, predominando conseqüentemente o intemperismo químico. As feições morfológicas mostram forte influência das variáveis geológicas, litologias, foliações e falhamentos e de variações climáticas mesozóicas e cenozóicas, que levaram à formação de superfícies cíclicas de erosão. Encontram-se, também, como componentes do relevo regional, terraços fluviais e planícies aluviais das principais drenagens (BAPTISTA et al., 1997).

No município de Viçosa, o relevo é formado pelo Planalto de Viçosa, que se encontra no Domínio de Mar de Morros, formados por rochas granito-gnáissicas. Nas elevações, as partes íngremes apresentam o horizonte C mais próximo à superfície e são formadas por Cambissolos Latossólicos, enquanto nas encostas mais suaves predominam os Latossolos Variação Una – Latossolos Vermelho-Amarelos. As baixadas são formadas por leitos maiores, associadas ou não aos terraços fluviais, e por solos muito argilosos provenientes de erosão e intemperismo das encostas.

O clima de Viçosa tem predominância de inverno seco e verão chuvoso. Segundo a classificação de Köppen, ocorre na região o Clima Tropical de Altitude de Verões Brandos. A temperatura média anual é de 19°C, com a estação mais fria englobando os meses de maio a agosto e a chuvosa indo de outubro a março. A umidade relativa do ar tem média anual em torno de 78% e a precipitação média anual está na faixa de 1.200 a 1.400 mm. A cobertura vegetal dominante é uma pastagem de capim-gordura (AZEVEDO, 1999).

No que se refere somente às classes de solos de Viçosa, têm-se: Latossolos Vermelho-Amarelos, que engloba os solos provenientes de material pré-intemperizado de gnaïsse, podendo alcançar algumas dezenas de metros na seqüência de horizontes A-B-C; Cambissolos, que ocorrem, predominantemente, nas vertentes mais íngremes do relevo e são solos rasos com horizonte B de espessura em torno de 50 cm e horizonte C de pequena espessura, com a rocha perto da superfície; Podzólicos Vermelho-Amarelos, que são formados por sedimentos fluviais originários de solos desenvolvidos de gnaïsse Pré-cambriano, apresentando estrutura em blocos e cerosidade, que os protege da ação dos agentes erosivos, formados pela deposição da argila na superfície dos agregados no horizonte B fluvial; Podzólicos Vermelho-Amarelos com B Bruno Micáceo, que ocupam posições mais baixas da paisagem, sendo solos jovens e férteis; Cambissolos Latossólicos, que são solos rasos e expostos freqüentemente à erosão com o manto de intemperismo C bem profundo, pois encontra-se normalmente nas áreas íngremes do relevo; Latossolos Vermelho-Amarelos Variação Una, que são solos profundos porosos e bem drenados, de textura argilosa a muito argilosa, o que lhes confere comportamento plástico a pegajoso; Solos Hidromórficos, que são solos de topografia plana observados no leito maior das linhas de drenagem, às margens dos cursos d'água ou nas partes baixas do terreno sob condições de saturação de água ou alagamento temporário; e, com maior importância

geotécnica e volume, os Solos Saprolíticos, que ocorrem no horizonte C, resultante de um perfil de intemperismo de solos desenvolvidos de gnaisse do Pré-cambriano, como camadas de espessuras muitas vezes superiores a 20 metros. Informações mais detalhadas, como o comportamento geotécnico, de cada tipo de solo descrito, podem ser vistas nos trabalhos de CARVALHO FILHO (1989), RAMALHO (1994) e AZEVEDO (1998, 1999).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Introdução

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV), sendo executados: ensaios de caracterização; ensaios de resistência mecânica (cisalhamento direto e triaxial); ensaios para a medição da sucção (com tensiômetros e método do papel-filtro); e ensaio para a determinação da curva de retenção de água.

4.2. Material

Os dois taludes estudados nesta pesquisa estão localizados na Zona da Mata Norte de Minas Gerais, especificamente na área de influência geográfica da cidade de Viçosa, Brasil, com altitude de 650 m, delimitada pelos meridianos 42°51'30", 42°52'30", 42°53'30" e 42°54'30" e pelos paralelos 20°43'30", 20°45'00" e 20°46'00". Os taludes estão representados em um pequeno mapa da cidade de Viçosa (Figura 6), sendo assim classificados:

- Talude VG: localizado na via de acesso que liga a avenida Castelo Branco à Vila Gianetti. Neste talude foram coletadas amostras em sua parte superior, onde se observou um solo residual maduro, e em sua parte inferior, em que se observou um solo residual jovem (Figura 7). O talude se apresentava estável e estava sendo implantada uma cobertura

vegetal, com o intuito de conter os processos erosivos do solo, que não apresentava muitas trincas, falhas nem escorregamentos.

- Talude MB: localizado na rua Dr. Milton Bandeira, atrás do estabelecimento comercial ULTRAGAZ, nº 273. Neste talude coletaram-se amostras em sua parte superior, onde se observou um solo residual maduro, e em sua parte inferior, em que se observou um solo residual jovem (Figura 8). Verificou-se neste talude, em vários pontos, a ocorrência passada de escorregamentos e no pé do talude um descalçamento em torno de 3 metros de altura, que poderia ocasionar sua instabilidade. Observou-se, também, a presença de placas de solo, na forma planar, que se desprenderam da massa de solo escorregada, provavelmente originada de ciclos de secagem e molhagem, além da ocorrência de trincas de tração e condicionantes geológicos. Pode ser visto que a parte descalçada no pé do talude se deveu a um deslocamento, como consequência da erosão pluvial aliada à geologia, visto que a parte inferior do talude é formada pelo horizonte C, que apresenta, entre outras, a característica de maior erodibilidade. Por fim, foi observada a ausência completa da vegetação e acentuados cortes da encosta com vistas à implantação de edificações.



Figura 7 – Foto do talude VG.



Figura 8 – Foto do talude MB.

As amostras de solo retiradas dos dois taludes foram classificadas conforme as características dos solos residuais e solos da região de Viçosa apresentado nos itens 2.1 e 3:

- VGRM: amostra retirada do talude VG, em que se observou característica de solo residual maduro, localizada no horizonte B;
- VGRJ: amostra retirada do talude VG, em que se observou característica de solo residual jovem, localizada no horizonte C;
- MBRM: amostra retirada do talude MB, em que se observou característica de solo residual maduro, localizada no horizonte B;
- MBRJ: amostra retirada do talude MB, em que se observou característica de solo residual jovem, localizada no horizonte C.

4.3. Metodologia de campo

Os trabalhos de campo envolveram as atividades descritas a seguir:

- coleta de amostras deformadas e indeformadas, a um metro de profundidade, representativa quanto à estrutura, umidade, constituição mineralógica e textura. As amostras indeformadas foram coletadas em tubos de PVC cilíndricos, com diâmetro e altura de aproximadamente 30 cm, a uma profundidade de um metro da superfície;
- determinação da geometria dos taludes;
- monitoramento da sucção matricial com a utilização de tensiômetros e coleta de amostras deformadas para determinação do teor de umidade dos solos.

O monitoramento da sucção matricial foi feito por meio dos tensiômetros. A metodologia está apresentada no item subsequente.

4.3.1. Monitoramento da sucção matricial

Para monitorar a sucção matricial no campo, foram feitas medições no período de junho de 2004 a abril de 2005. Para isso, utilizaram-se dois tensiômetros, sendo um com comprimento de 30 cm e o outro com comprimento de 90 cm (Figura 9).



Figura 9 – Tensiômetros e trado utilizado nas suas instalações nos solos em estudo.

Os tensiômetros usados foram de vacuômetro de pressão e mediam pressão negativa na faixa entre zero e -90 KPa.

Para sua correta utilização no campo, com respostas confiáveis, obedeceu-se ao seguinte procedimento:

- saturação da pedra porosa;
- aferição do equipamento;
- teste em laboratório;
- método de instalação;
- medição da sucção e umidades;
- análise dos resultados.

Cada etapa é descrita com mais detalhes nos parágrafos que se seguem.

A saturação da pedra porosa foi feita, em média, a cada 30 dias ou quando o aparelho ficava sem uso. Deixava-se o aparelho em um balde com água por um dia. Com a tampa do tensiômetro aberta, aplicava-se um vácuo dentro da célula e deixava que ocorresse o fluxo d'água, passando pela pedra porosa por alguns minutos. Ao final, completava-se o tubo com água deaerada e fechava-se a tampa do tensiômetro. Na

aplicação do vácuo foi usada uma bomba, e este procedimento se deu através de uma célula desenvolvida para esse fim. A célula pode ser vista com mais detalhes na Figura 10.

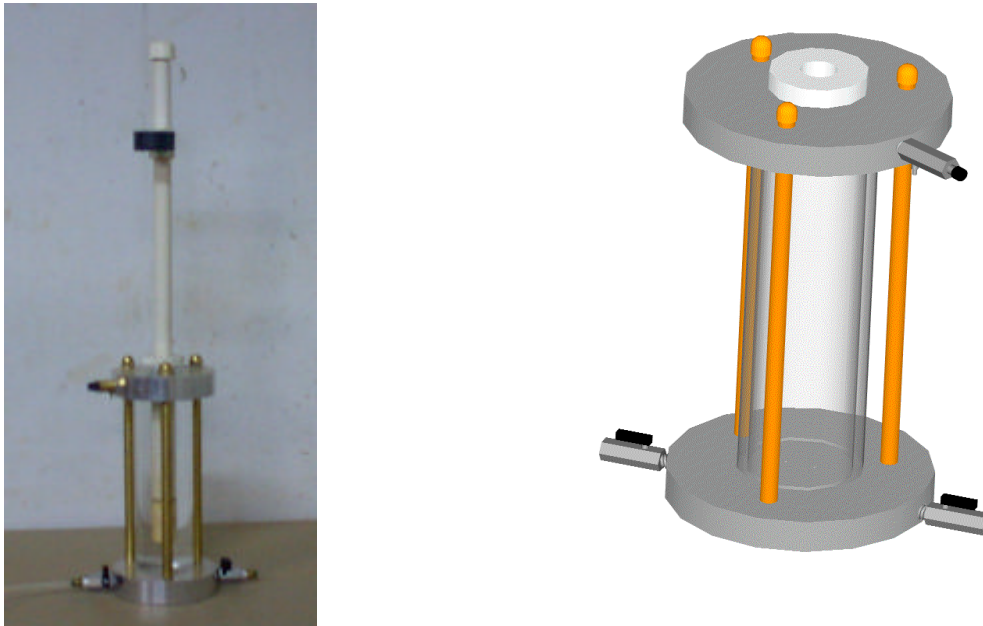


Figura 10 – Célula desenvolvida para aplicação de vácuo nos tensiômetros.

A aferição do equipamento teve o objetivo de observar a confiabilidade das medidas feitas no medidor de pressão do tensiômetro. Para isso, foi usada a mesma célula mostrada anteriormente, comparando-se as medidas feitas no aparelho com um manômetro de mercúrio (Figura 11). As comparações das medidas do tensiômetro com o manômetro foram feitas de duas formas. Na primeira, montou-se um sistema com a bomba de vácuo ligada ao manômetro, e este ligado ao tensiômetro; a ligação entre o manômetro e o tensiômetro se dava por uma mangueira saturada. Neste caso, devido à incompressibilidade da água e do mercúrio, foram obtidas respostas imediatas (Figura 12). Na segunda, montou-se um sistema com a bomba de vácuo ligada no tensiômetro e este ligado ao manômetro sem água no sistema. Neste caso, em razão da compressibilidade do ar, pôde-se observar, além da comparação das leituras, o tempo de resposta do tensiômetro, que foi de 15 minutos.



Figura 11 – Aferição dos tensiômetros.

É importante observar que o tensiômetro já mede um valor de sucção da altura da coluna d'água que fica dentro do tubo; portanto, este valor foi subtraído daquele da leitura feita.

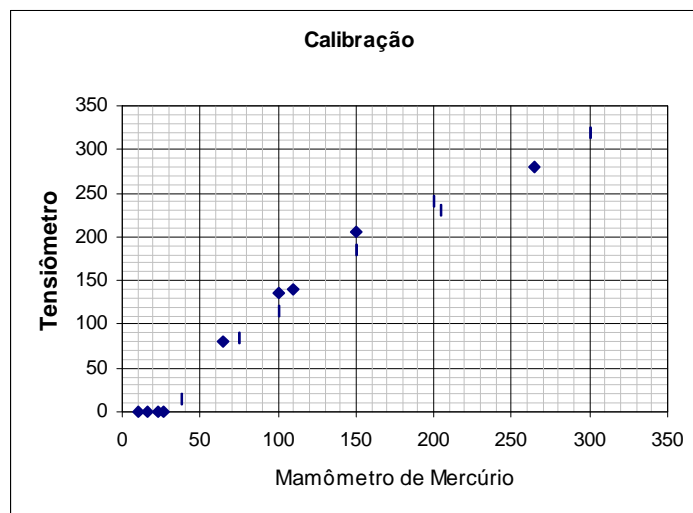


Figura 12 – Gráfico dos resultados da calibração dos tensiômetros.

Antes de levar os tensiômetros para o campo, eles foram testados em laboratório (Figura 13). O teste se deu com a utilização de uma caixa de madeira quadrada, dentro da qual havia um solo compactado com uma umidade aproximada de menos 2% do valor da umidade ótima do solo, para a energia do ensaio de compactação Proctor Normal. Como o objetivo foi de, simplesmente, testar o comportamento do aparelho, não foram obtidos dados geotécnicos sobre solo contido na caixa. Os resultados das leituras mostraram uma sucção elevada, de aproximadamente 80 KPa, para esta condição de umidade; no entanto, ao inundar o solo, a sucção medida nos tensiômetros caía a quase zero. Este teste foi importante para perceber como seria o comportamento esperado do aparelho no campo.



Figura 13 – Teste dos tensiômetros em laboratório.

Os tensiômetros foram instalados na crista dos taludes, revezando de um talude para o outro com um tempo que variava de aproximadamente duas semanas. Com os dois tensiômetros, pôde-se medir a sucção nas profundidades de 30 e 90 cm. A cada vez que os aparelhos eram colocados e retirados dos taludes, fazia-se a retirada de uma quantidade de solo para que se pudesse medir o teor de umidade. Na Figura 14

são apresentados os tensiômetros instalados no talude VG e, na Tabela 1 o cronograma de leituras feitas para o monitoramento da sucção.



Figura 14 – Foto dos tensiômetros instalados no talude VG.

Tabela 1 – Cronograma do monitoramento da sucção matricial feito através dos tensiômetros

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
JUNHO	02/06/04	X	X				
	03/06/04	X	X				
	04/06/04	X	X				
	19/06/04	X	X				
	20/06/04	X	X				
	21/06/04	X	X				
	22/06/04	X	X				
	23/06/04	X	X				
	24/06/04	X	X				
	25/06/04	X	X				
	26/06/04	X	X				
	27/06/04	X	X				
	28/06/04	X	X				
	30/06/04				X	X	X

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
JULHO	01/07/04				X	X	
	02/07/04				X	X	
	06/07/04				X	X	
	07/07/04				X	X	
	08/07/04				X	X	
	09/07/04				X	X	X
	10/07/04	X	X	X			
	11/07/04	X	X				
	12/07/04	X	X				
	13/07/04	X	X				
	14/07/04	X	X				
	15/07/04	X	X				
	16/07/04	X	X				
	17/07/04	X	X				
	18/07/04	X	X				
	19/07/04	X	X				
	20/07/04	X	X				
	21/07/04	X	X	X			
	22/07/04				X	X	X
	23/07/04				X	X	
26/07/04				X	X		
28/07/04				X	X		

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
AGOSTO	02/08/04				X	X	X
	04/08/04	X	X	X			
	05/08/04	X	X				
	06/08/04	X	X				
	08/08/04	X	X				
	09/08/04	X	X				
	11/08/04	X	X	X			
	13/08/04				X		X
24/08/04				X	X		

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
SETEMBRO	02/09/04				X	X	
	14/09/04	X	X	X			
	17/09/04	X	X				
	22/09/04	X	X	X			
	24/09/04				X	X	X
	28/09/04				X	X	

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
OUTUBRO	01/10/04					X	
	04/10/04				X	X	X
	06/10/04				X	X	X
	19/10/04	X	X				
	21/10/04	X	X	X			
	27/10/04	X	X				
	28/10/04	X	X	X			

Continuação: Tabela 1

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
NOVEMBRO	02/11/04				X	X	X
	04/11/04				X	X	
	06/11/04				X	X	
	08/11/04				X	X	X
	11/11/04	X	X	X			
	13/11/04	X	X				
	15/11/04	X	X				
	17/11/04	X	X	X			
	20/11/04				X	X	X
	22/11/04				X	X	
	24/11/04				X	X	
	26/11/04				X	X	X
	30/11/04	X	X	X			

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
DEZEMBRO	03/12/04	X	X				
	05/12/04	X	X				
	08/12/04	X	X				
	10/12/04	X	X				
	13/12/04	X	X				
	15/12/04	X	X				
	18/12/04	X	X				
	21/12/04	X	X				
	24/12/04	X	X				
	27/12/04	X	X				
	30/12/04				X	X	X

Continuação: Tabela 1

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
JANEIRO	04/01/05				X	X	
	06/01/05				X	X	
	08/01/05				X	X	
	13/01/05				X	X	
	16/01/05				X	X	
	20/01/05				X	X	
	25/01/05				X	X	

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
FEVEREIRO	01/02/05				X	X	
	02/02/05				X	X	X
	11/02/05	X	X	X			
	14/02/05	X	X				
	16/02/05	X	X				
	19/02/05	X	X				
	21/02/05	X	X				
	23/02/05	X	X				
26/02/05	X	X					

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
	01/03/05	X	X				
	04/03/05	X	X				
	08/03/05	X	X				
	09/03/05	X	X	X			
MARÇO	13/03/05				X	X	X
	15/03/05				X	X	
	18/03/05				X	X	
	24/03/05				X	X	
	29/03/05				X	X	

MÊS	DATA	TALUDE VG			TALUDE MB		
		T30	T90	UMIDADE	T30	T90	UMIDADE
	02/04/05				X	X	X
	05/04/05	X	X	X			
ABRIL	07/04/05	X	X				
	09/04/05	X	X				
	11/04/05	X	X	X			

4.4. Metodologia de laboratório

Os trabalhos de laboratório envolveram os ensaios de caracterização geotécnica, resistência mecânica, medição da sucção matricial, determinação da curva de retenção de água no solo e análise de estabilidade. Cada um destes estão descritos nos itens a seguir.

4.4.1. Ensaios para caracterização geotécnica dos solos

Como parte do programa de caracterização, foram determinados os valores de umidade, peso específico natural e seco, peso específico dos sólidos, granulometria e limites de Atterberg para as quatro amostras de solos estudadas. Durante a execução dos ensaios de caracterização, foram seguidos os procedimentos previstos nas seguintes normas da ABNT: NBR 5734, NBR 6427, NBR 6508, NBR 6459, NBR 9180 e NBR 7181.

4.4.2. Ensaios de resistência mecânica dos solos

Para traçar as envoltórias de ruptura do solo e calcular os ângulos de atrito e coesões, foram feitos ensaios de cisalhamento direto e triaxial. Os ensaios de cisalhamento direto foram feitos na umidade do solo em seu estado natural e inundado, e os ensaios triaxiais, na umidade do solo em seu estado natural.

Na Tabela 2 são mostradas as condições de umidade e tensão de adensamento para cada amostra. A Tabela 3 apresenta as condições de umidade e tensão normal para cada amostra.

As tensões normais e de adensamento foram escolhidas visando estarem próximas do estado de tensões a que o solo estava sujeito no campo.

Tabela 2 – Condições dos ensaios triaxiais

Amostra	Umidade (%)	Tensão de adensamento (KPa)			
MBRJ	28	75	150	300	600
MBRM	35	30	75	150	300
VGRJ	34	25	50	100	200
VGRM	29	25	50	100	200

Tabela 3 – Condições dos ensaios de cisalhamento direto

Amostra	Umidade (%)	Tensão normal (KPa)			
MBRJ	28	75	150	300	600
MBRJ	Inundado	75	150	300	600
MBRM	36	50	100	300	
MBRM	Inundado	50	150	300	
VGRJ	35	25	50	100	
VGRJ	Inundado	25	50	100	
VGRM	30	25	50	100	200
VGRM	Inundado	25	50	100	200

4.4.3. Ensaios para medição da sucção matricial com papel-filtro

Para a medição da sucção matricial das amostras retiradas do campo, em laboratório, foi utilizada a técnica do papel-filtro, normalizado pela norma ASTM-D5298-92. A técnica foi utilizada a partir de experiências obtidas por outros autores. O papel-filtro usado na realização dos ensaios foi o Whatman número 42 e, para este, utilizou-se a curva de calibração dada em FREDLUND e RAHARDJO (1993), apresentada na Figura 15. A equação para a curva de calibração é representada a seguir:

Equação 5

$$w \leq 45 \ominus \text{ sucção} = 10^{5,327-0,0779 \cdot w}$$

$$w > 45 \ominus \text{ sucção} = 10^{2,412-0,0135 \cdot w}$$

em que:

w = valor da umidade do papel-filtro.

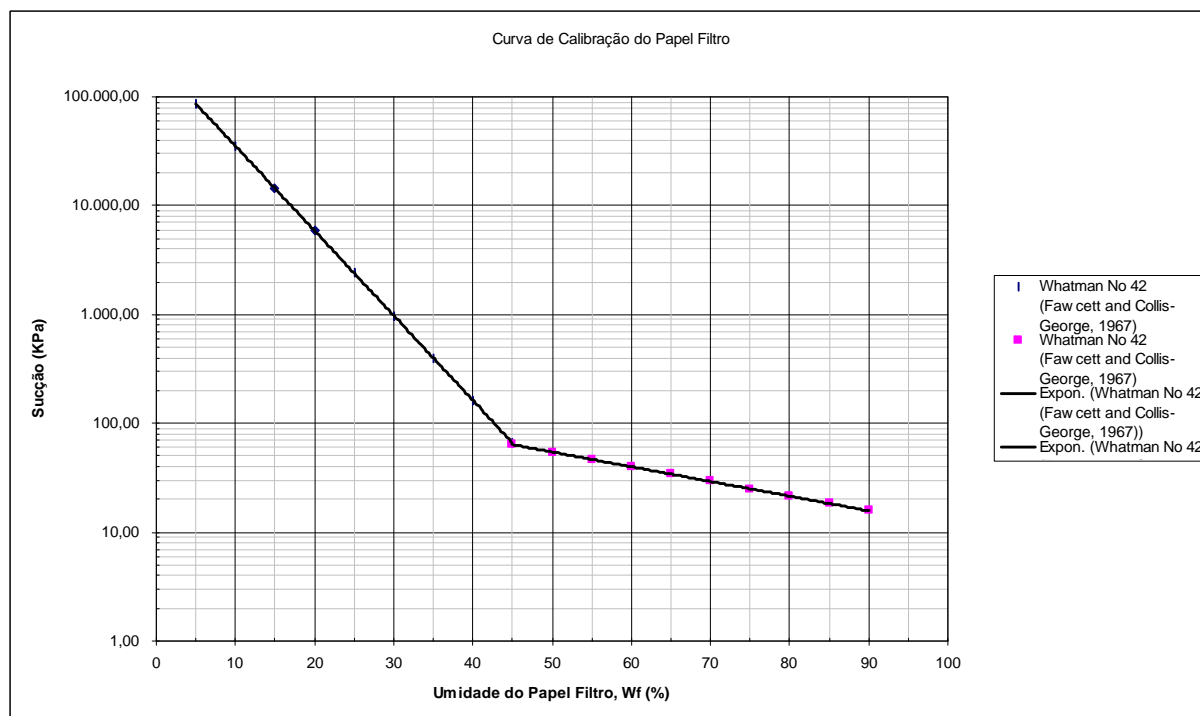


Figura 15 – Gráfico da curva característica do papel-filtro Whatman no 42, dada em FREDLUND e RAHARDJO (1993).

Na realização dos ensaios procurou-se obedecer às seguintes etapas:

- moldagem dos corpos-de-provas;
- colocação dos papéis-filtros;
- estabilização;
- pesagem dos papéis-filtros e corpos-de-prova;
- colocação dos papéis-filtros e do solo em estufa;
- pesagem dos papéis-filtros e do solo; e
- cálculos finais das umidades e sucção.

Os corpos de prova foram moldados em amostras indeformadas, retiradas dos taludes. Na moldagem utilizaram anéis de aproximadamente 5 cm de diâmetro e de 2 a 4 cm de altura (Figura 16).

Os papéis-filtros foram retirados diretamente da caixa com pinças e colocados nos corpos-de-prova. Estes são colocados entre dois corpos-de-prova ou em suas extremidades (Figura 17).

Os corpos-de-prova foram enrolados em papéis-filmes de PVC e papéis-alumínios e guardados em uma vasilha plástica, em uma sala com umidade e temperatura controladas por no mínimo sete dias (Figura 18).

Foi retirado o papel-filtro do meio e colocado em uma cápsula. Pesou-se a cápsula antes (tara) e depois de colocar o papel. A balança usada deve ter precisão de 4 dígitos, medida em gramas (Figura 19).

As cápsulas foram colocadas em uma estufa por 24 horas.

As cápsulas foram retiradas da estufa e colocadas em cima de um bloco de alumínio, para que elas esfriassem rapidamente. Pesou-se a cápsula com o papel-filtro seco e depois sem o papel (Figura 20).

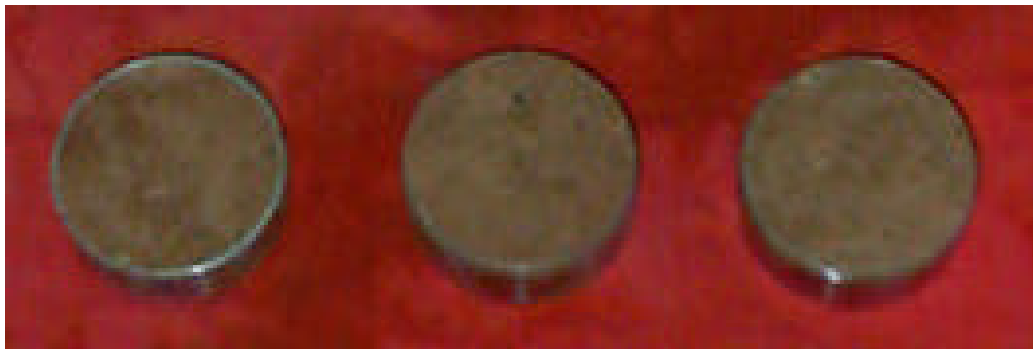


Figura 16 – Corpos-de-prova moldados para realização da técnica do papel-filtro.

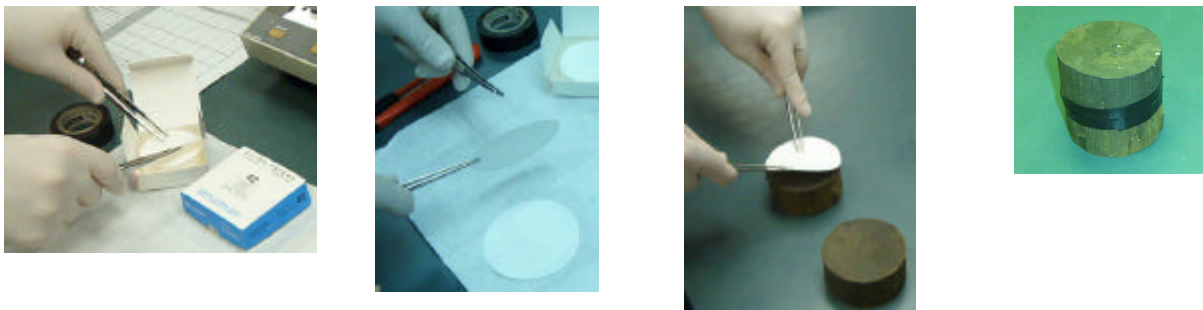


Figura 17: Representação da colocação dos papéis-filtros nos corpos-de-prova.

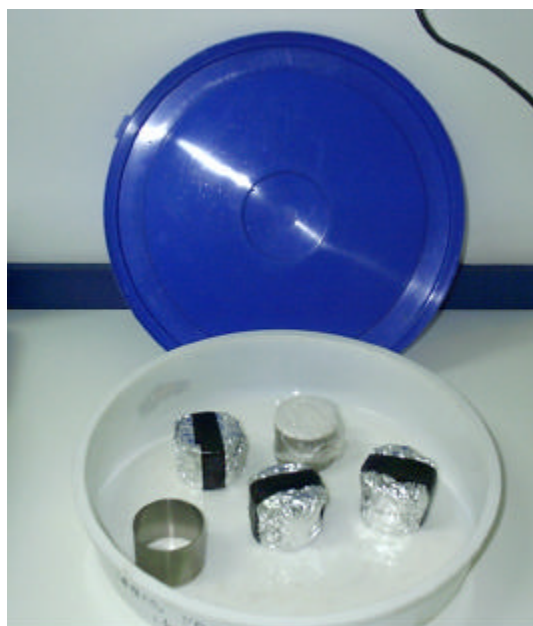


Figura 18 – Foto dos enrolados em papéis-filmes de PVC e papéis-alumínios e guardados em uma vasilha plástica para estabilização.

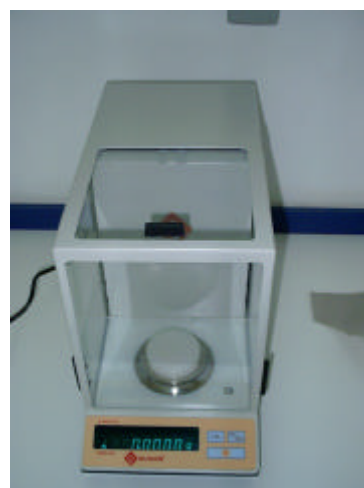


Figura 19 – Representação da retirada dos papéis-filtros para pesagem em balança de precisão.



Figura 20 – Representação da pesagem dos papéis-filtros após estufa com resfriamento das cápsulas em bloco de alumínio, em balança de precisão.

Com os ensaios realizados, os valores medidos foram:

- T_f = massa da tara fria;
- M_1 = massa do papel-filtro úmido + tara fria;
- M_2 = massa do papel-filtro seco + tara quente;
- T_q = massa da tara quente.

Os valores calculados foram:

- $M_f = (M_2 - T_q)$ = massa do papel filtro seco;
- $M_w = (M_1 - T_f) - (M_2 - T_q)$ = massa da água no papel-filtro;
- M_w/M_f = umidade do papel-filtro.

A partir da curva de calibração do papel-filtro, tem-se um valor de sucção para cada valor de umidade do papel-filtro calculado. O valor da sucção é obtido a partir da Figura 15 ou da Equação 5.

Foram realizados 43 ensaios para os quatro tipos de solo, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaios realizados pela técnica do papel-filtro

Ensaios de papel-filtro	
VGRM	16
VGRJ	11
MBRM	3
MBRJ	13
TOTAL	43

4.4.4. Ensaios para determinação da curva de retenção de água dos solos com câmara de pressão

Como parte do programa de caracterização do solo foram realizados ensaios para determinação das curvas características de sucção para os quatro tipos de amostra. A determinação da curva característica de sucção do solo se deu segundo dois procedimentos: para baixos valores de sucção, até 20 KPa, foi empregada a Coluna de Tensão e, para sucção acima deste valor, foi empregado o Extrator de Richard. O valor máximo da sucção aplicada foi de 100 KPa, sendo a maior sucção aplicada devida ao limite da panela de pressão utilizada na realização do ensaio; acima deste valor, a panela perdia a sua vedação e não conseguia manter a pressão de ar interna.

Com base nesses conceitos, realizou-se o ensaio com as etapas descritas a seguir:

- os corpos-de-prova foram moldados em cilindros de metal de aproximadamente 5 cm de diâmetro e altura que variava da 2 a 4 cm, e estes foram envolvidos em um pano, como pode ser visto na Figura 22, para que não houvesse perda de material durante o ensaio. Os corpos-de-prova foram moldados e saturados a partir das amostras indeformadas;

- a saturação foi precedida pela aplicação de vácuo, conforme descrito nos estudos de CUSTÓDIO et al. (2004), de modo que garantisse a integridade das amostras ensaiadas (Figura 21);
- cada corpo-de-prova foi cadastrado e foram medidas as suas dimensões e peso, para cálculo dos pesos específicos e das umidades iniciais;
- depois de os corpos-de-prova estarem todos prontos para o início do ensaio, eles foram colocados em cima de uma pedra porosa (Figura 22) e esta foi ligada a uma coluna d'água com desnível, para gerar a pressão negativa aplicada ao solo. Essa etapa, chamada de Coluna de Pressão, se deu para pressões negativas de 2,5, 5, 10 e 20 KPa, sendo cada 1 KPa gerado por um desnível de 10 cm de altura de coluna d'água; ao chegar a 20 KPa, 2 metros de coluna d'água, o ensaio se torna inviável;
- a segunda etapa foi aplicado o extrator de Richard. Nesta etapa aplica-se uma pressão de ar positiva na panela de pressão, que gera uma diferença de pressão entre o ar e a água; pela técnica de translação de eixo de HILF (1956), a pressão do ar subtraída da pressão da água é igual à sucção matricial do solo. Assim, foram aplicadas aos corpos-de-prova as pressões negativas de 50 e 100 KPa.



Figura 21 – Processo de saturação dos corpos-de-prova através de aplicação de vácuo.

Cada etapa, onde se aplicava uma pressão negativa no solo, durava em média uma semana e, ao final de cada uma delas, cada corpo-de-prova era pesado, para calcular os novos valores de umidade. A partir dos valores de umidade e sucção matricial, foi traçada a curva característica de retenção de água no solo. A pedra porosa escolhida para cada pressão aplicada tinha de ter o valor-limite para entrada de ar menor que o valor da pressão aplicada para que ela se mantivesse sempre saturada.



Figura 22 – Corpos-de-prova em cima da pedra porosa.

Todo esse processo foi realizado no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil, com os equipamentos disponíveis. Na Figura 23 é apresentada a aparelhagem utilizada, onde se vê: uma panela prata, usada para aplicação da pressão de ar, e um cilindro branco, para realização das etapas de Coluna de Pressão.



Figura 23 – Aparelhagem para ensaio de câmara de pressão, com aplicação de pressão de ar dentro de uma panela de pressão.

Para cada amostra de solo foram feitos três corpos-de-prova. Nas Tabela 5 Tabela 6 são apresentados os dados iniciais do ensaio para o solo do talude MB e do talude VG, respectivamente. As sucções aplicadas aos corpos-de-prova foram de 2,5, 5, 10, 20, 50 e 100 KPa.

Tabela 5 – Dados dos corpos-de-prova das amostras de solo retiradas do talude MB

AMOSTRA		MBRJ			MBRM		
CORPO DE PROVA		1	2	3	1	2	3
Diâmetro	[mm]	49,00	48,60	49,30	48,70	48,55	48,60
Altura	[mm]	30,15	29,75	30,00	20,20	20,30	20,10
Tara	[g]	39,00	37,00	29,00	25,00	30,00	32,00
Volume	[cm ³]	56,86	55,19	57,27	37,63	37,58	37,29

Tabela 6 – Dados dos corpos-de-prova das amostras de solo retiradas do talude VG

SOLO		VGRJ			VGRM		
CORPO DE PROVA		1	2	3	1	2	3
Diâmetro	[mm]	48,65	48,60	48,65	49,00	48,95	49,00
Altura	[mm]	30,20	30,40	30,00	20,50	19,80	20,00
Tara	[g]	37,00	35,00	41,50	20,00	19,00	21,00
Volume	[cm ³]	56,14	56,39	55,77	38,66	37,26	37,71

4.4.5. Análises de estabilidade

Na realização das análises de estabilidade, trabalhou-se com:

- o método de Equilíbrio Plástico Limite, com superfície de ruptura circular e empregando os métodos de Bishop e Fellenius;
- os taludes como corpos bidimensionais, não se levando em conta os condicionantes espaciais de confinamento das seções;
- critério de ruptura de Morh-Coulomb, em termos de tensões efetivas; e
- programa de computador SOLPE/W *version* 4.21, da GEO-SLOPE International Ltd.

Os valores de coesão e ângulo de atrito foram obtidos dos ensaios de cisalhamento direto, na condição natural e inundada, e triaxiais, na condição natural. Os valores de peso específico foram obtidos dos ensaios de caracterização.

Para cada talude foi definida uma seção de corte, onde foram feitas as análises de estabilidade para o solo nas condições de resistência mecânica encontrada nos

ensaios realizados em suas amostras. Procurou-se obter como resposta, para as análises, os menores fatores de segurança para o solo nas condições natural e inundada, encontrada nos ensaios de cisalhamento direto, e natural, encontrada nos ensaios triaxiais CIU-nat.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Ensaio de caracterização

Nas Tabelas 7 e 8 apresentam-se os valores de umidade, peso específico, índice de vazios e caracterização geotécnica dos solos, no qual são mostrados os resultados da análise granulométrica, massa específica dos sólidos, massa específica natural do solo e os limites de Atterberg obtidos para cada amostra. Na Figura 24 são apresentadas as curvas granulométricas para cada amostra de solo analisada.

Observa-se que as amostras definidas como solo residual maduro, VGRM e MBRM, apresentam 61% de partículas de tamanho argila, limites de liquidez de 76,9 e 84,9% e índice de plasticidade de 38,2 e 34,9%, respectivamente, ao passo que aquelas definidas como solo residual jovem, VGRJ e MBRJ, apresentam 22 e 24% de partículas de tamanho argila, limites de liquidez de 51,1 e 59,6% e índice de plasticidade de 26,2 e 31,6%, respectivamente. A massa específica seca variou de 10,4 (MBRM) a 12,7 KN/m³ (VGRM), e o índice de vazios, de 1,11 (VGRM) a 1,67 (MBRM).

Analisando os resultados obtidos para a caracterização do solo, nota-se que as amostras definidas como solos residuais jovem apresentam diferenças significantes na granulometria (grãos silte e argila) nos dois taludes, assim como aquelas definidas como solo residual maduro. O solo residual maduro apresentou valores maiores – para percentual de partículas de argila, limites de liquidez e índices de plasticidade – do que os do solo residual jovem.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de caracterização para as amostras de solo retiradas do talude VG

AMOSTRA	VGRJ	VGRM
W (%)	35	29
γ_d (KN/m ³)	11,7	12,7
γ (KN/m ³)	15,8	16,3
γ_s (KN/m ³)	27,2	26,5
.e	1,33	1,11
W _L (%)	51,1	76,9
I _P (%)	26,2	38,2
AREIA (%)	36	27
SILTE (%)	43	12
ARGILA (%)	22	61

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de caracterização para as amostras de solo retiradas do talude MB

AMOSTRA	MBRJ	MBRM
W (%)	28	35
γ_d (KN/m ³)	12,6	10,4
γ (KN/m ³)	16,1	14,1
γ_s (KN/m ³)	27,0	27,7
.e	1,14	1,67
W _L (%)	59,6	84,9
I _P (%)	31,6	34,9
AREIA (%)	55	37
SILTE (%)	21	3
ARGILA (%)	24	61

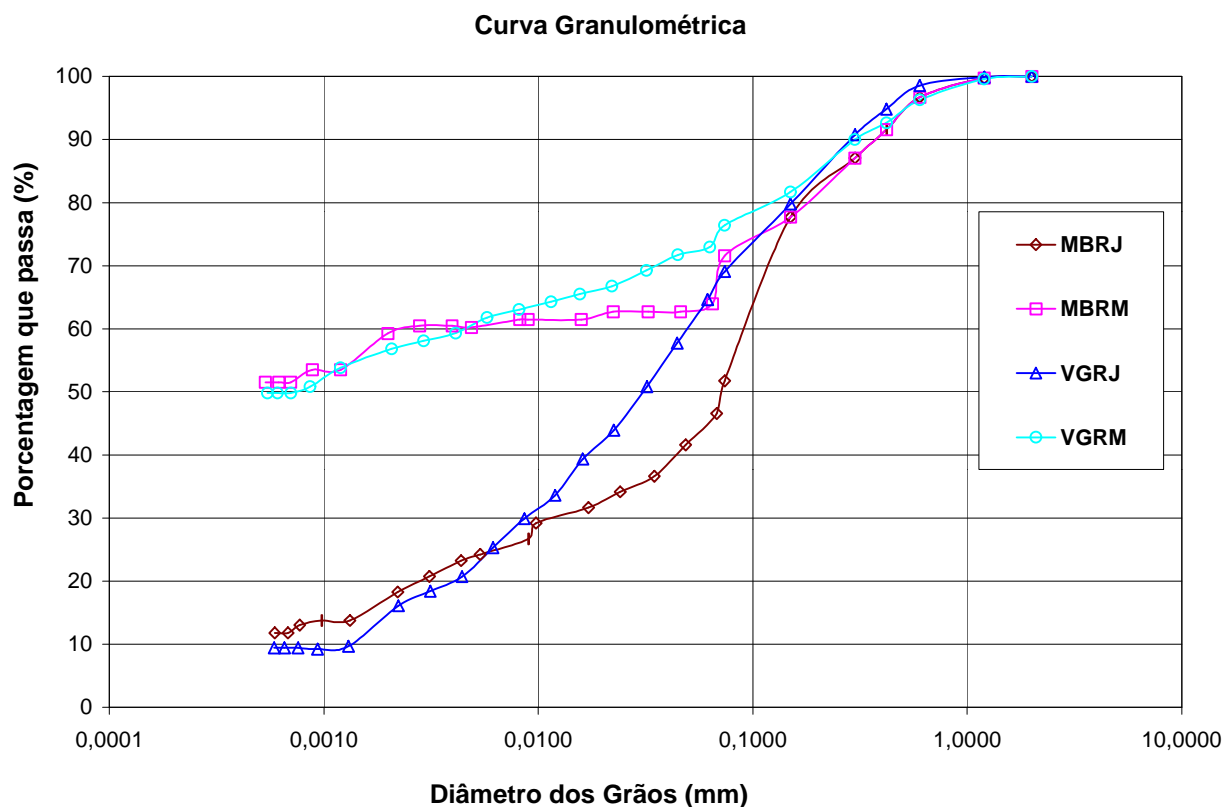


Figura 24 – Curvas granulométricas obtidas para as amostras VGRM, VGRJ, MBRM e MBRJ.

A Tabela 9 traz a classificação geotécnica das amostras, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e com a Classificação do Transportation Research Board (TRB), também adotada pela AASHTO, que utilizam como parâmetros de classificação, além da granulometria, os limites de Atterberg.

Segundo a classificação TRB, nota-se que as amostras foram classificadas como A-7-5 (VGRM e MBRM) e A-7-6 (VGRJ e MBRJ). Pelo sistema SUCS, elas foram classificadas como silte (VGRM e MBRM) e argila (VGRJ e MBRJ) de alta compressibilidade.

Tabela 9 – Classificação geotécnica das amostras de solo estudadas

AMOSTRA	SUCS	HRB
VGRM	MH	A 7-5
VGRJ	CH	A 7-6
MBRM	MH	A 7-5
MBRJ	CH	A 7-6

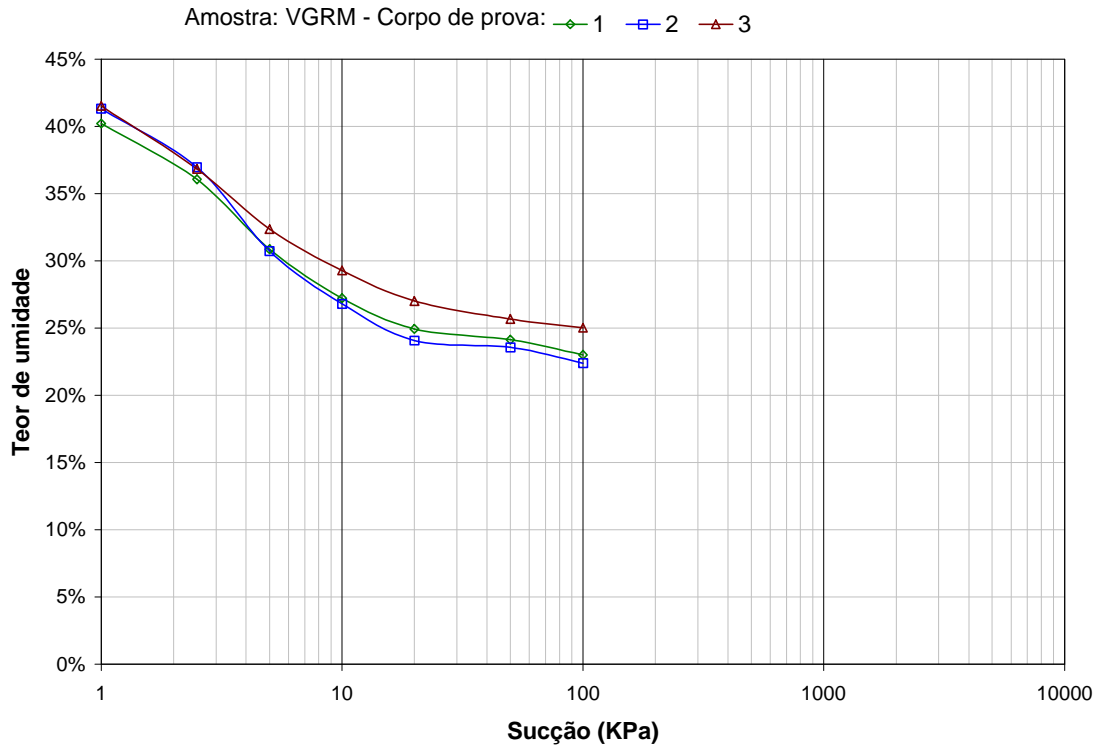
5.2. Ensaio para medição de sucção

5.2.1. Câmera de pressão

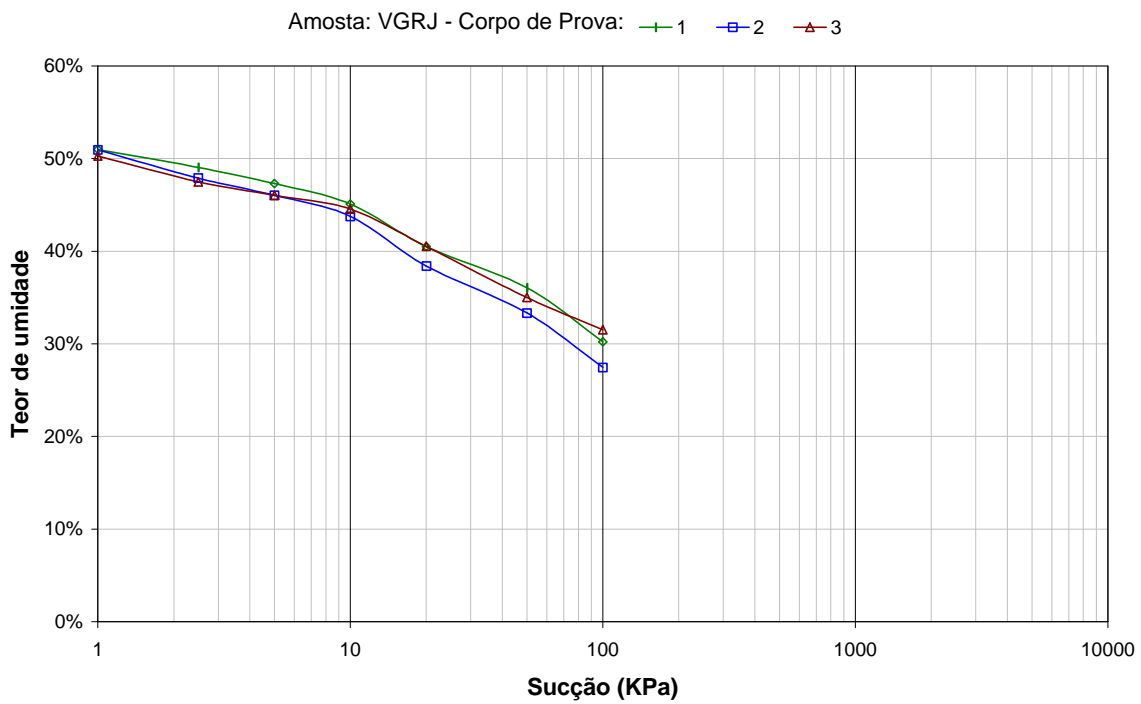
Nas Figuras 25 e 26 são apresentados os gráficos das curvas características de sucção obtidas para as amostras de solo VGRM, VGRJ, MBRM e MBRJ. As figuras trazem, em escala semilogarítmica, o valor da umidade encontrada em função do valor da sucção matricial aplicada para cada corpo-de-prova ensaiado.

Os resultados dos ensaios, que foram realizados com três corpos-de-prova, para cada amostra, mostram que não houve grandes diferenças entre esses corpos-de-prova nas curvas encontradas.

A sucção matricial máxima utilizada foi de apenas 100 KPa, definida por limitações do equipamento utilizado; por essa razão não se chegou ao grau de saturação residual.

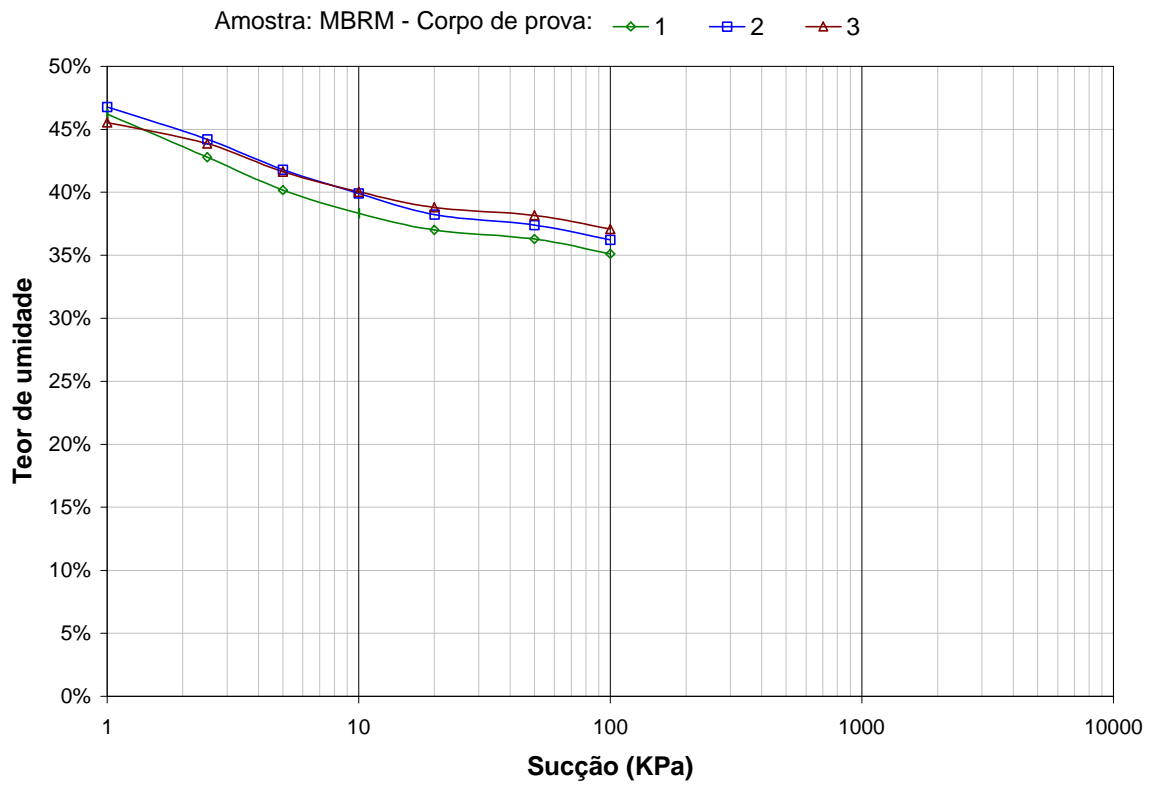


(A)

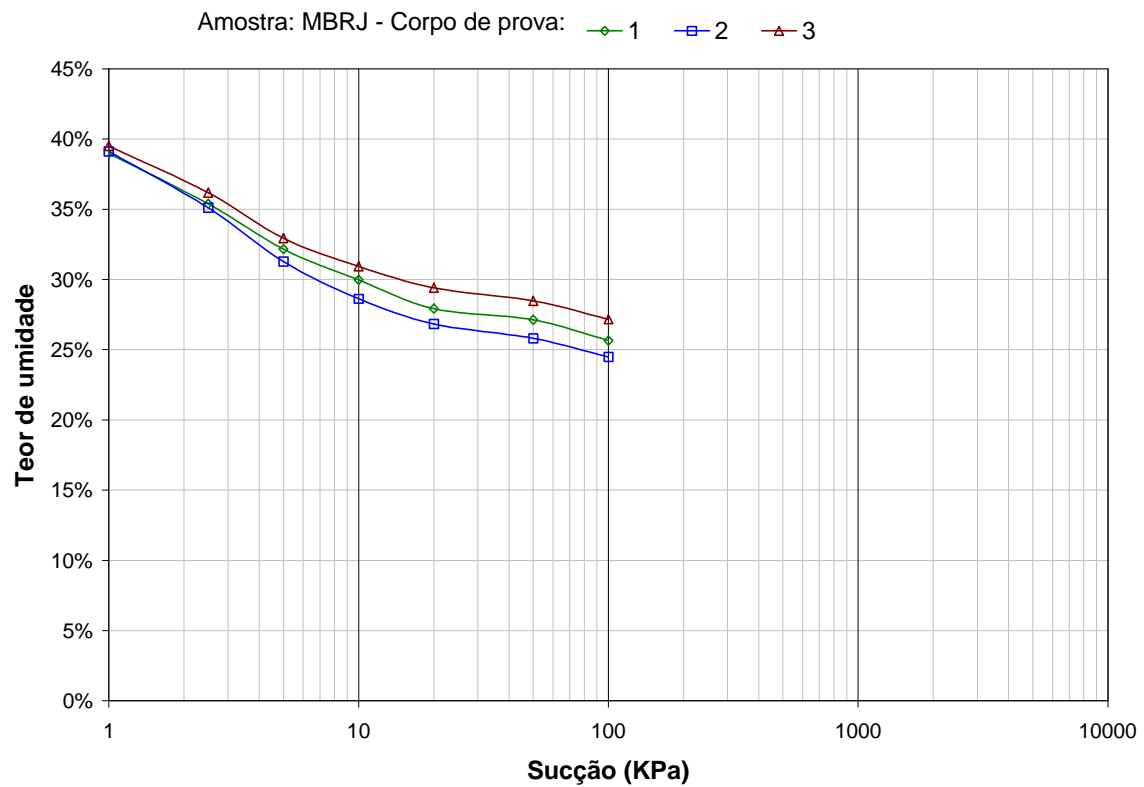


(B)

Figura 25 – Curvas características de sucção obtidas para as amostras de solo do talude VG: (A) VGRM e (B) VGRJ.



(A)



(B)

Figura 26 – Curvas características de sucção obtidas para as amostras de solo do talude MB: (A) MBRM e (B) MBRJ.

As curvas características de sucção apresentadas nas Figura 25 e Figura 26 foram ajustadas utilizando-se a equação proposta por FREDLUND e XING (1994), já representada pela Equação 2, no item 2.5, que apresenta a umidade em função da sucção matricial. Essa equação também pode ser apresentada como grau de saturação em função da sucção matricial, como se segue:

Equação 6

$$S_r = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{y}{y_R}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1.000.000}{y_R}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{y}{a}\right)^n\right)} \right]^m$$

em que:

S_r = valor do grau de saturação;

y_R = valor da sucção matricial para o grau de saturação residual, S_r ;

y = valor da sucção matricial;

e = base dos algarismos neperianos ($e = 2,718$);

a = uma aproximação do valor de entrada de ar do solo

n = parâmetro que controla a inclinação do ponto de inflexão da curva característica de sucção do solo;

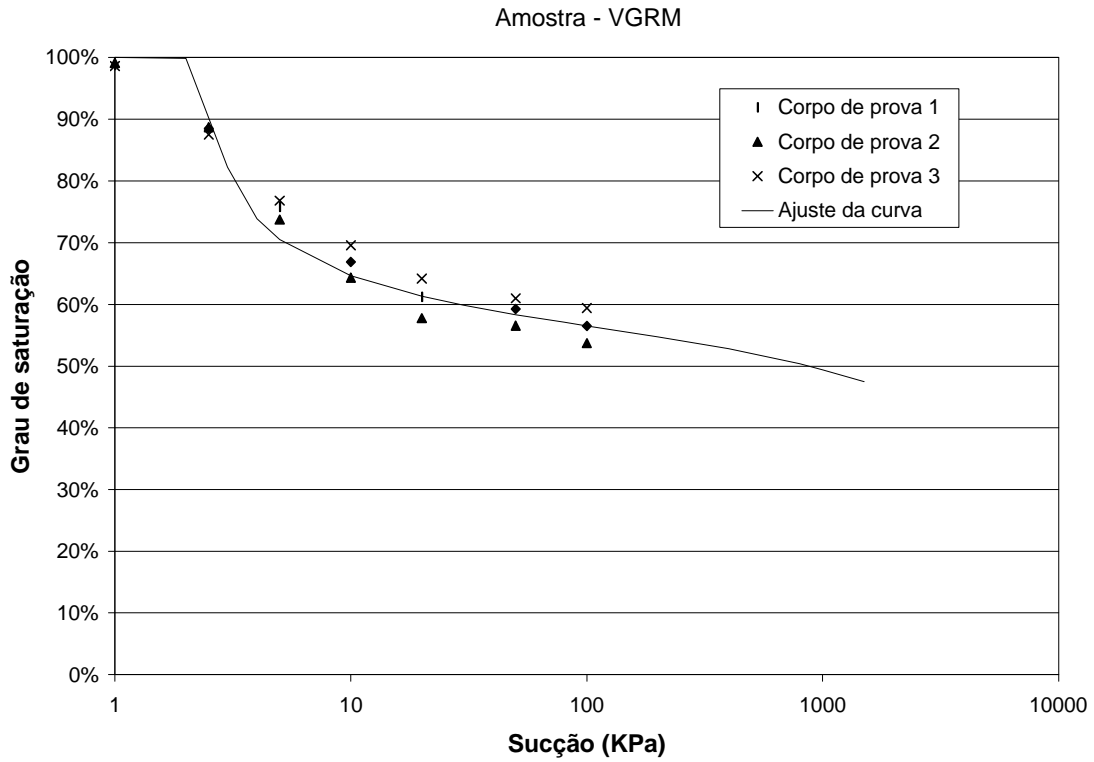
m = parâmetro relacionado com a umidade volumétrica residual.

Na Tabela 10 são mostrados os valores dos parâmetros adotados para cada amostra no ajuste aos dados experimentais mostrados nos gráficos das Figuras 25 e 26. Para todas as amostras de solo, o valor da sucção residual foi estimado em cerca de 1500 KPa, tendo como base, as curvas características de sucção encontradas por LUIZ (2000) na mesma região.

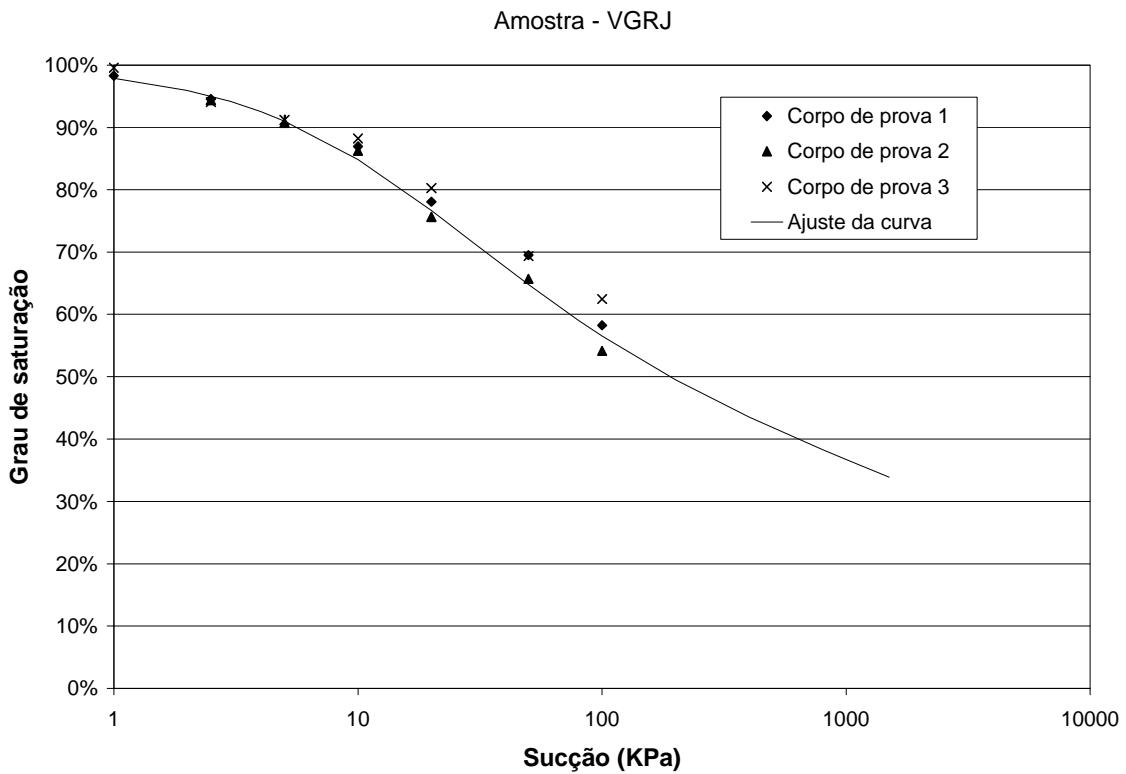
Tabela 10 – Parâmetros utilizados no ajuste aos dados experimentais da curva característica de sucção no solo

AMOSTRA	r (KPa)	a	n	m
VGRM	1500	2,4	20	0,13
VGRJ	1500	10	1	0,6
MBRM	1500	2	10	0,07
MBRJ	1500	2	10	0,1

As Figuras 27 e 28 trazem os pontos experimentais obtidos para cada corpo-de-prova e a curva gerada pela Equação 6 (grau de saturação *versus* sucção matricial), visando representar a curva característica final para cada amostra de solo.



(A)



(B)

Figura 27 – Pontos ajustados para a curva característica das amostras de solo: (A) VGRM e (B) VGRJ.

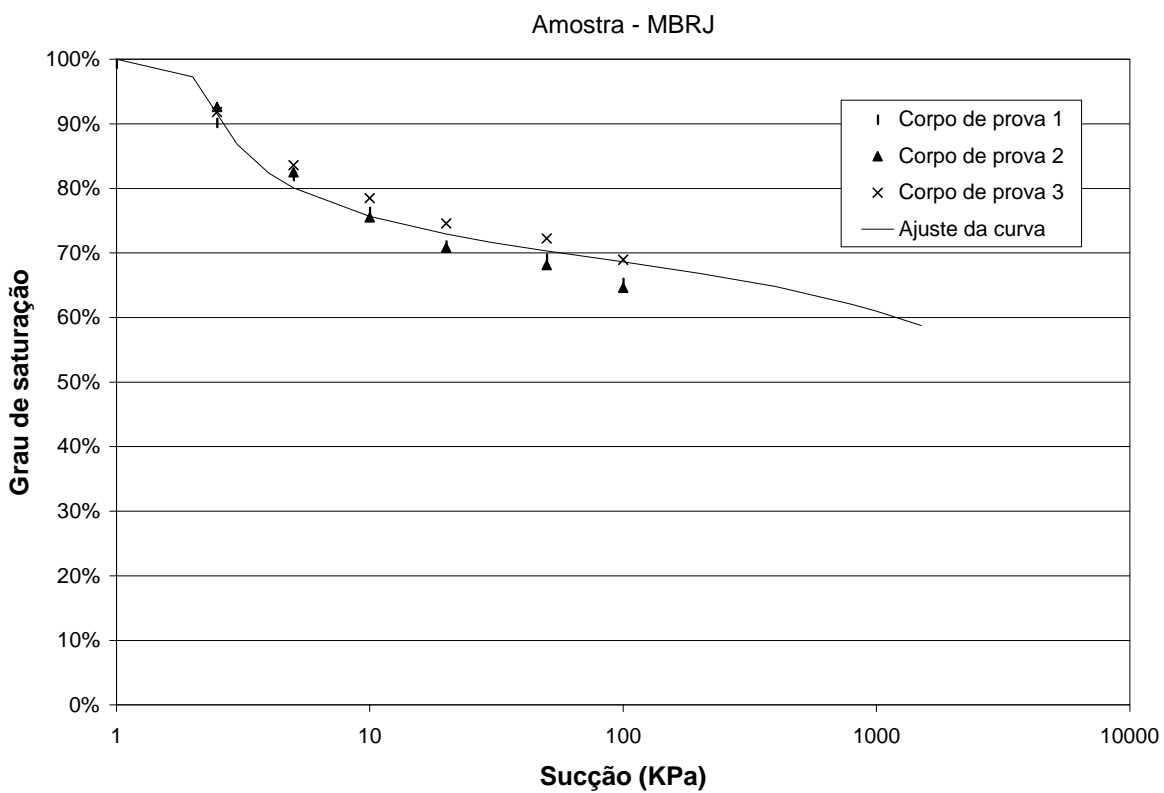
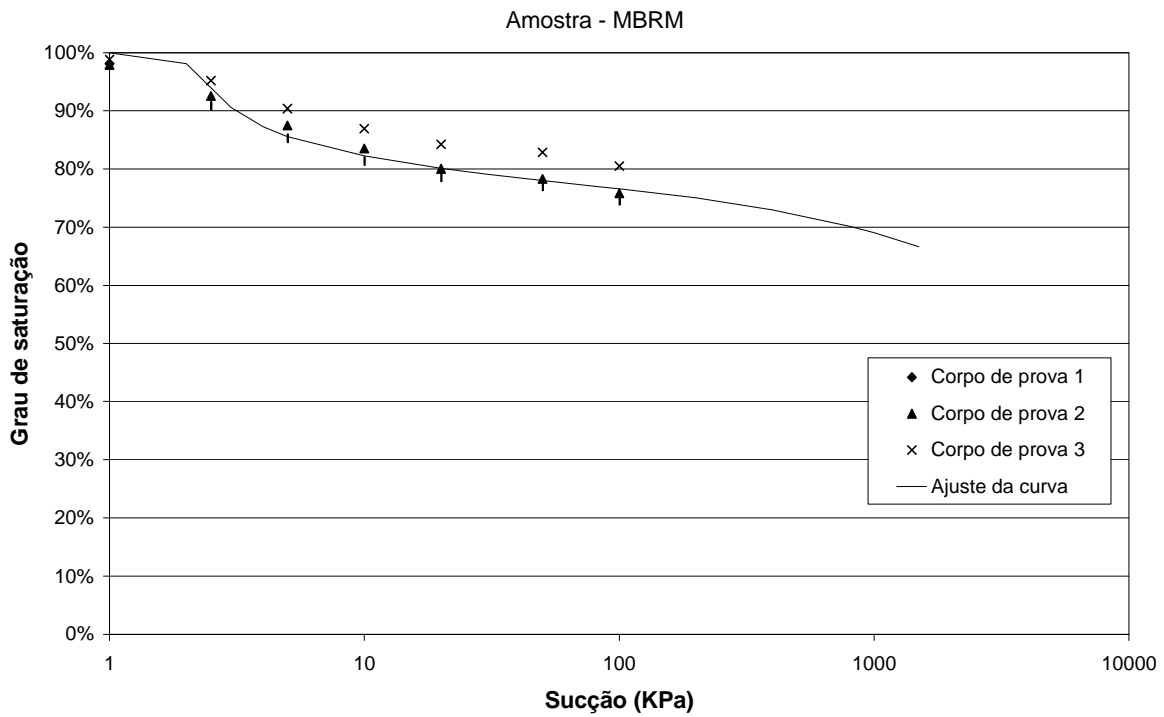


Figura 28 – Pontos ajustados para a curva característica das amostras de solo: (A) MBRM e (B) MBRJ.

5.2.2. Papel-filtro

Com o uso do método do papel-filtro, mediu-se a sucção matricial das amostras retiradas do campo com diversas umidades diferentes. Foi realizado um total de 43 ensaios para as quatro amostras estudadas, sendo 3 para a amostra MBRM, 13 para a MBRJ, 16 para a VGRM e 11 para a VGRJ. Os ensaios foram feitos com corpos-de-prova indeformados, moldados a partir das amostras em laboratório ou diretamente no talude, no mesmo local de retirada das amostras. Esse artifício foi usado para obter corpos-de-prova com diferentes umidades.

Os resultados dos ensaios para as amostras retiradas do talude MB são mostrados nas Tabelas 11 e 12.

Nas Tabelas 13 e 14 encontram-se os resultados dos ensaios para as amostras retiradas do talude VG.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de papel-filtro para a amostra MBRM.

ENSAIO	UMIDADE SOLO	UMIDADE PAPEL-FILTRO	SUCÇÃO CALCULADA (KPa)
1	35,08%	53,98%	48
2	34,90%	52,46%	51
3	34,65%	59,05%	41

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de papel-filtro para a amostra MBRJ

ENSAIO	UMIDADE SOLO	UMIDADE PAPEL-FILTRO	SUCÇÃO CALCULADA (KPa)
1	26,17%	27,85%	1.437
2	27,21%	27,50%	1.530
3	34,63%	26,63%	1.789
4	28,87%	29,60%	1.050
5	22,37%	28,63%	1.249
6	23,20%	23,82%	2.961
7	24,50%	27,36%	1.569
8	29,20%	28,90%	1.190
9	23,30%	21,85%	4.216
10	26,87%	29,75%	1.022
11	27,30%	27,52%	1.525
12	26,70%	28,80%	1.212
13	27,98%	30,15%	951

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de papel-filtro para a amostra VGRM

ENSAIO	UMIDADE SOLO	UMIDADE PAPEL-FILTRO	SUCÇÃO CALCULADA (KPa)
1	27,88%	28,28%	1.330
2	28,52%	77,27%	23
3	26,73%	18,40%	7.828
4	26,20%	25,43%	2.218
5	26,70%	22,26%	3.917
6	26,60%	23,09%	3.375
7	26,54%	20,12%	5.750
8	27,08%	24,23%	2.751
9	35,31%	133,00%	4
10	30,50%	44,40%	74
11	26,45%	22,09%	4.038
12	27,62%	21,59%	4.417
13	26,57%	21,26%	4.686
14	27,83%	23,11%	3.363
15	27,26%	23,19%	3.315
16	26,92%	22,80%	3.555

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de papel-filtro para a amostra VGRJ

ENSAIO	UMIDADE SOLO	UMIDADE PAPEL-FILTRO	SUCÇÃO CALCULADA (KPa)
1	35,47%	57,43%	43
2	33,78%	56,97%	44
3	35,41%	55,28%	46
4	37,27%	55,35%	46
5	36,52%	60,73%	39
6	35,33%	62,22%	37
7	30,06%	55,75%	46
8	31,74%	56,79%	44
9	33,78%	54,40%	48
10	34,88%	61,49%	38
11	34,18%	83,45%	19

5.2.3. Tensiômetro

Como descrito no item 4.3.1, foram feitas leituras nos tensiômetros de 30 e 90 cm de comprimento e retiradas as umidades do solo no momento da sua instalação e retirada dos taludes. As leituras feitas nos taludes são apresentadas na Tabela 15, mostrando as umidades e as leituras de sucção.

Tabela 15 – Leituras dos tensiômetros feitas no taludes

DATA	TALUDE VG				TALUDE MB			
	T30 (KPa)	UMIDADE T30	T90 (KPa)	UMIDADE T90	T30 (KPa)	UMIDADE T30	T90 (KPa)	UMIDADE T90
02/06/04	27,33		36,66					
03/06/04	25,33		36,66					
04/06/04	9,33		32,00					
19/06/04	38,66		52,00					
20/06/04	38,00		52,00					
21/06/04	38,00		51,33					
22/06/04	29,33		37,33					
23/06/04	31,33		40,00					
24/06/04	32,00		40,00					
25/06/04	33,33		38,66					
26/06/04	34,66		39,33					
27/06/04	35,33		40,00					
28/06/04	36,66		40,00					
30/06/04					11,33	31%	9,33	37%
01/07/04					10,67		8,00	
02/07/04					9,33		5,33	
06/07/04					17,33		8,00	
07/07/04					18,67		8,67	
08/07/04					17,33		9,33	
09/07/04					16,00	33%	9,33	38%
10/07/04	61,33	24%	56,00	28%				
11/07/04	11,07		60,00					
12/07/04	53,06		62,66					
13/07/04	59,33		61,33					
14/07/04	63,99		62,66					
15/07/04	66,66		61,33					

Continuação: Tabela 15

16/07/04	69,33		61,99				
17/07/04	69,99		61,99				
18/07/04	71,99		61,99				
19/07/04	72,66		63,33				
20/07/04	71,99		60,00				
21/07/04	73,99	33%	61,33	29%			
22/07/04					8,00	33%	10,67 37%
23/07/04					5,33		10,67
26/07/04					8,00		8,00
28/07/04					10,67		8,00
02/08/04					18,67	32%	12,67 34%
04/08/04	63,99	26%	61,99	28%			
05/08/04	65,33		63,33				
06/08/04	66,66		65,33				
08/08/04	62,66		65,33				
09/08/04	61,33		66,66				
11/08/04	57,33	29%	66,66	25%			
13/08/04					78,66	29%	
24/08/04					74,66		17,33
02/09/04					79,99		44,00
14/09/04	53,33	24%	69,33	24%			
17/09/04	71,99		73,33				
22/09/04	78,66		77,33	24%			
24/09/04					81,33	27%	74,66 30%
28/09/04					85,33		79,99
01/10/04							79,99
04/10/04					78,66	29%	74,66 33%
06/10/04					77,33	32%	75,99 33%
19/10/04	71,99		65,33				

Continuação: Tabela 15

21/10/04	78,66	22%	73,33	22%				
27/10/04	78,66		74,66					
28/10/04	74,66	26%	74,66	26%				
02/11/04					9,33	32%	53,33	33%
04/11/04					14,67		70,66	
06/11/04					16,00		61,33	
08/11/04					18,67	28%	57,33	26%
11/11/04	26,66	36%	65,33	35%				
13/11/04	37,33		66,66					
15/11/04	61,33		71,99					
17/11/04	74,66	26%	71,99	27%				
20/11/04					8,00	37%	2,67	35%
22/11/04					8,67		5,33	
24/11/04					10,67		5,33	
26/11/04					10,67	38%	5,33	32%
30/11/04	53,33	26%	61,33	28%				
03/12/04	34,66		63,99					
05/12/04	26,66		65,33					
08/12/04	62,66		66,66					
10/12/04	21,33		69,33					
13/12/04	18,67		69,33					
15/12/04	16,00		69,33					
18/12/04	8,00		69,33					
21/12/04	8,00		53,33					
24/12/04	8,00		16,00					
27/12/04	9,33	34%	5,33	35%				
30/12/04					9,33	37%	6,67	38%
04/01/05					13,33		8,00	
06/01/05					13,33		8,00	

Continuação: Tabela 15

08/01/05					14,67		8,00		
13/01/05					6,67		2,67		
16/01/05					8,00		4,00		
20/01/05					8,00		2,67		
25/01/05					9,33		2,67		
01/02/05					10,67		4,00		
02/02/05					10,67	38%	6,67		39%
11/02/05	58,66	27%	29,33	30%					
14/02/05	10,67		42,66						
16/02/05	10,67		24,00						
19/02/05	8,00		10,67						
21/02/05	9,33		9,33						
23/02/05	13,33		10,67						
26/02/05	8,00		8,00						
01/03/05	9,33		5,33						
04/03/05	10,67		5,33						
08/03/05	13,33		8,00						
09/03/05	13,33	33%	8,00	35%					
13/03/05					10,67	37%	5,33		39%
15/03/05					13,33		8,00		
18/03/05					13,33		8,00		
24/03/05					10,67		8,00		
29/03/05					13,33		5,33		
02/04/05					10,67	39%	8,00		40%
05/04/05	24,00	30%	41,20	27%					
07/04/05	32,00		44,00						
09/04/05	37,33		50,66						
11/04/05	48,00	26%	56,00	26%					

* T30 e T90: leitura feita nos tensiômetros de 30 e 90 cm de profundidade, respectivamente.

Com os resultados obtidos com os tensiômetros, pode-se observar o comportamento da variação da sucção matricial e da umidade do solo no período estudado. As Figuras 29 e 30 trazem uma representação gráfica dos resultados obtidos com os tensiômetros. Os valores das umidades dos solos apresentadas nas figuras são uma média entre as profundidades de 30 e 90 cm.

SUCÇÃO MEDIDA NO TALUDE DA VIA DE ACESSO À VILA GIANETTI

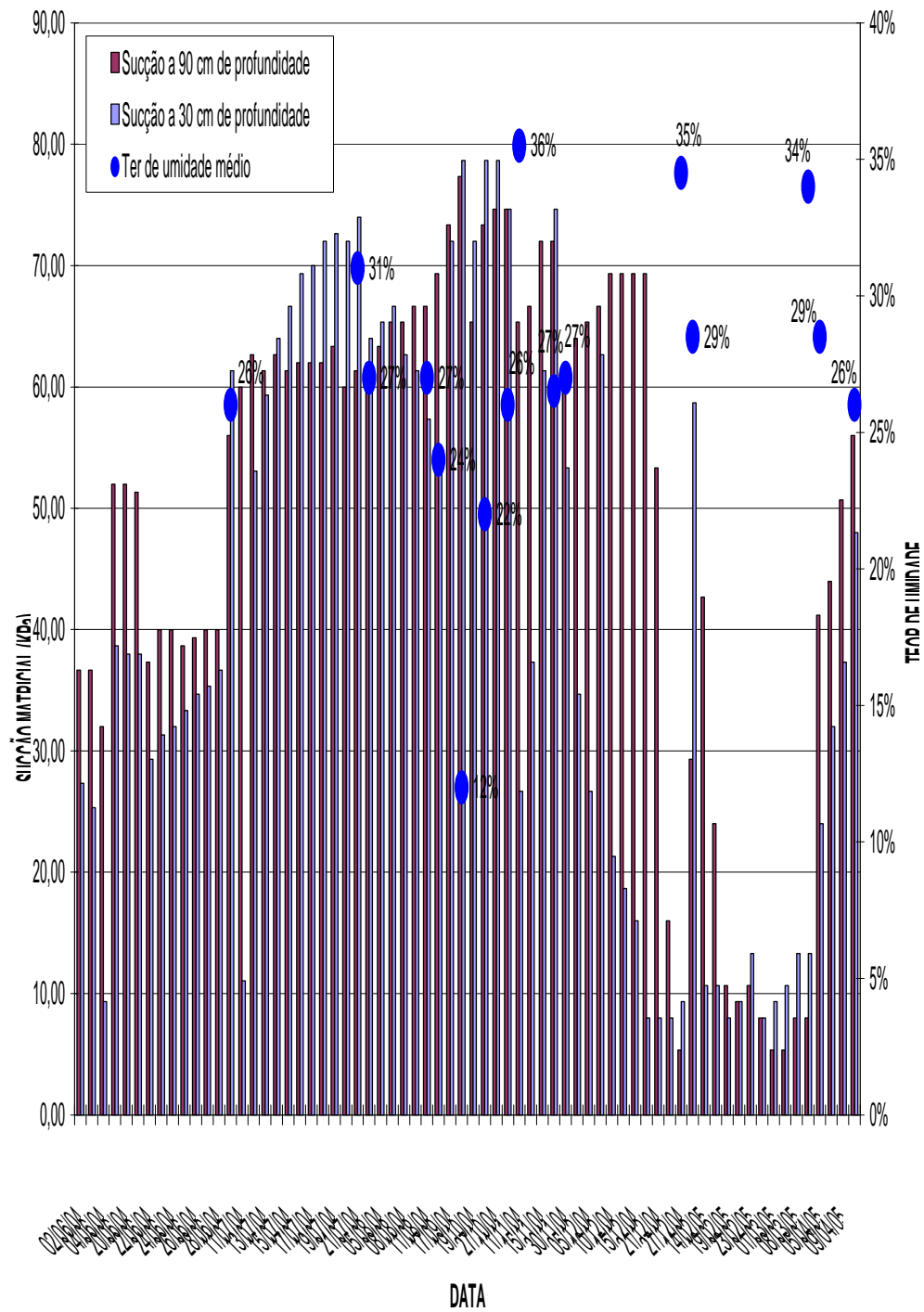


Figura 29 – Representação gráfica das leituras de sucção matricial e umidade média obtidas pelos tensiômetros de 30 e 90 cm de profundidade no talude VG.

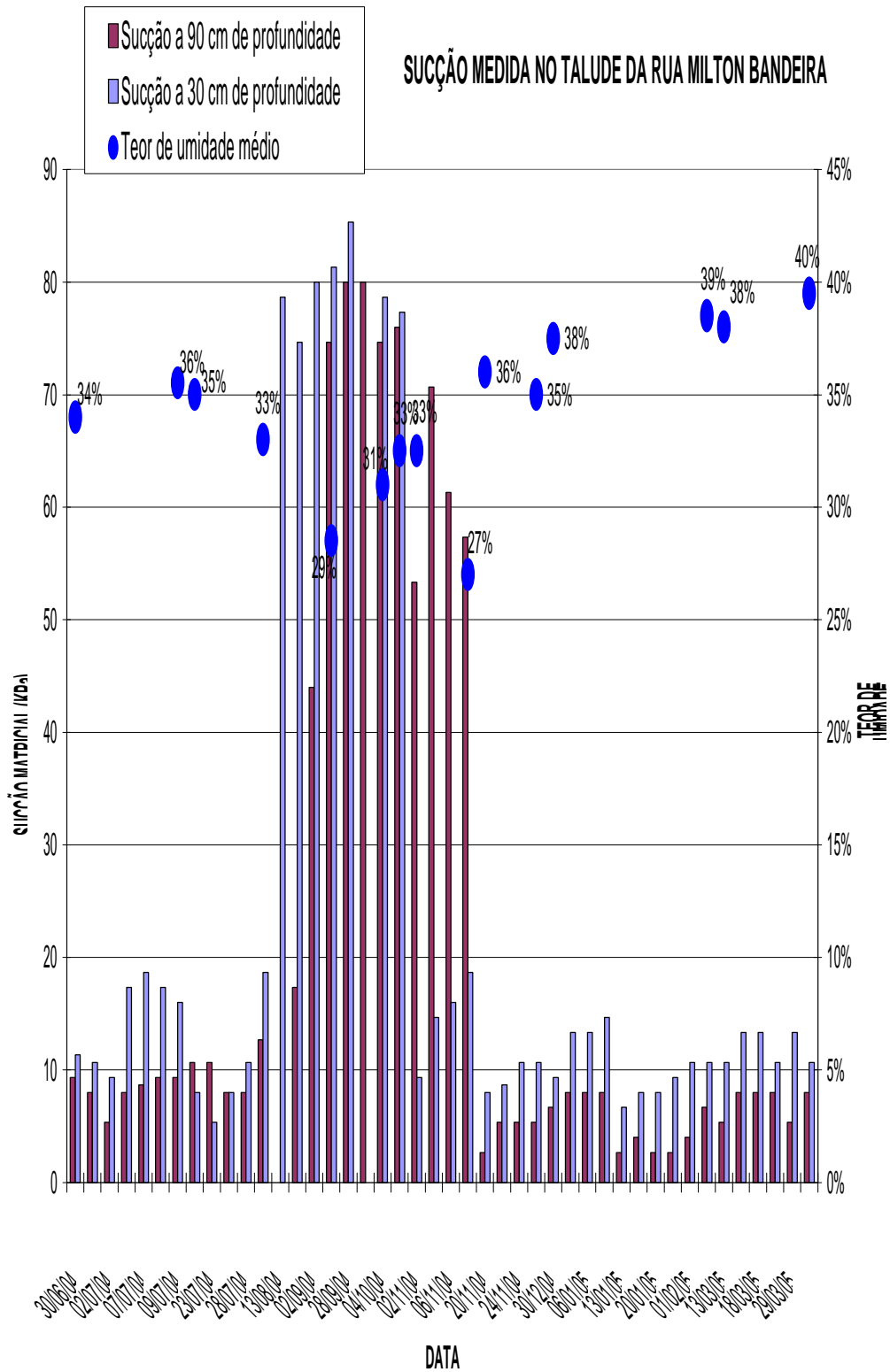


Figura 30 – Representação gráfica das leituras de sucção matricial e umidade média obtidas pelos tensiômetros de 30 e 90 cm de profundidade no talude MB.

Ao analisar os gráficos, pode-se observar que a variação da sucção lida no tensiômetro de 30 cm de profundidade foi muito maior que a do tensiômetro de 90 cm de profundidade.

A partir do gráfico do talude VG (Figura 29), pode-se constatar que:

- em dias de forte chuva, a sucção lida no tensiômetro de 30 cm de profundidade diminuía rapidamente, enquanto que, a leitura da sucção feita no tensiômetro de 90 cm de profundidade se mantinha.
- no mês de junho do ano de 2004 a sucção média medida foi de 31 e 41 KPa para as profundidades de 30 e 90 cm, respectivamente.
- nos meses julho a outubro de 2004 a sucção média medida foi de 65 KPa para as profundidades de 30 e 90 cm.
- no mês de novembro de 2004 a sucção média medida foi de 50 e 67 KPa para as profundidades de 30 e 90 cm, respectivamente.
- no mês de dezembro de 2004 a sucção média medida foi de 21 e 55 KPa para as profundidades de 30 e 90 cm, respectivamente.
- nos meses janeiro a março de 2005 a sucção média medida foi de 15 KPa para as profundidades de 30 e 90 cm.
- no mês de abril de 2005 a sucção média medida foi de 35 e 45 KPa para as profundidades de 30 e 90 cm, respectivamente.

Por meio do gráfico do talude MB (Figura 30) observa-se:

- maior variação da sucção na profundidade de 30 cm.
- dos dias 30 de junho a 2 de agosto de 2004 a sucção média medida foi de 13 e 9 KPa, para as profundidades de 30 e 90 cm, respectivamente.
- dos dias 13 de agosto a 8 de novembro de 2004 a sucção média medida foi de 56 e 63 KPa, para as profundidades de 30 e 90 cm, respectivamente.
- dos dias 20 de novembro de 2004 a 2 de abril de 2005 a sucção média medida foi de 11 e 6 KPa, para as profundidades de 30 e 90 cm, respectivamente.

Para entender melhor o comportamento da variação da umidade e sucção do solo, é interessante analisar a Figura 31, que traz um gráfico com a precipitação e evaporação da região de Viçosa, obtidos no mesmo período em que foram feitas as leituras nos tensiômetros. A partir deste gráfico, observa-se que, quando a sucção atingiu altos valores, nota-se uma pequena quantidade de precipitação e quando a sucção atingiu baixos valores, nota-se uma grande quantidade de precipitação em relação com a quantidade de evaporação.

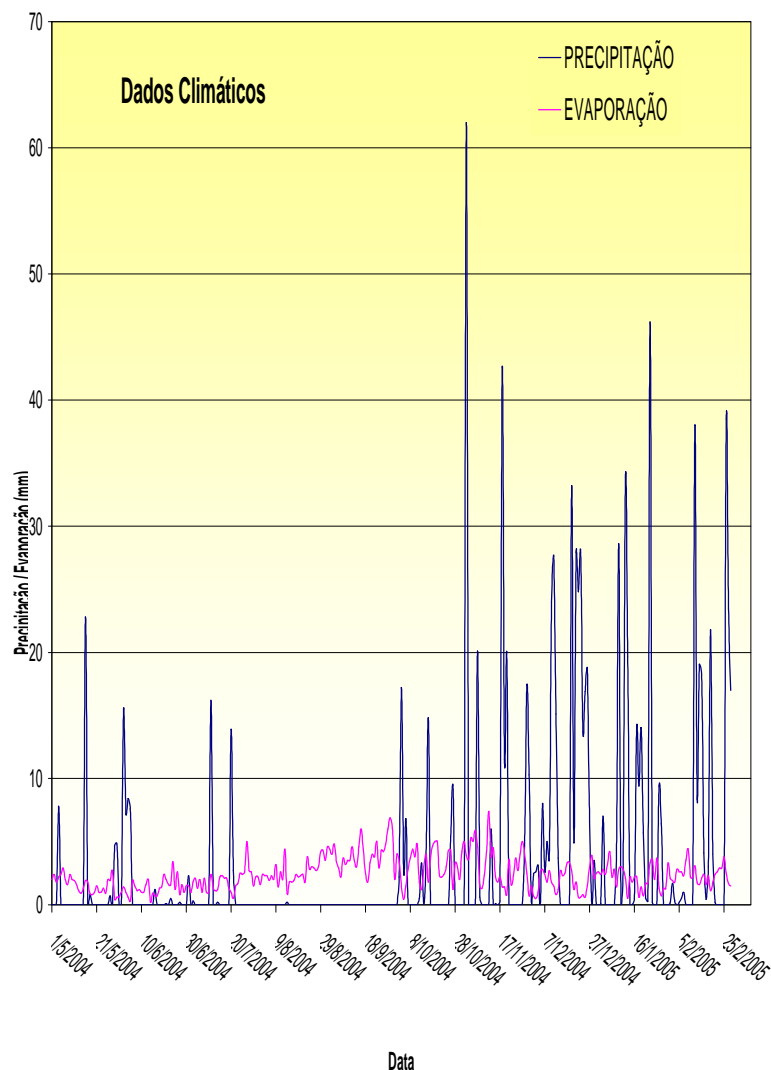


Figura 31 – Dados climáticos da região de Viçosa: precipitação e evaporação (Fonte: 5º Distrito de Meteorologia – Viçosa-MG).

5.2.4. Comparação entre os métodos

Para se comparar os valores da medição da sucção obtida pelos três métodos apresentados aqui, têm-se as Figuras 32 e 33, que trazem os gráficos com os três métodos juntos.

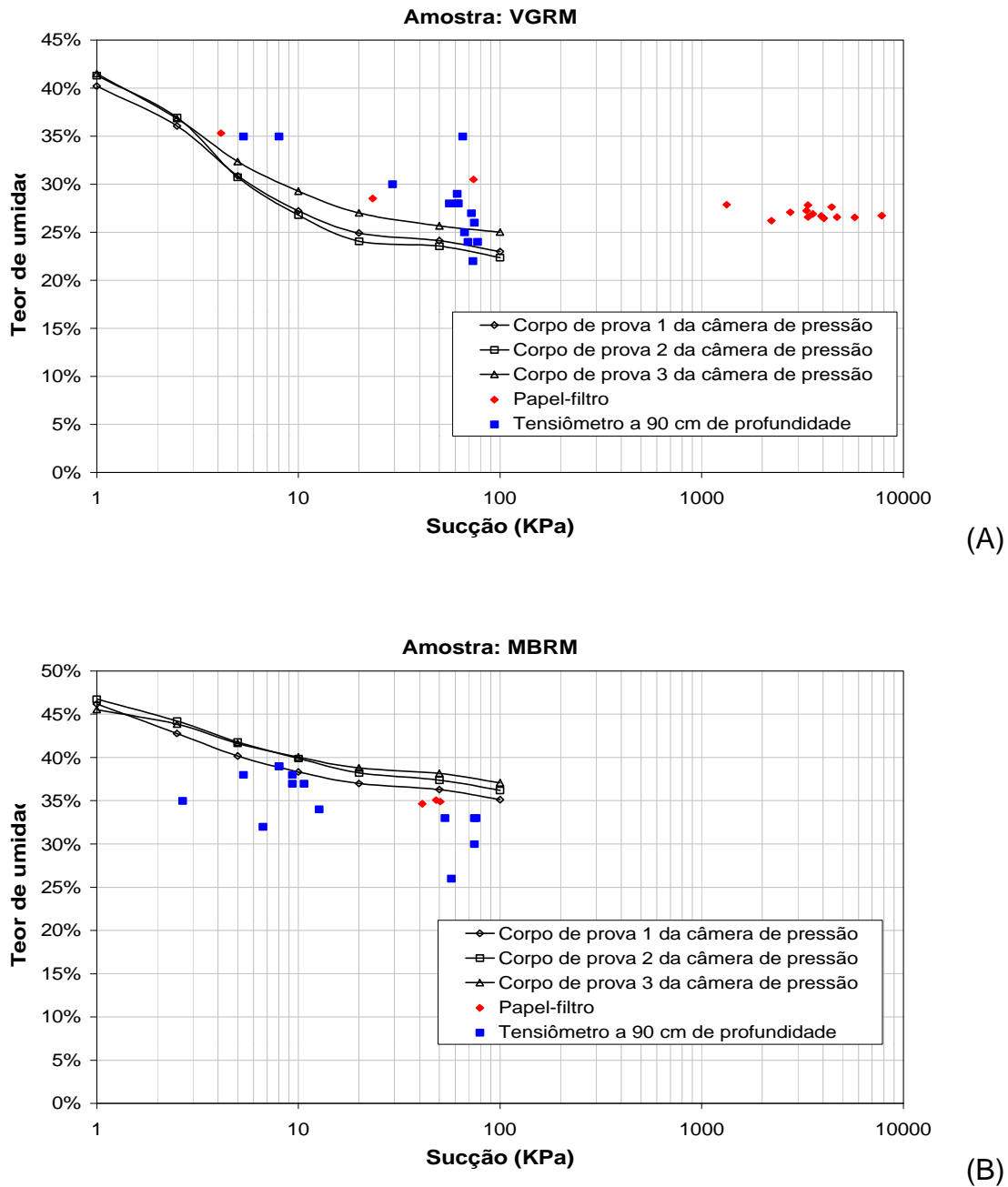


Figura 32 – Comparação entre as sucções medidas pelos tensiômetro, método do papel-filtro e câmera de pressão para as amostras: (A)VGRM; (B) MBRM.

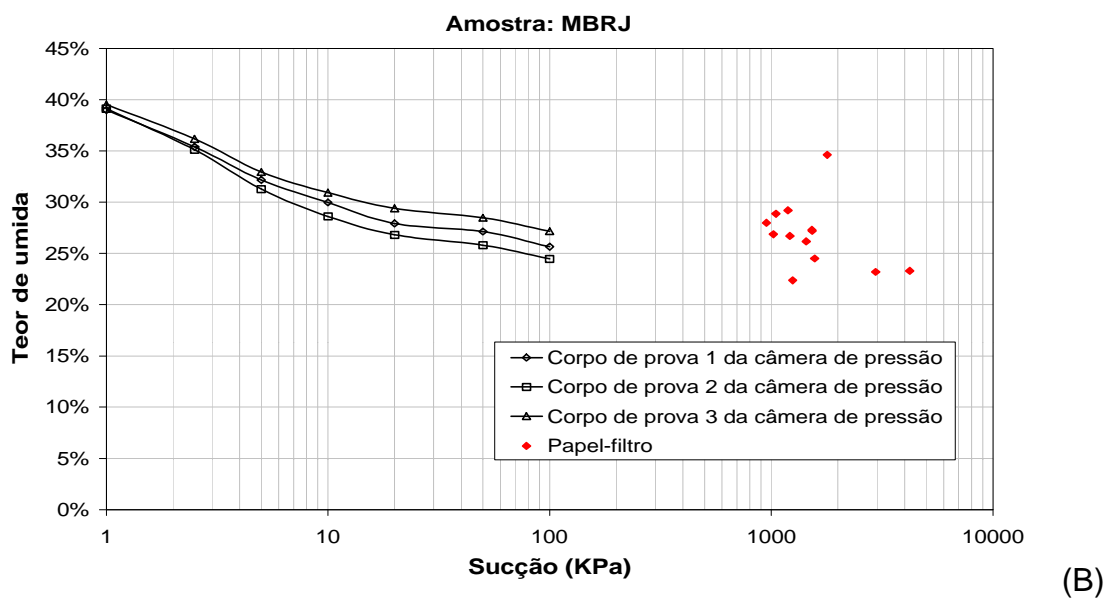
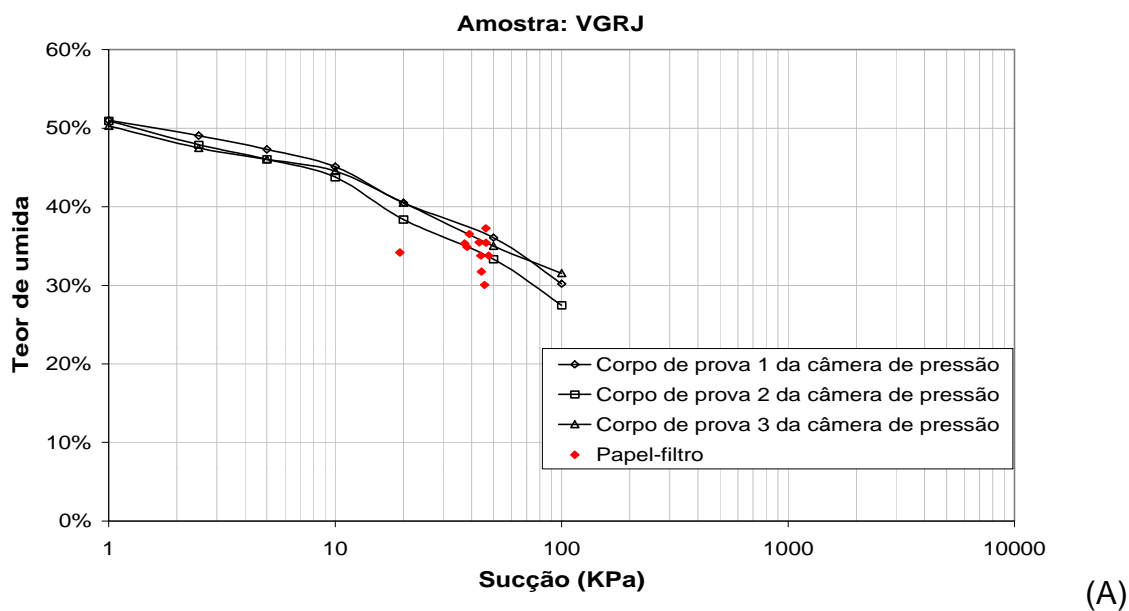


Figura 33 – Comparação entre as sucções medidas pelos método do papel-filtro e câmara de pressão para as amostras: (A) VGRJ; (B) MBRJ.

Os resultados das leituras de sucção, feitas através dos tensiômetros, foram apresentados nos gráficos da Figura 32, em que se têm as sucções medidas nas amostras VGRM e MBRM. Apesar de os tensiômetros terem sido usados para medir a sucção no campo, os locais de retirada dessas amostras foram próximos onde os tensiômetros foram instalados.

5.3. Ensaio de resistência mecânica

5.3.1. Ensaio de cisalhamento direto

Os ensaios realizados com amostras indeformadas, com corpos-de-prova nas condições inundado e umidade natural, visaram fornecer as resistências de pico. Trabalhou-se com corpos-de-prova de base quadrada com 50,95 mm e altura de 19,65 mm.

Nas Figuras 34 até 37 estão apresentados as envoltórias de ruptura das amostras, com os corpos de prova na umidade natural e inundado.

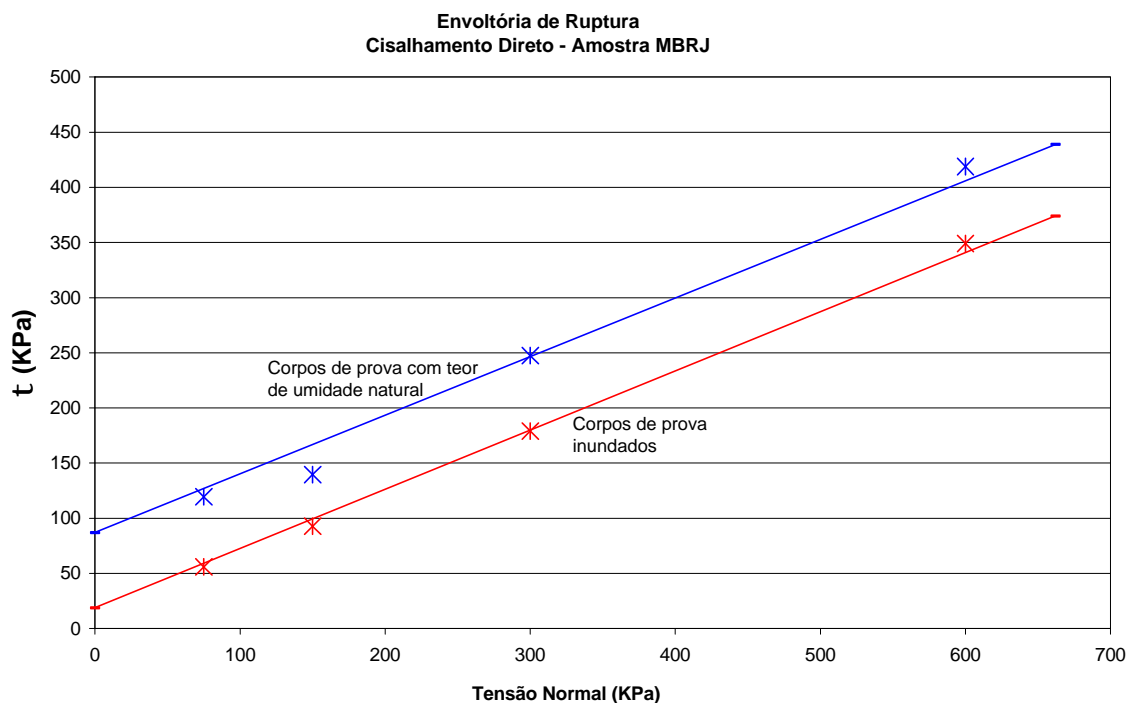


Figura 34 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto com corpos-de-prova na umidade natural e inundado, para a amostra MBRJ.

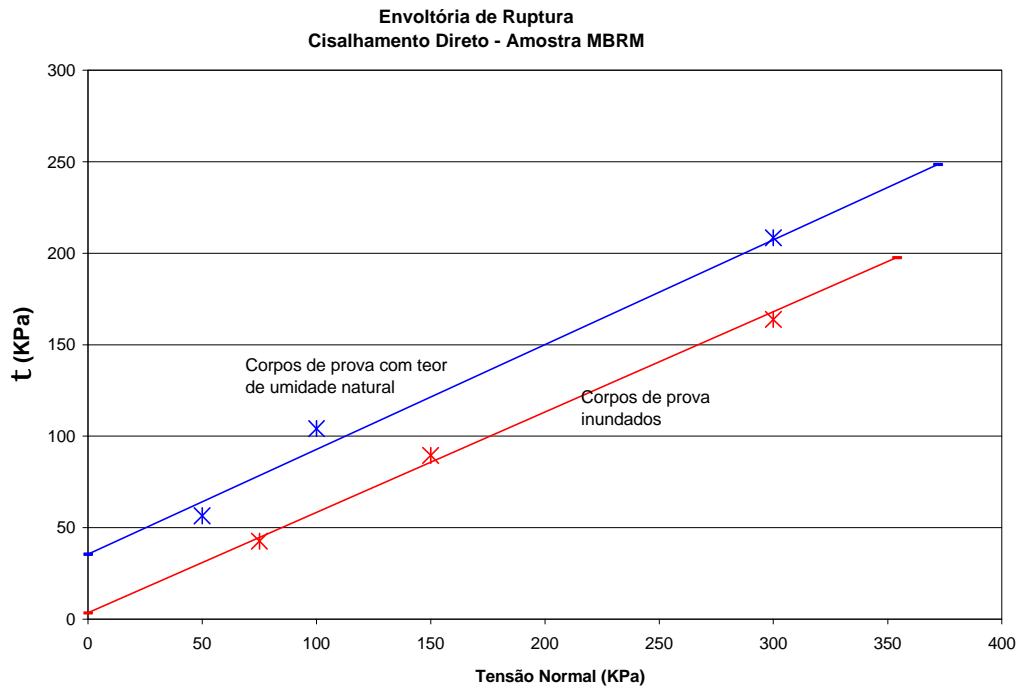


Figura 35 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto com corpos-de-prova na umidade natural e inundado, para a amostra MBRM.

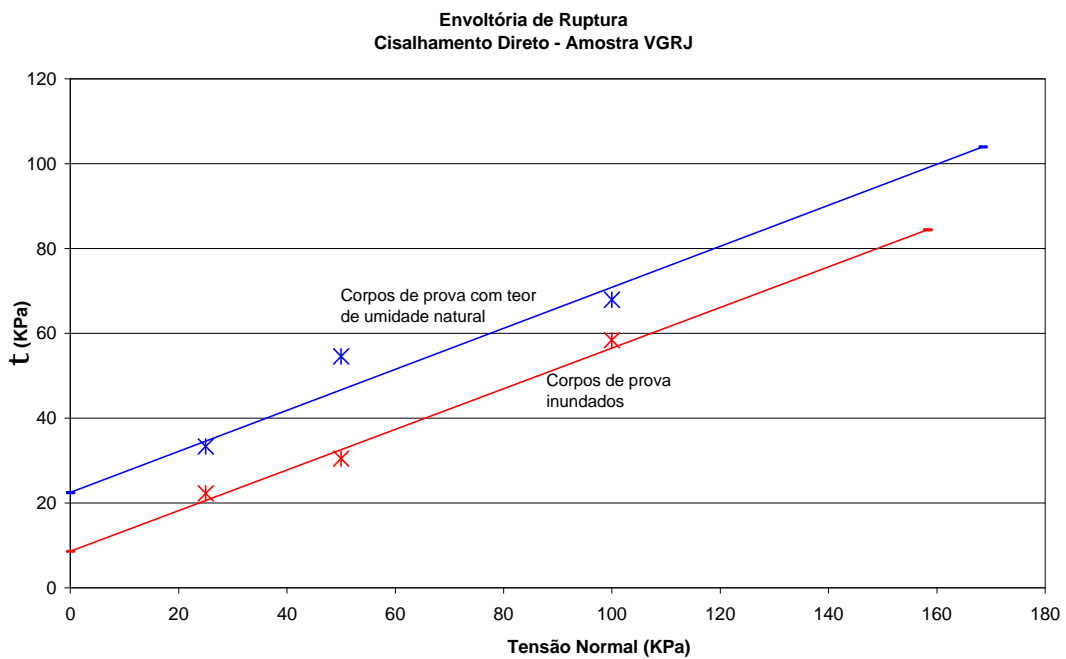


Figura 36 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto com corpos-de-prova na umidade natural e inundado, para a amostra VGRJ.

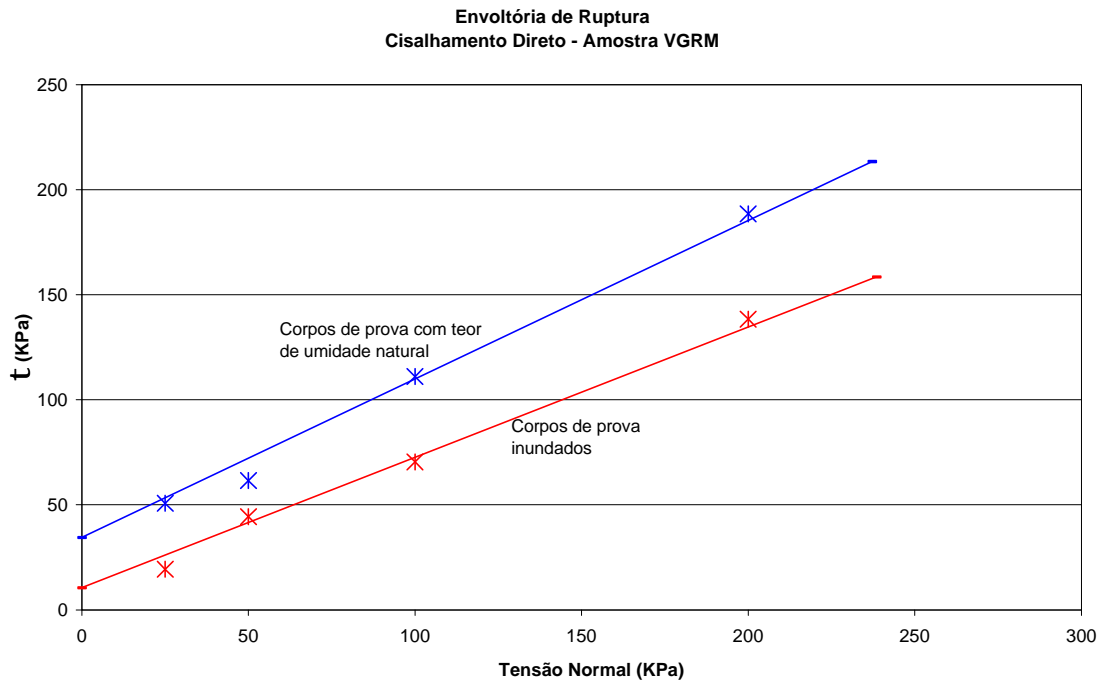


Figura 37 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto com corpos-de-prova na umidade natural e inundado, para a amostra VGRM.

Através dos resultados obtidos para os ensaios de resistência ao cisalhamento direto, pode-se observar que não houve variação significativa para os valores de ângulo de atrito entre os corpos-de-prova em seu estado natural e inundado. Em se tratando da coesão, pode-se observar que, para o solo inundado o resultado, variam na faixa de 5 a 20 KPa.

A amostra VGRM apresentou um resultado não esperado de ângulo de atrito 37° para os ensaios feitos com os corpos-de-prova no estado natural, já que, o valor do ângulo de atrito encontrado para o mesmo solo após a inundação foi de 32° .

5.3.2. Ensaios triaxiais com umidade natural

Nas Figura 38 a 41 são mostrados os gráficos com as envoltórias de ruptura para os ensaios triaxiais CIU-nat. Os gráficos estão apresentados em trajetória de tensões, sendo o valor de p' e q , respectivamente, a tensão normal e cisalhante no plano de máxima tensão cisalhante, ou seja, q é igual a semidiferença das tensões principais e p' é igual à média das tensões principais, sendo estas em termos de tensão efetiva.

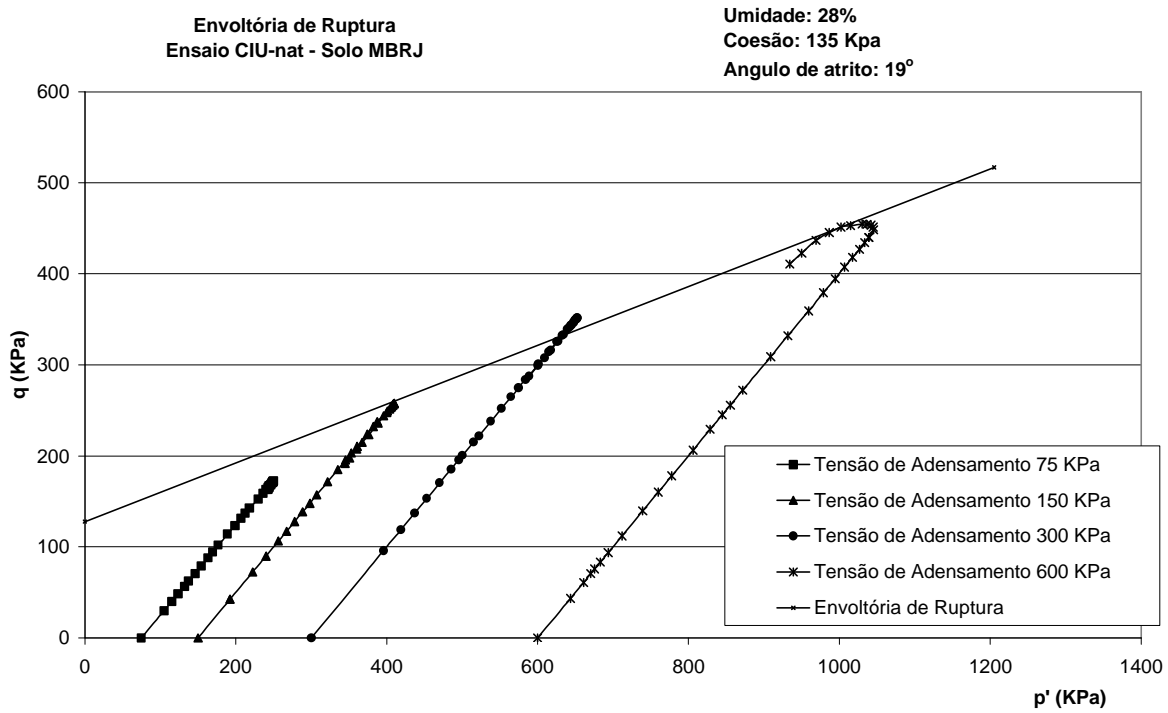


Figura 38 – Envoltória de ruptura para o gráfico de trajetória de tensões da amostra MBRJ.

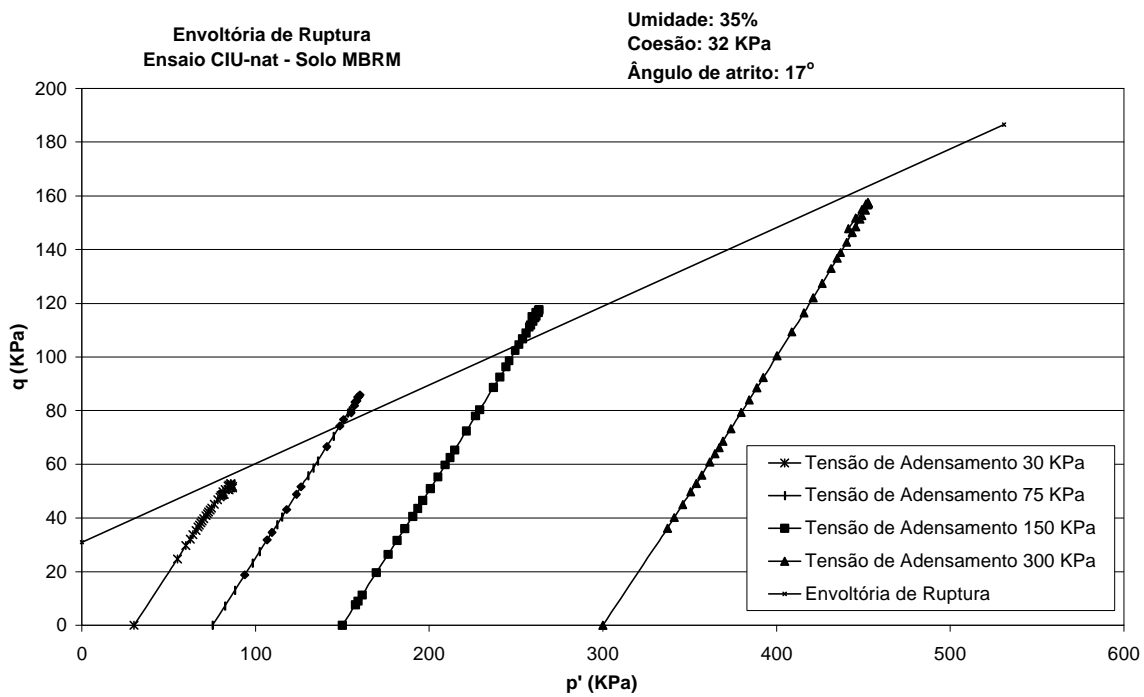


Figura 39 – Envoltória de ruptura para o gráfico de trajetória de tensões da amostra MBRM.

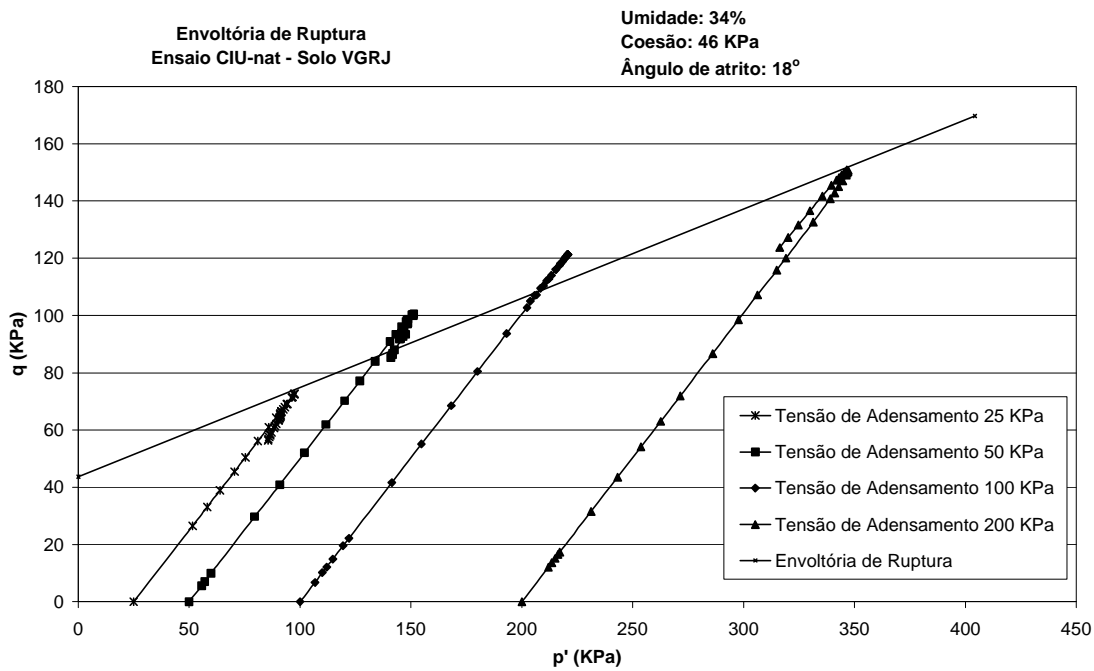


Figura 40 – Envoltória de ruptura para o gráfico de trajetória de tensões da amostra VGRJ.

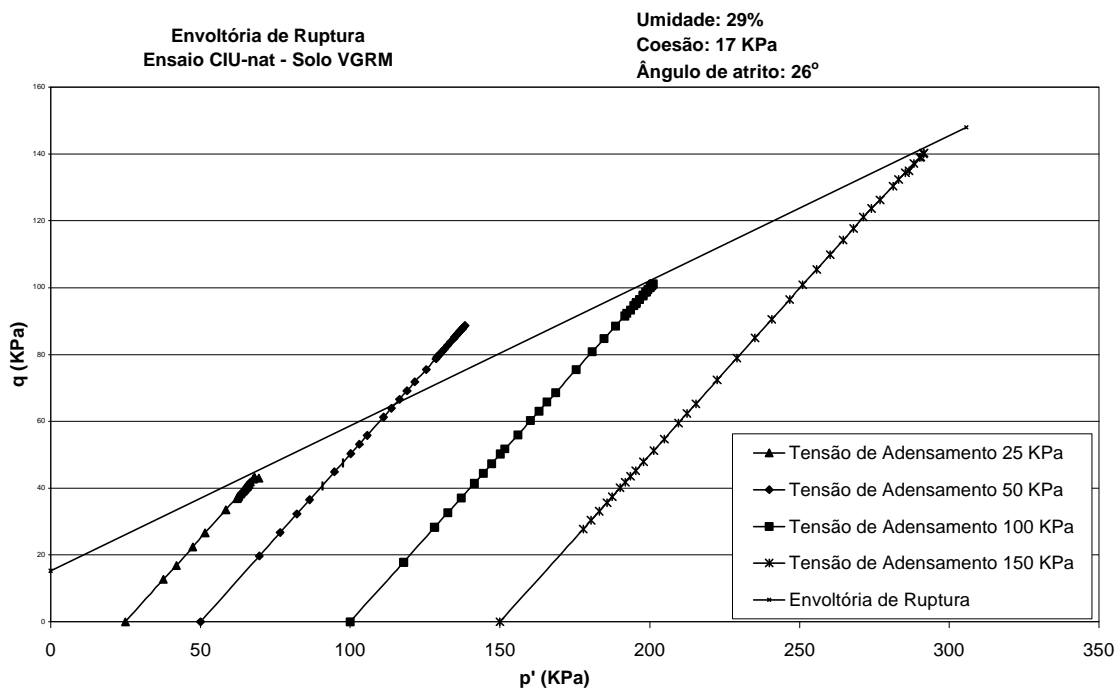


Figura 41 – Envoltória de ruptura para o gráfico de trajetória de tensões da amostra VGRM.

5.3.3. Comparação entre os métodos

Os valores encontrados para os ângulos de atrito e coesão de cada solo estão apresentados na Tabela 16. Os resultados para os ângulos de atrito nos ensaios triaxiais foram menores que aqueles dos ensaios de cisalhamento direto em concordância com PITANGA (2002); além disso, obteve-se para a amostra VGRM um valor de 37° com corpo-de-prova natural – um valor fora dos padrões da mecânica dos solos, mas, já encontrados anteriormente, em estudos na região como, PITANGA (2002) e LUIS (2004).

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento

Solo	Ensaio	Umidade (%)	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (graus)
VGRM	Cis. Direto – natural	28	35	37
	Cis. Direto – inundado	42	11	32
	Triaxial CIU-nat	29	17	26
VGRJ	Cis. Direto – natural	35	23	26
	Cis. Direto – inundado	46	9	26
	Triaxial CIU-nat	34	46	18
MBRM	Cis. Direto – natural	36	36	30
	Cis. Direto – inundado	47	3	29
	Triaxial CIU-nat	35	32	17
MBRJ	Cis. Direto – natural	28	87	28
	Cis. Direto – inundado	38	19	28
	Triaxial CIU-nat	28	135	19

5.4. Comparação entre coesão e sucção

Conforme relatado no item 2.3.4, da revisão de literatura, existem algumas propostas no sentido de se estimar a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados com base na curva característica de sucção de solo. O procedimento proposto por ÖBERG e SÄLLFORS (1995) estima o valor da resistência ao cisalhamento pela Equação 7:

$$t = c' + (s - u_a) \cdot \operatorname{tg} f + (u_a - u_w) \cdot Sr \cdot \operatorname{tg} f$$

em que:

t = tensão de resistência ao cisalhamento do solo;

c' = valor da coesão do solo;

Sr = valor do grau de saturação do solo;

s = valor da tensão normal total;

u_w = valor da poro-pressão de água no solo;

u_a = valor da poro-pressão de ar no solo;

f = valor do ângulo de atrito interno do solo; e

$(u_a - u_w)$ = valor da sucção matricial do solo.

Desmembrando a Equação 7, considerando-se o ângulo de atrito interno do solo constante com a sucção, pode-se escrever uma função da coesão aparente do solo com a sucção matricial, conforme apresentado pela Equação 8:

$$c = c' + (u_a - u_w) \cdot Sr \cdot \operatorname{tg} f$$

em que o valor de Sr é tirado da Equação 6.

Nas Figura 42 a Figura 45 são apresentadas as previsões de valores de coesão aparente em função da sucção, utilizando as Equações 6 e 8. Os valores usados para c' e f foram os obtidos nos ensaios de cisalhamento direto na condição inundado, que está apresentado no item 5.3.3.

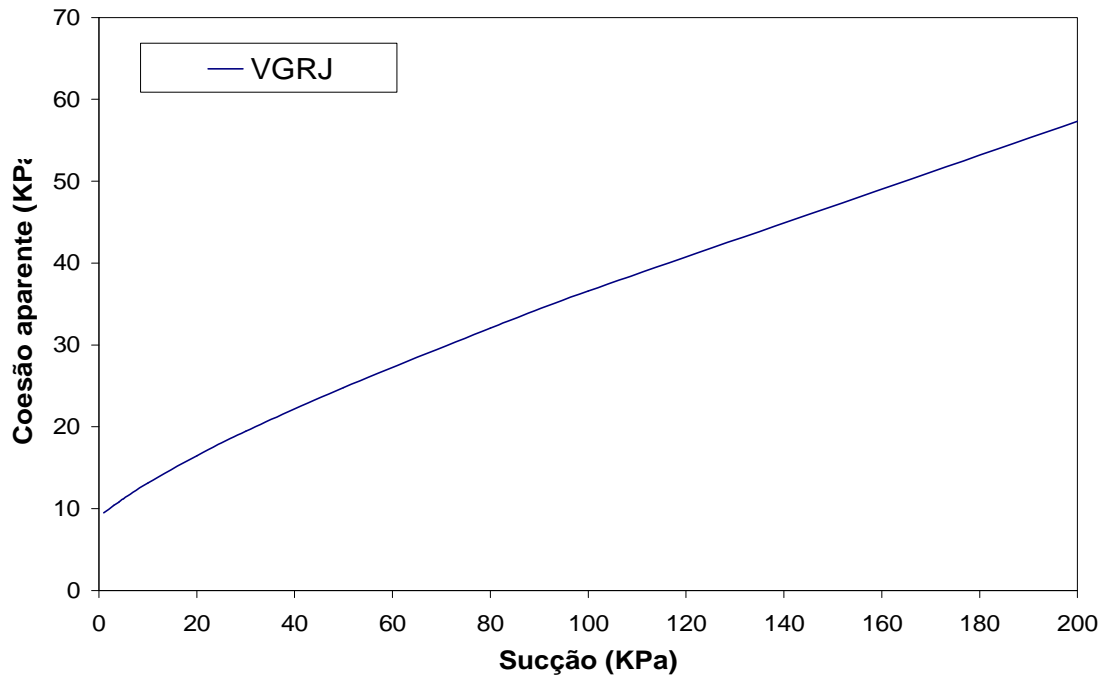


Figura 42 – Gráfico de coesão aparente *versus* sucção matricial da amostra VGRJ.

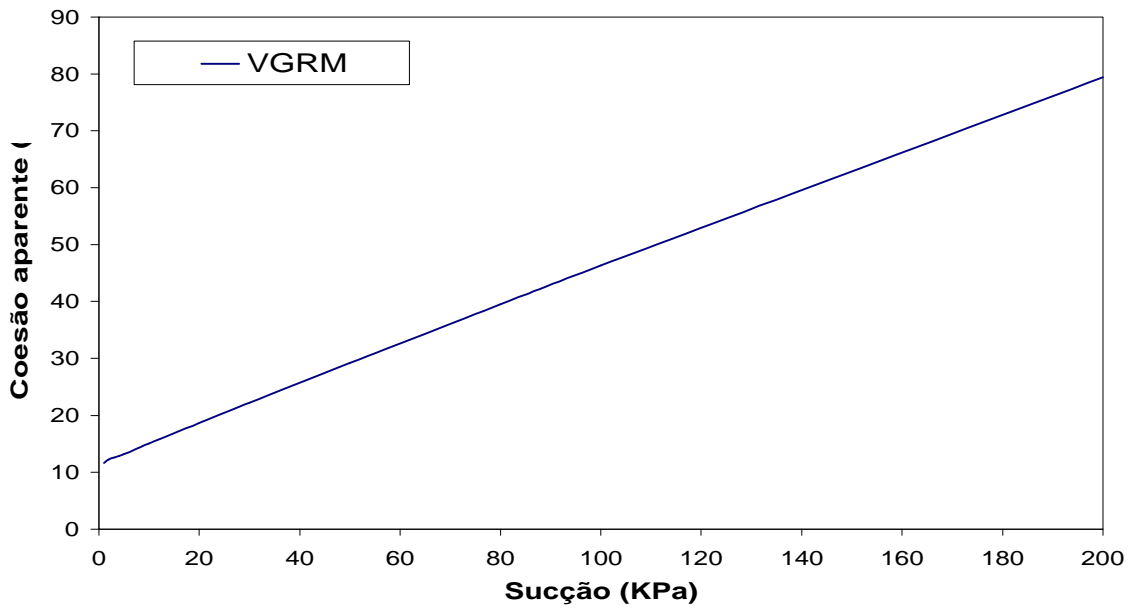


Figura 43 – Gráfico de coesão *versus* sucção matricial da amostra VGRM.

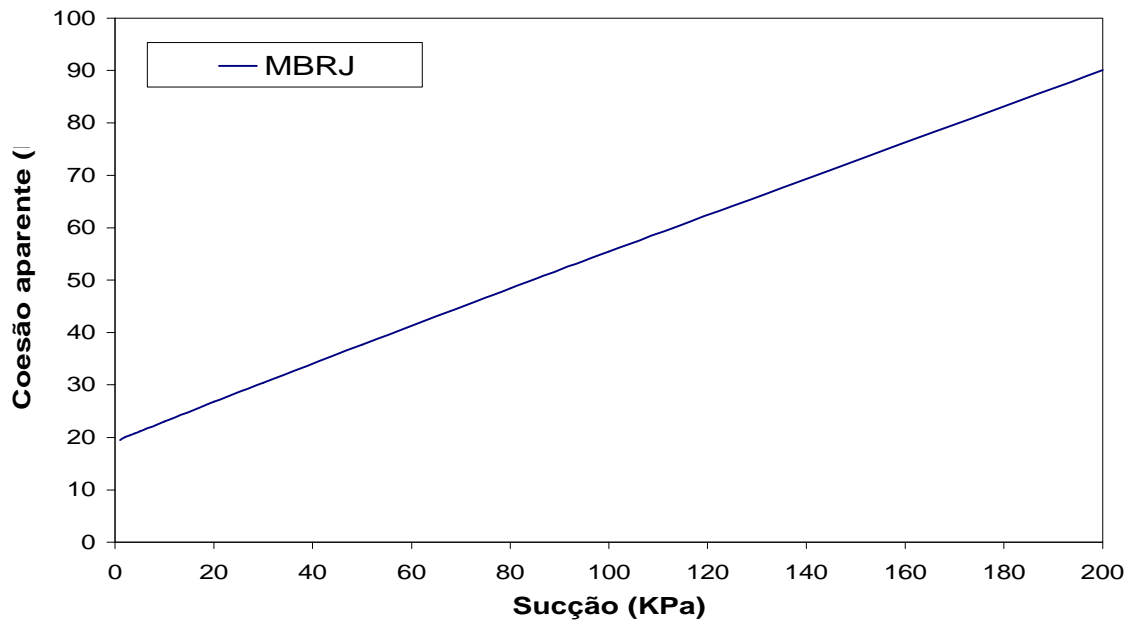


Figura 44 – Gráfico de coesão *versus* sucção matricial da amostra MBRJ.

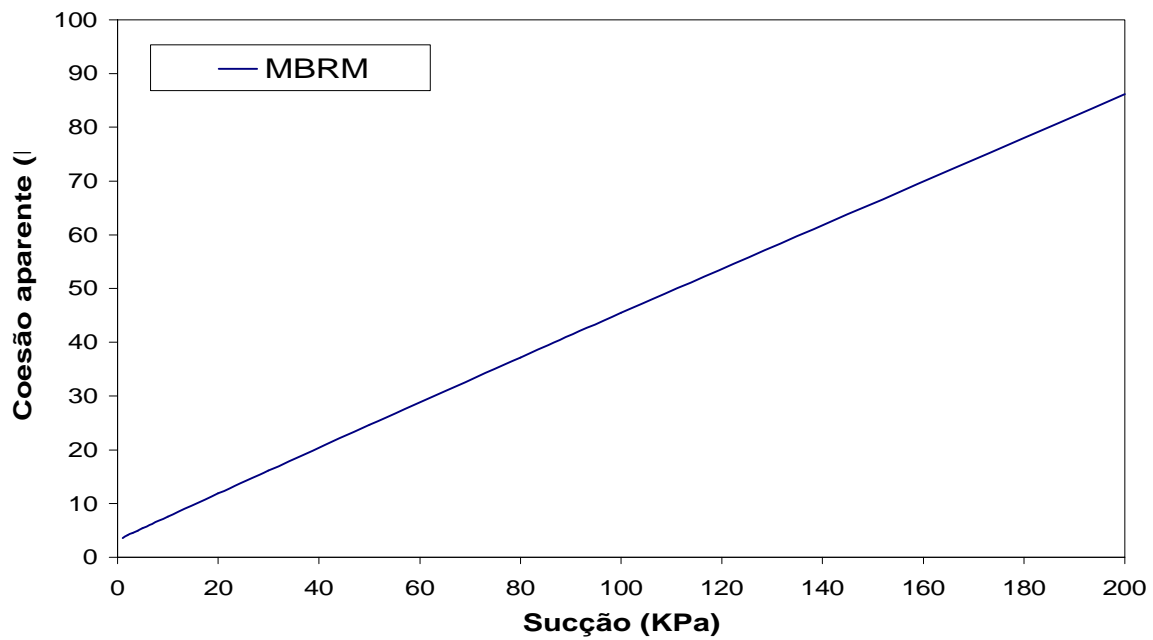


Figura 45 – Gráfico de coesão *versus* sucção matricial da amostra MBRM.

Vale ressaltar que os resultados, estimados, obtidos com a utilização do procedimento proposto por ÖBERG e SALLFORDS (1995) não puderam ser avaliados devido à não-realização de ensaios de resistência mecânica com controle de sucção. Entretanto, pode-se dizer que os resultados obtidos por outros autores têm boa aceitação, como pode ser visto nos resultados encontrados por MACHADO (1998), sendo o procedimento, inclusive, muito utilizado, por poder ser usado de maneira mais simplificada.

5.5. Plantas plani-altimétricas

As plantas plani-altimétricas dos taludes em estudo foram feitas com a utilização dos equipamentos de topografia do Departamento de Engenharia Civil e estão apresentadas nas Figura 46 e Figura 47.

A partir das plantas plani-altimétricas, foram obtidos os perfis dos dois taludes, para as análises de estabilidade.

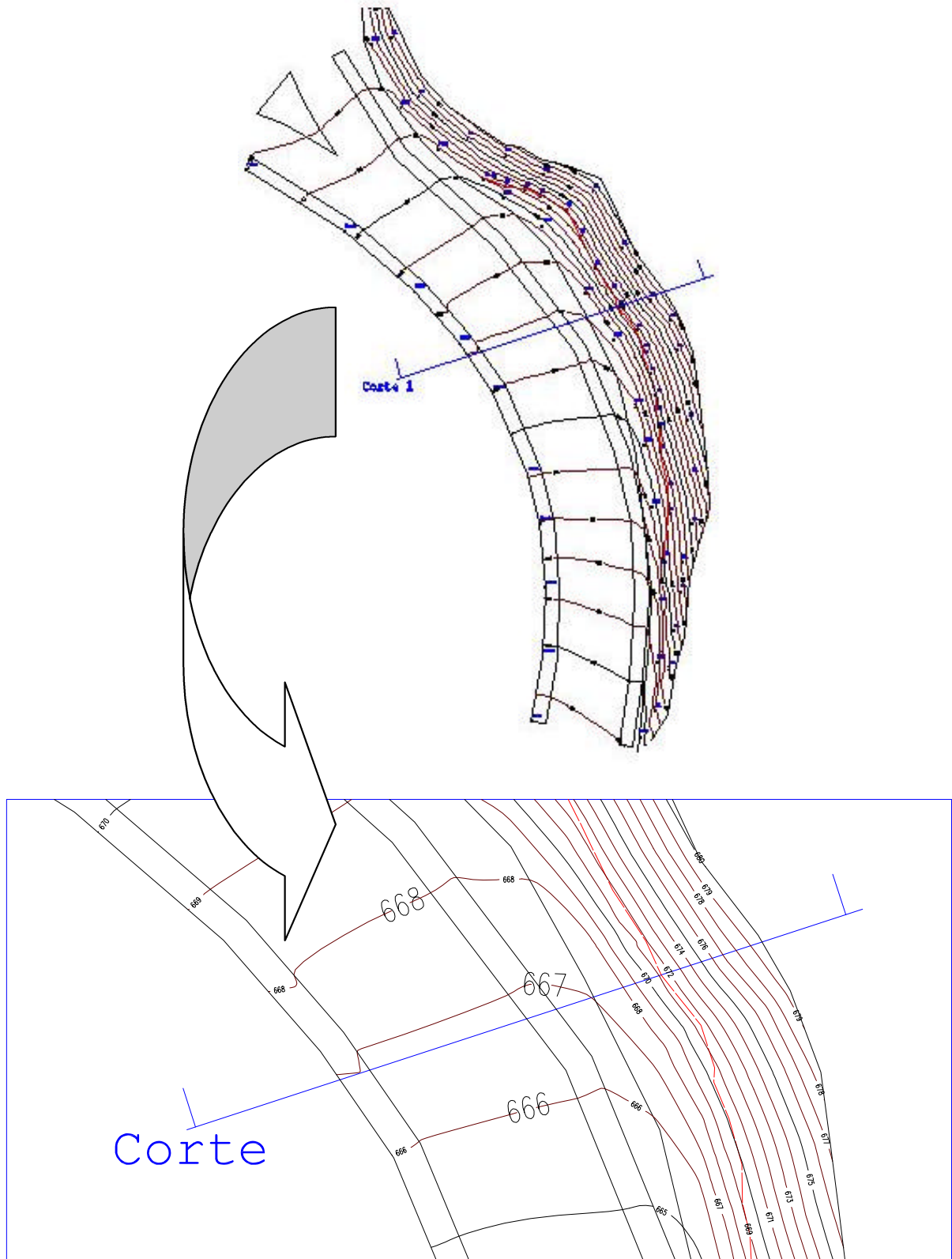


Figura 46 – Geometria do talude VG.

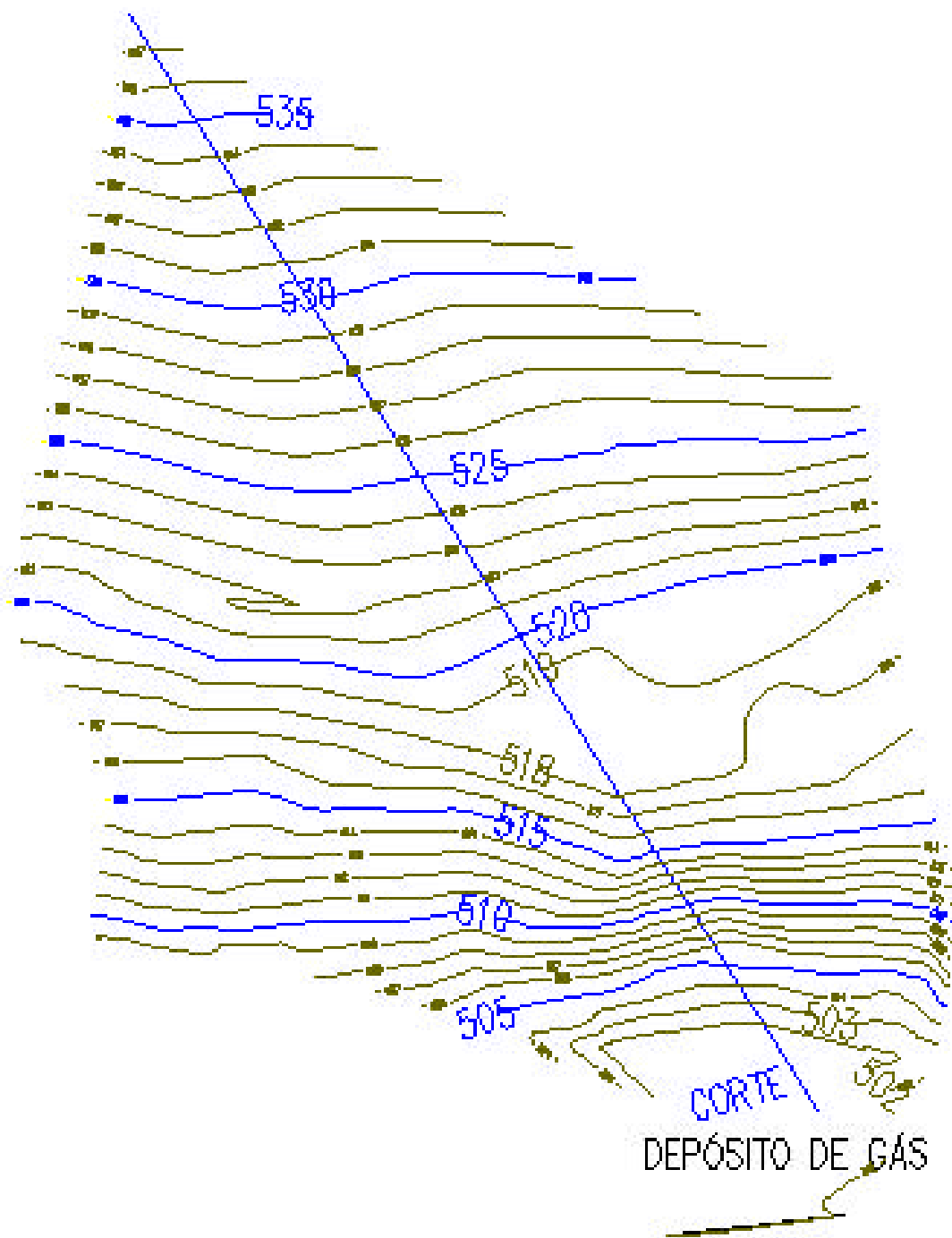


Figura 47 – Geometria do talude MB.

5.6. Análise da estabilidade dos taludes

Na realização das análises de estabilidade para os dois taludes utilizaram-se as plantas plani-altimétricas de cada talude e os dados de cada solo: peso específico, coesão e ângulo de atrito. A partir das plantas plani-altimétricas obteve-se a geometria de cada talude.

Nas Figuras 48 até 53, são apresentados os resultados obtidos no programa Geo-Slope (*GEO-SLOPE International, Ltd – Versão 4.21*), através do método de equilíbrio limite GLE, para as três diferentes condições de ensaios de resistência ao cisalhamento feitos: triaxiais CIU-nat, cisalhamento direto com o solo no teor de umidade natural e cisalhamento direto com o solo inundado.

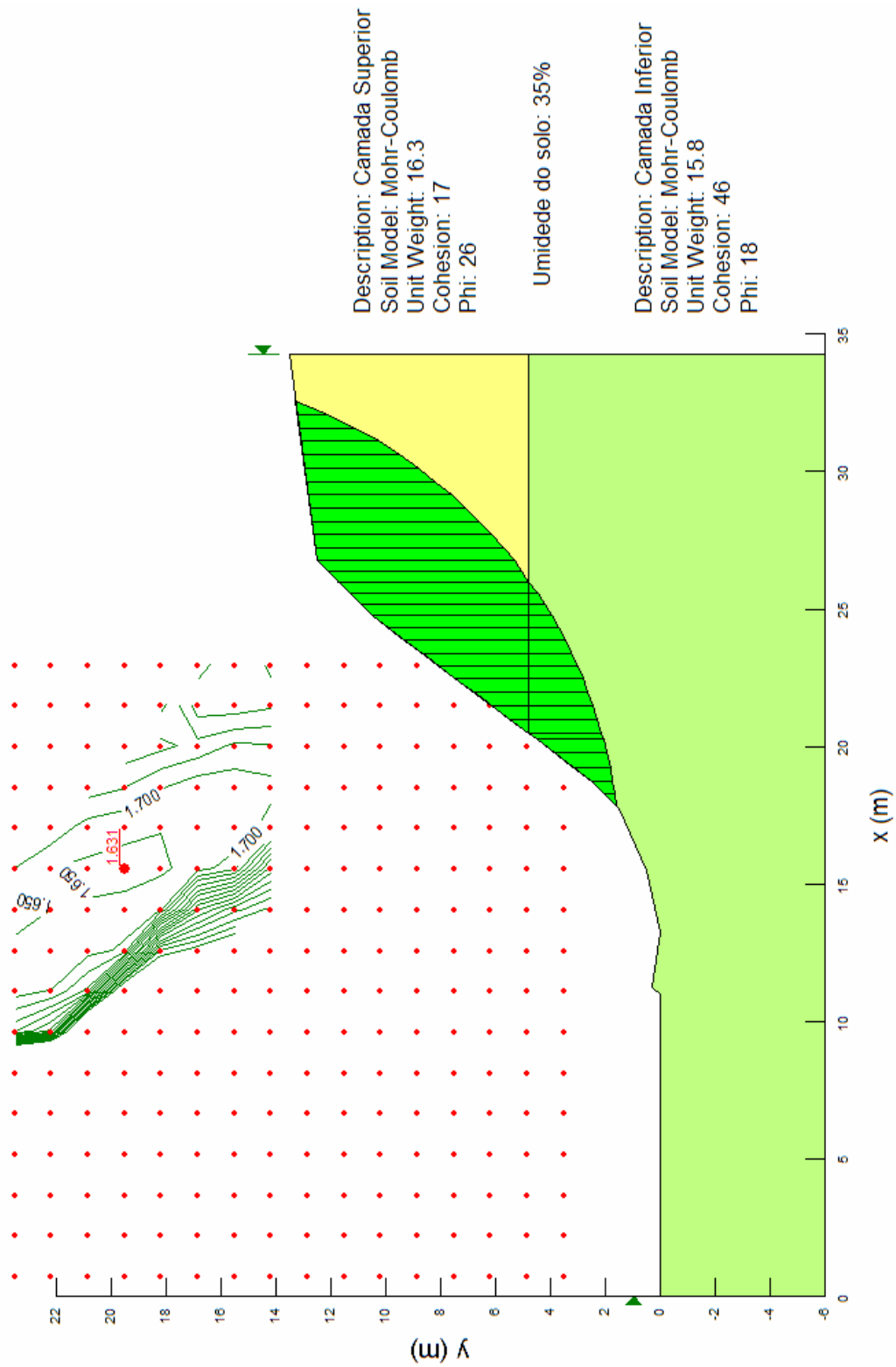


Figura 48 – Análise da estabilidade do talude VG para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios triaxiais CIU-nat.

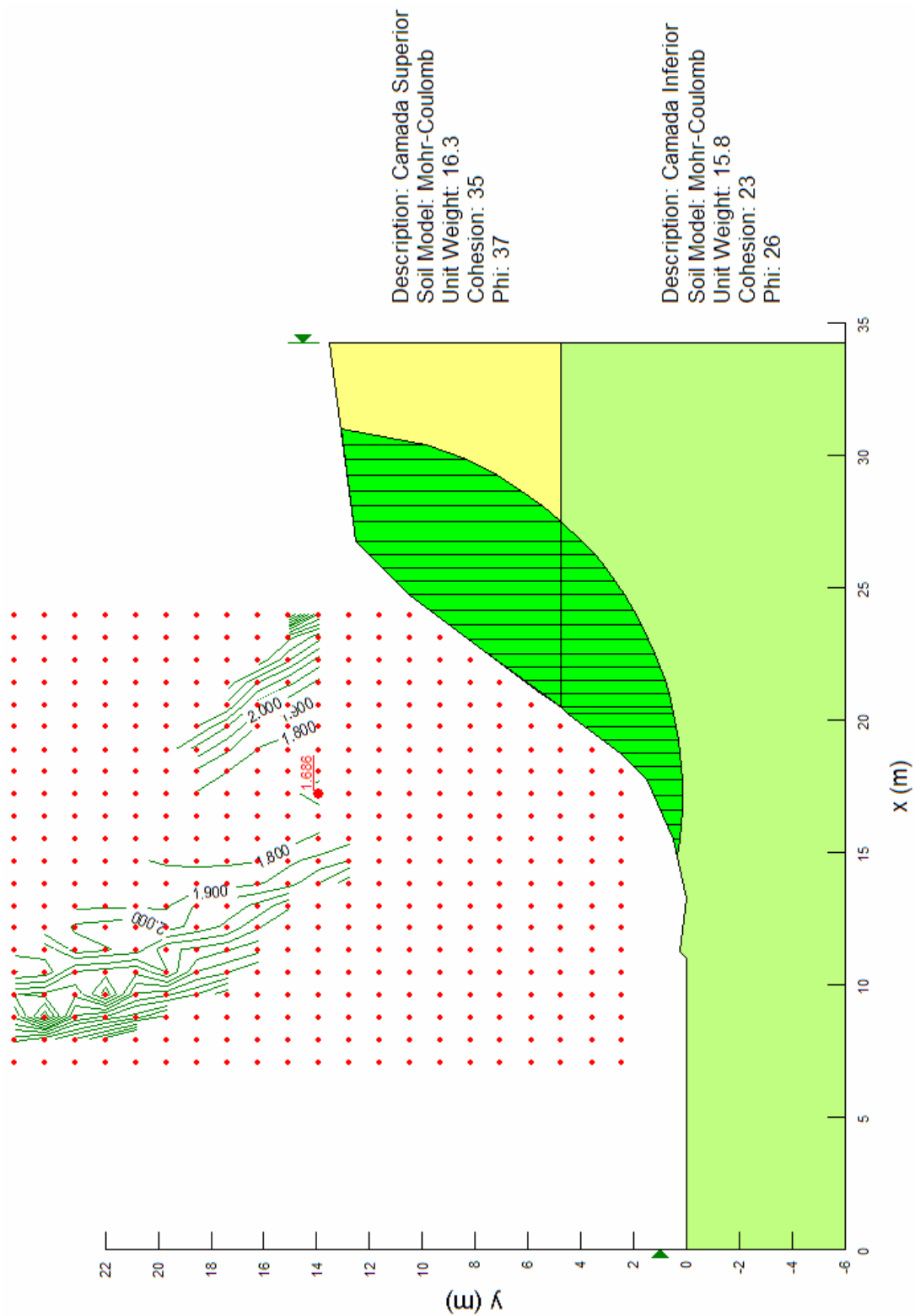


Figura 49 – Análise da estabilidade do talude VG para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios de cisalhamento direto com o solo na umidade natural.

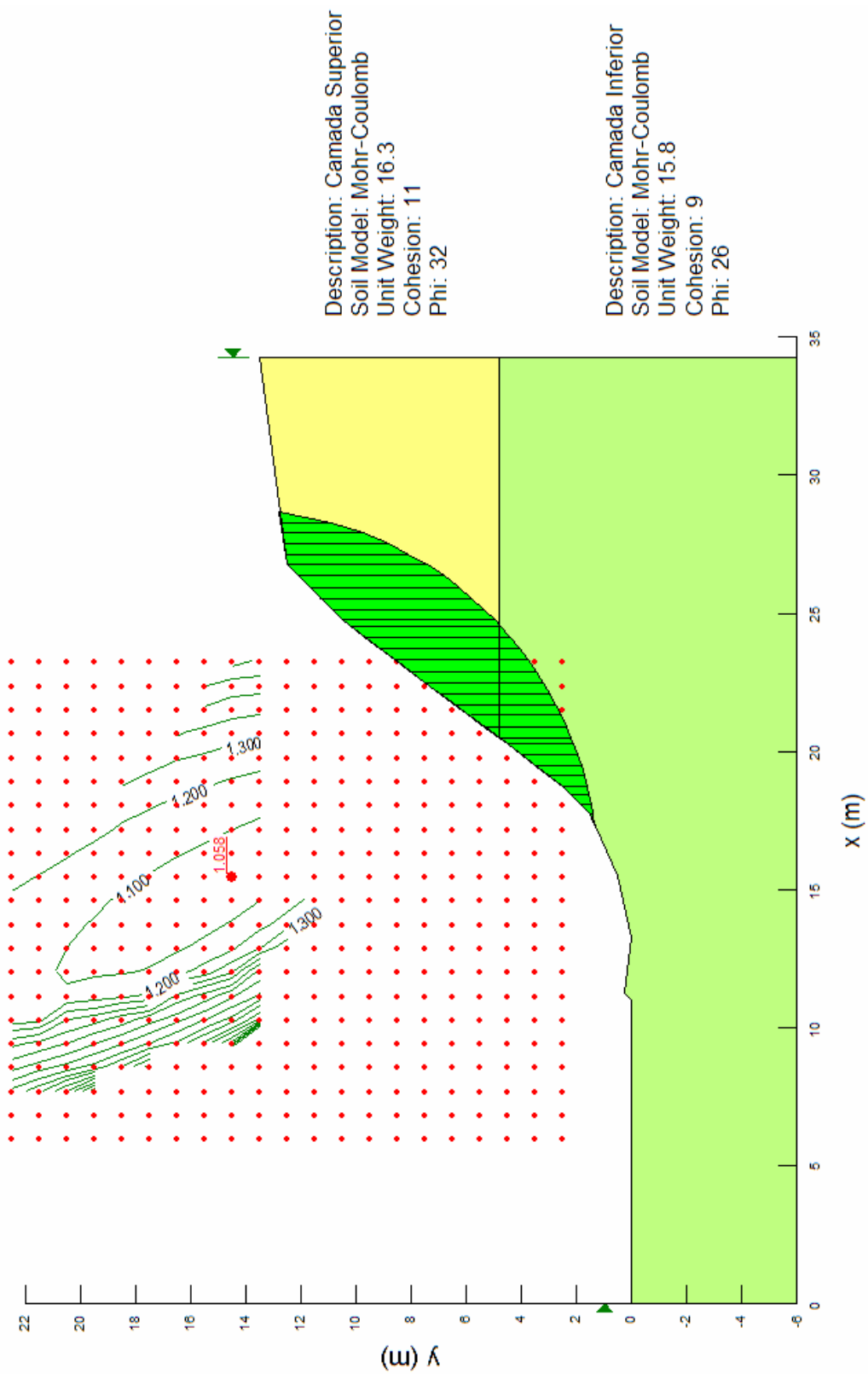


Figura 50 – Análise da estabilidade do talude VG para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios de cisalhamento direto com o solo inundado.

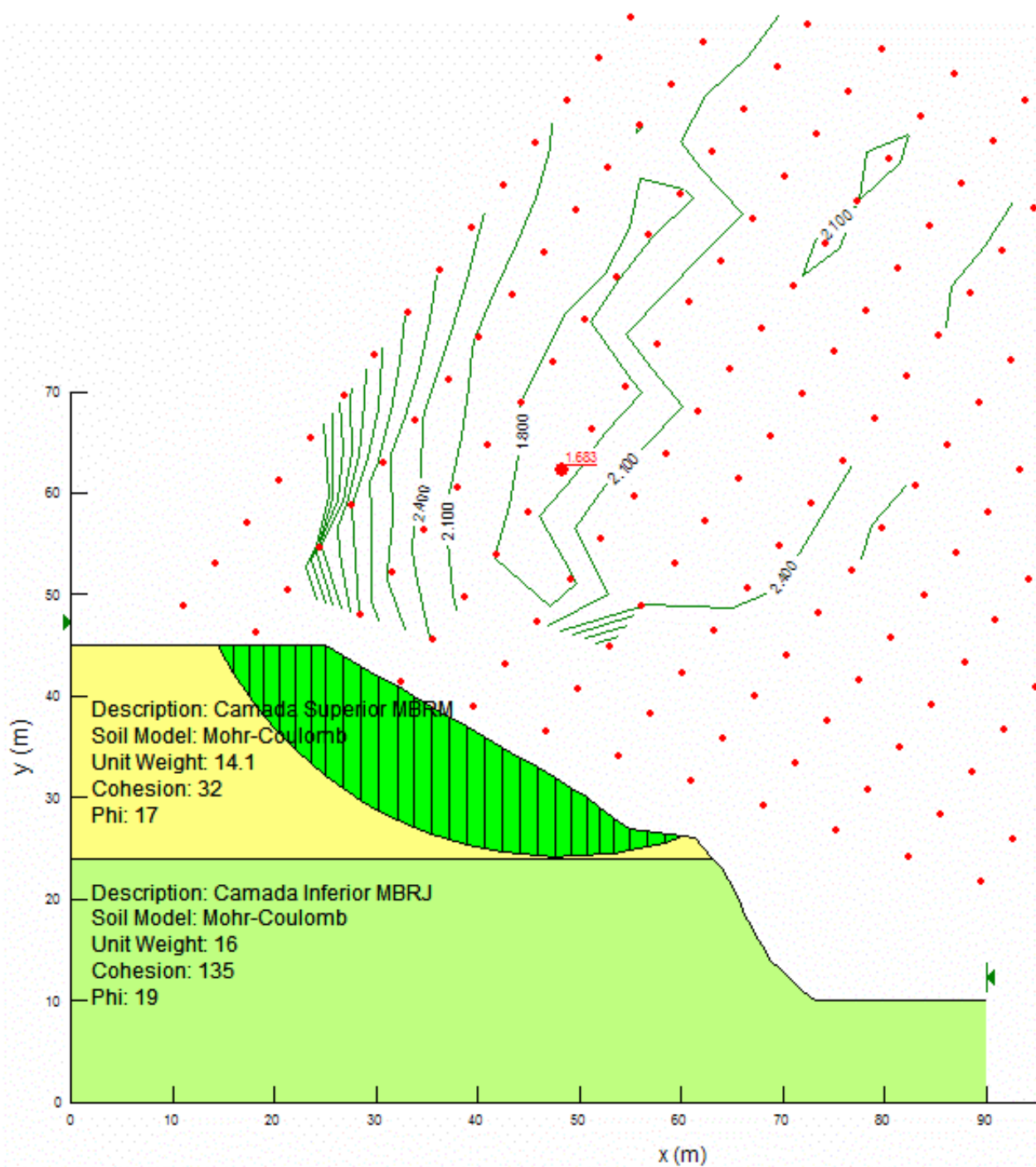


Figura 51 – Análise da estabilidade do talude MB para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios triaxiais CIU-nat.

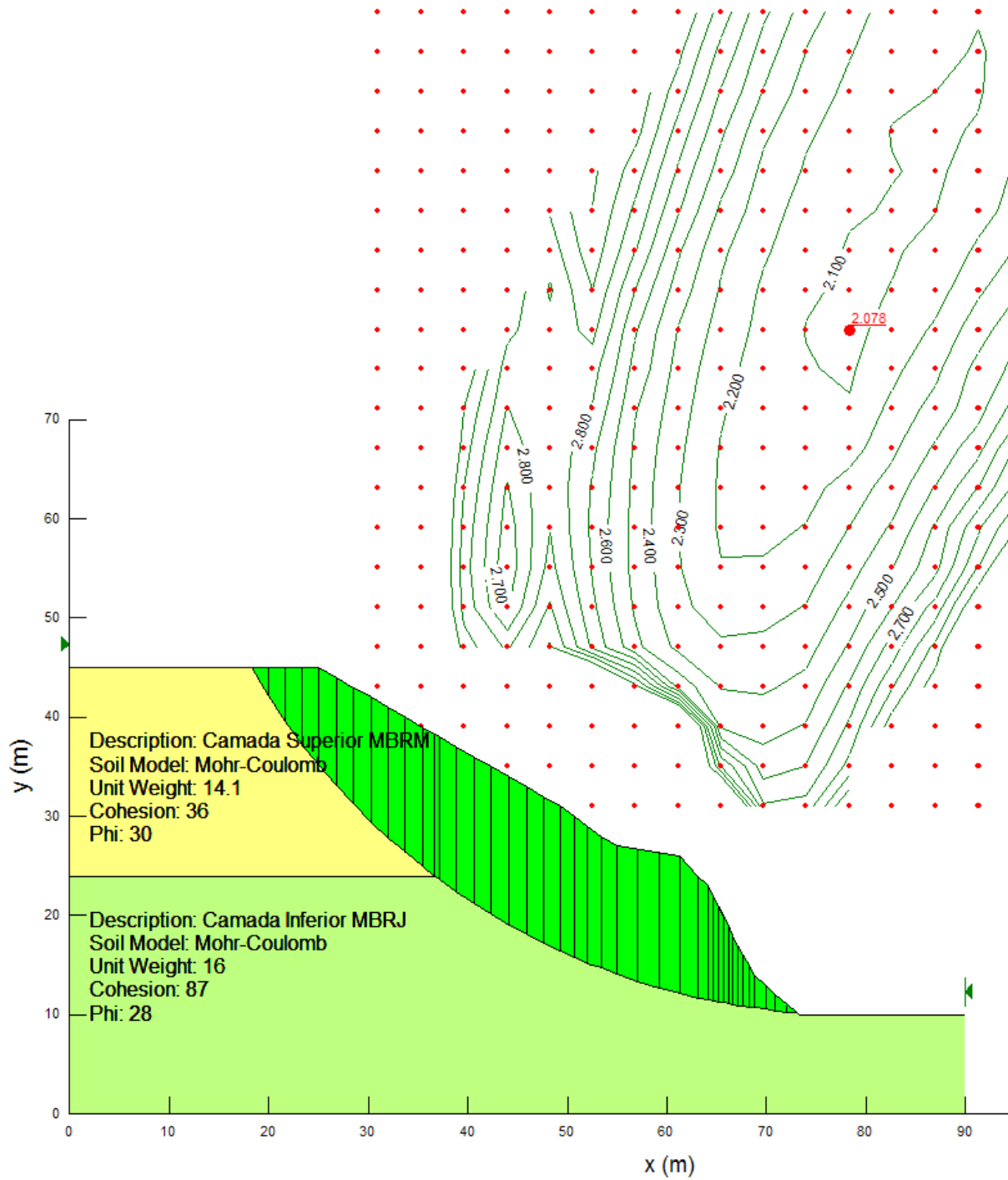


Figura 52 – Análise da estabilidade do talude MB para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios de cisalhamento direto com o solo na umidade natural.

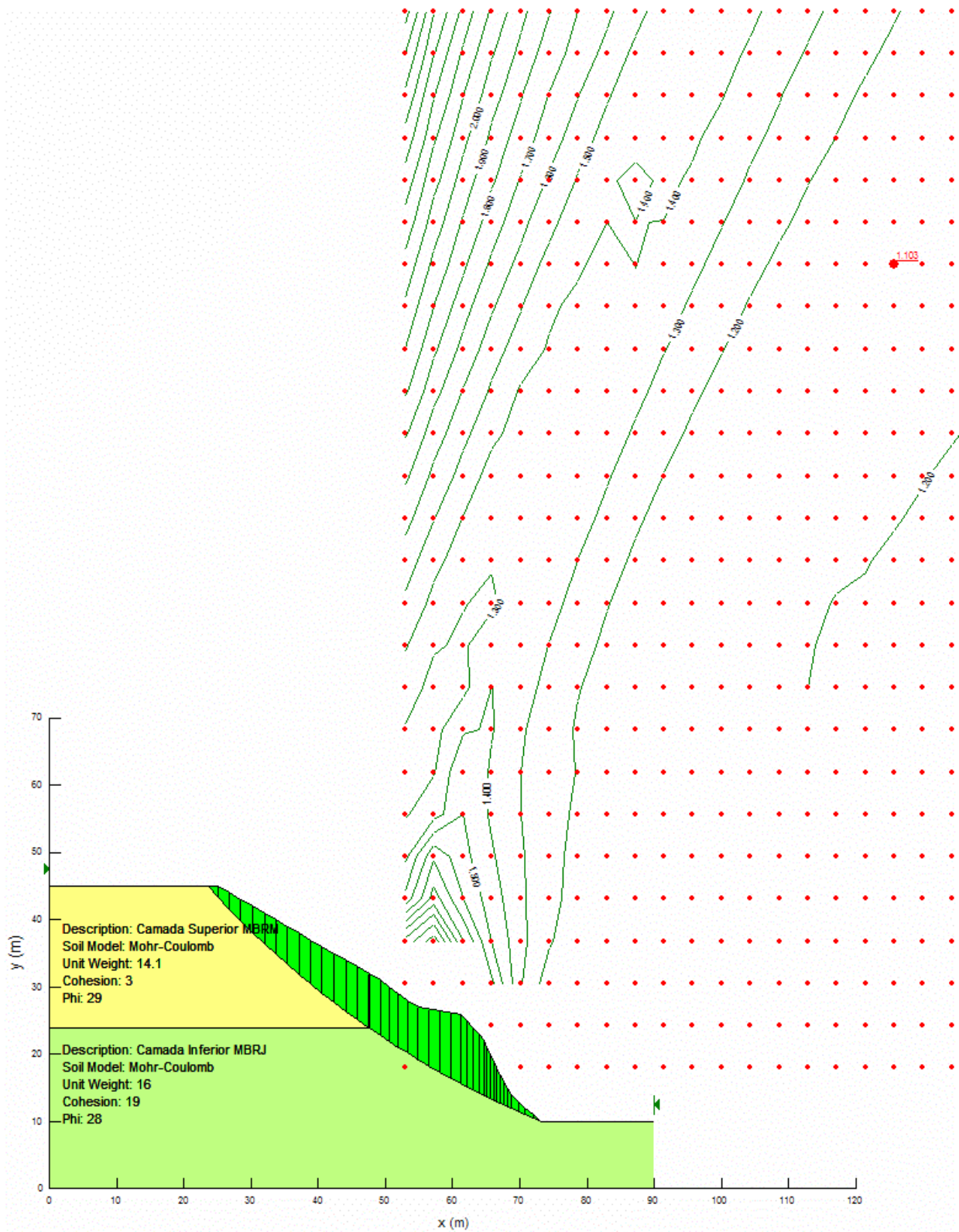


Figura 53 – Análise da estabilidade do talude MB para os parâmetros de resistência do solo obtidos nos ensaios de cisalhamento direto com o solo inundado.

Para o talude VG, a redução do fator de segurança foi de 1,7 (solo no teor de umidade natural) para 1,1 (solo inundado).

Pelos resultados das estabilidades obtidos no talude MB, pode ser observado que, na análise feita com os parâmetros de resistência tirados do ensaio triaxial CIU-nat da amostra MBRJ, há uma coesão muito alta fazendo, a superfície crítica de deslizamento se posicionar na parte superior, onde se encontra o solo residual maduro. Para o solo na condição inundado, em que ocorre a queda na resistência ao cisalhamento do solo residual jovem, há uma mudança do posicionamento da superfície de deslizamento crítica para a parte inferior, onde a superfície do talude é mais inclinada, com fator de segurança de 1,1.

O resumo dos resultados das análises pelos métodos de equilíbrio limite GLE, Bishop e Felenius é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados das análises de estabilidade

TALUDE	ENSAIOS	MÍNIMO FATOR DE SEGURANÇA		
		GLE	Bishop	Felenius
VG	Triaxial CIU-nat	1,631	1,662	1,584
	Cis. Direto – natural	1,686	1,699	1,678
	Cis. Direto – inundado	1,058	1,067	1,018
MB	Triaxial CIU-nat	1,683	1,686	1,609
	Cis. Direto – natural	2,078	2,088	2,028
	Cis. Direto – inundado	1,103	1,108	1,083

Observa-se que, para o talude VG, o mínimo fator de segurança para os ensaios triaxiais e cisalhamento direto com o solo na umidade natural apresentou valores próximos, ao passo que, nos ensaios de cisalhamento direto com o solo inundado, observou-se uma grande diminuição do fator de segurança. Nota-se que os dois taludes se apresentaram estáveis quando o solo estava em seu estado natural, enquanto no solo inundado, a pior condição, o fator de segurança chegou próximo de 1.

O fator de segurança encontrado no talude MB, pelo método de equilíbrio limite GLE, para os parâmetros de resistência mecânica devido aos ensaios: triaxiais CIU-nat foi de 1,683; cisalhamento direto no teor de umidade natural foi de 2,078; cisalhamento direto inundado foi de 1,103.

Pelos resultados obtidos através dos três métodos de análise de estabilidade, GLE, Bishop e Felenius, observa-se que se têm valores próximos tendo sido, os métodos de Bishop menos conservador e Felenius mais conservador.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho abrangeu ensaios de caracterização, obtenção de curvas características para solos não-saturados, medição de valores de sucção em campo e em laboratório, ensaios de resistência mecânica e análises de estabilidade. Os resultados do presente trabalho permitem concluir que:

- i. as amostras de solos estudadas abrangem argilas e siltes de alta compressibilidade (CH e MH). Segundo a classificação HRB, as amostras foram classificadas como A-7-5 e A-7-6. A massa específica natural varia na faixa de 15,8 a 16,3 KN/m³; o índice de vazios, de 1,11 a 1,67; e o IP, de 26 a 38%;
- ii. o tensiômetro se mostrou um equipamento simples e de fácil manejo para o monitoramento da sucção matricial no campo, permitindo observar a variação da sucção com a ocorrência das precipitações e ao longo da profundidade. Nota-se, porém, que a sucção máxima medida se limita a 90 KPa;
- iii. com relação à frente de saturação, a partir dos resultados obtidos pelos tensiômetros, não se pode dizer a que profundidade ela pode chegar. Contudo, pode-se concluir que, para a profundidade de 90 cm, a variação da umidade já não é mais influenciada por uma chuva rápida e sim por um período mais longo de chuva;
- iv. o método do papel-filtro é bastante simples, porém nota-se que precauções devem ser tomadas durante a execução da técnica, a fim de evitar erros no

valor de sucção obtido. Com o uso adequado deste método, podem-se fazer curvas de retenção de água, inclusive para altos valores de sucção;

- v. as curvas características, obtidas pelo método da câmara de pressão, são de grande importância para caracterização dos solos não-saturados, bem como para relacionar seus parâmetros de resistência. A comparação dos resultados obtidos para a curva tende a se aproximar dos resultados obtidos nos ensaios de papel-filtro e nas leituras de campo, feitas pelos tensiômetros.
- vi. considerando os resultados dos ensaios de resistência mecânica, confirma-se, através dos ensaios de cisalhamento direto, que, quando se varia umidade do solo, variam também os valores da coesão, mas mantêm-se os valores do ângulo de atrito. Comparando os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento e triaxial, observa-se que os valores dos ângulos de atrito tendem a ser um pouco menores para o ensaio triaxial;
- vii. com base nas análises de estabilidade feitas na pesquisa, os dois taludes se apresentaram estáveis. Apesar disso, o talude MB merece atenção especial, devido às trincas e aos processos erosivos que vêm ocorrendo no solo, ocasionando deslocamentos e ajudando no processo de desestabilização deste. A solução aparentemente mais simples seria fazer um cobrimento deste talude.

Para finalizar, no que tange ao aspecto social que envolve a pesquisa, nota-se também que grande parte dos deslizamentos de terra ocorridos no Brasil relaciona-se a ocupações desordenadas de encostas, mostrando também o grande problema social existente na área de estabilidade de taludes.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As recomendações para trabalhos futuros são as que se seguem:

- i. na análise dos solos não-saturados é importante realizar ensaios triaxiais de sucção controlada, com construções de curvas características;
- ii. obter mais informações sobre o comportamento da frente de saturação para profundidades maiores do que 1 metro;
- iii. relacionar o comportamento da frente de saturação com dados de permeabilidade e condutibilidade hidráulica dos solos não-saturados;
- iv. realizar mais ensaios de papel-filtro com a intenção de estender sua avaliação a partir de análises estatísticas;
- v. ampliar o banco de dados geotécnicos relativos aos taludes analisados, de modo a possibilitar determinações de parâmetros geotécnicos dos solos com base em tratamentos estatísticos;
- vi. fazer as análises de estabilidade dos taludes usando a técnica de elementos finitos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCHISON, G. D. & RICHARDS, B. G. – A broad scale study of moisture conditions in pavement subgrades throughout Australia. 2: Techniques adopted for the measurement of moisture variables. Moisture equilibrium and moisture changes in soils beneath covered areas. Australia: Butterworth, 1965.

AZEVEDO, M. A. A. Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa-MG. Viçosa: UFV, 1999. 174p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.

AZEVEDO, M. A. A., LIMA, D. C., BUENO, B. S., MINETTE, E., SCHAEFFER, C. E. G. R. Caracterização geotécnica das formações superficiais de solo de Viçosa-MG. In CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 11, 1998, Brasília. Anais ... Brasília: 1998.v.1.p.81-88.

BAPTISTA, E. I., LIMA, D. C., BUENO, B. S. Análise de risco para as encostas de Viçosa – MG. In: PAN-AMERICAN SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 2; CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2, 1997, Rio de Janeiro. Anais ... Rio de Janeiro: ABMS/ABGE, 1997. v.2.p.783-791.

BISHOP A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. **Geotechnique**, v.5, n. 1, p. 7 – 17, 1955.

- BRAND, E. W. Analysis and design in residual soils. In: CONFERENCE ON ENGINEERING IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS, 1982, Honolulu. Proceedings... Honolulu: 1982.p.89-143.
- BRAND, E. W. Some thoughts on rain-induced slope failures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10, 1981, Stockholm. Proceedings... Stockholm: 1981. v3.p.373-376.
- BUCKINGHAM, E. Studies on the moment of soil moisture. Bur. Of soils Bull. 38, U.S. Dept. of Agric. Washington, D.C. 1907. Apud MACHADO, S. L. Aplicação dos Conceitos de Elastoplasticidade a Solos não Saturados. São Carlos - SP: USP 1998. 361 p. Dissertação (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1998.
- BULUT, R.; LYTTON, R.L.; WRAY, W.K. **Soil Suction Measurements by Filter Paper.** Geotechnical Special Publication Number 115. **Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations** Proceedings of Geo-Institute Shallow Foundation and Soil Properties Committee Sessions at the ASCE 2001 Civil Engineering Conference Sponsored by The Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers October 10-13, 2001 Houston, Texas Edited by C. Vipulanandan, Marshall B. Addison, Michael Hasen.
- CARVALHO FILHO, A. Caracterizações mineralógicas, química e física de solos de duas unidades de paisagem no planalto de Viçosa-MG. Viçosa: 1989. 194 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa.
- CASSEL, D. K. & KLUTE, A. "Water Potential: Tensiometry." in Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed., A. KLUTE, Ed., Amer. Soc. Of Agronomy, Soil Sci. Soc. Of Amer., Madison, WI, 1986.
- CHANDLER R. J. & GUTIERREZ C. I. - TECHNICAL NOTE: The filter-paper method of suction measurement, Geotechnique 36, I 02, junho 1986, pages 265 to 268.

- CHANG, R. K., Pressure plate apparatus for volumetric measurement of suction, swelling pressure and consolidation in clay soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 6, 1969.
- CUSTÓDIO, G. S.; VIEIRA, G. S.; SILVA, C. H. C.; BARBOSA, P. S. A. – Estudo de fatores que influenciam a curva característica de retenção de água no solo. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 25-27 de agosto de 2004, São Carlos – SP.
- DEERE, D. V. Slope Stability in Residual Soils. In: State of the Art Paper. Porto Rico: Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proc., 1971, vol. I: 87-170.
- FERRAZ, R. L. Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais. Viçosa: UFV, 1994. 174p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- FEUERHARMEL, C. GEHLING, W. Y. Y. BICA, A. V. D. PEREIRA, A. Determinação das curvas características de solos coluvionares pelo uso combinado da placa de sucção e método do papel filtro. 5º Simpósio de Solos Não Saturados, 25 a 27/08/2004 – São Carlos/SP.
- FONSECA, E. C., Ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada em solos não saturados, Tese de Mestrado, DEC/PUC – Rio, 1991.
- FREDLUND D. G. & RAHARDJO H. – **Soil Mechanics for Unsaturated Soils** – by John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- FREDLUND D.G. & XING A. - Equations for the soil-water characteristic curve - *Canadian Geotechnical Journal*, March 7, 1994. 12p.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. AND WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. *Can. Geo. Jnl.* 15 (3), 1978.
- FREDLUND, D. G.; VANAPALLI, S. K.; XING, A. AND PUFAHL, D. E. Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil water characteristic curve. Proc. of the 1st Int. Conf. On unsaturated soils. Paris, 1995.

- GUIDICINI, G. e NIEBLE, C. M. – **Estabilidade de taludes naturais e de escavação** – São Paulo: Edusp/Edgard Blücher, 1984 170p.
- GULHATI, S. K. & SATIJA, D. J. Shear strength of partially saturated soils. X ICSMFE, Stokolmo, V1, 1981.
- HILF, J. W. An investigation of pore water pressure in compacted soils. Bureau of reclamation tech. mem., 1956.
- JUCÁ, J. F. T. Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succion controlada. Tesis doctoral. Universidad de Madrid. 1990.
- LEVIS, S. D. e KORMANN, A. C. M. Obtenção de relações de sucção de uma argila da Formação Guabirotuba com o método do papel filtro. 1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, 23 a 24/08/2004 – São Carlos/SP.
- LUIZ, P. G. – **Caracterização geotécnica e considerações sobre a estabilidade de taludes em solos residuais de Viçosa-MG**. Viçosa: UFV 2000. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- LUMB, P. Slope failures in Hong Kong. Quaterly Journal of Engineering Geology, v.8.,p.31-65, 1975.
- MACHADO, S. L. Aplicação dos Conceitos de Elastoplasticidade a Solos não Saturados. São Carlos - SP: USP 1998. 361 p. Dissertação (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1998.
- MAHLER C. F.; PACHECO A. C. C. S.; GONÇALVES E H. – Desenvolvimento de um tensiômetro para medições de sucções elevadas – 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 25-27 de agosto de 2004, São Carlos – SP.
- MASSAD, F. – Obras de Terra, curso básico de geotecnia – Ed Oficina de Textos, 2003, 169 p.

- MORGENSTERN, N., PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Geotechnique**, v. 15, n. 1, p. 79 – 93, 1965.
- ÖBERG, A. L. & SALLFORS, G. A. A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils. Proc. of First Int. Conf. On Unsaturated Soils. Paris, 1995.
- PACHECO, A. C. C. S. – Desenvolvimento de um novo tensiômetro para medidas de sucção de uma ATM. Tese de MSc. COPE/UFRJ ano 2001. 93pags.
- PITANGA H. N. – Influência da velocidade de carregamento e do tempo de inundação na resistência ao cisalhamento de solos estruturados. Viçosa: UFV 2002. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- PRADO DE CAMPOS, L. E. P. Influência da sucção na estabilidade de taludes naturais em solos residuais. Rio de Janeiro: PUC, 1984. 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, 1984.
- PRESA, E. P., Efeito das trajetórias de tensão e sucção nas variações volumétricas de solos não saturados, 2º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais, São Paulo, 1991.
- PRESA, E. P.; FONCECA, E. C.; CAMPOS, L. E. P. e MACHADO, S. L., Análise das trajetórias de sucção-umidade de um solo residual de granulito. Anais do 2º Simpósio Sobre Solos Não Saturados, AMSF-UFPE / ABMS-NE, Recife-PE, 1994.
- RAMALHO, G. G. C. Mapeamento geotécnico de Viçosa com uso de Sistemas de Informações Geográficas. Viçosa: UFV, 1993. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- RICHARDS, L. A. The usefulness of capillary potencial to soil-moisture and plant investigators. Journal of Agricultural Research. Washington, 37 (12), 1928.
- RIDLEY, A. M. & BURLAND, J. B. – A new instrument for the measurement of soil moisture suction. Geotechnique 43, No. 2, 321-324 - TECHNICAL NOTE, 1993.

- RÖHM, S. A. Resistência ao cisalhamento de um solo arenoso laterizado não saturado da região de São Carlos-SP. Tese de Doutorado, EESC/USP, São Carlos, 1992.
- SANTOS, C. R., VILAR, O. M. Análise paramétrica da influência da condutibilidade hidráulica e da curva de retenção na infiltração e na estabilidade de taludes em solos não saturados. 5º Simpósio de Solos Não Saturados, 25 a 27/08/2004 – São Carlos/SP.
- SPENCER, E. A Méthod of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. **Geotechnique**, v. 17, n. 1, p. 11 – 26, 1967.
- TERZAGHI, K. Mecanismo dos escorregamentos de terra. São Paulo : Revista Politécnica, n 167, 41 p, 1952.
- VANAPALLI, S.K.; SILLERS, W.S.; and FREDLUND M.D. - The meaning and relevance of residual state to unsaturated soils - 51st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, Alberta, October 4-7, 1998. 8p.
- VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo: McGraw Hill, 1977, 509 p.
- WOLLE, C. M., HACHICH, W. Rain – induced landslides in southeastern Brasil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FUDATION ENGINEERING, 12, 1989, Rio de Janeiro. Proceedings... Rio de Janeiro: 1989. p.1639-1942.

9. NORMAS TÉCNICAS

EB-22 (NBR 5734) – Peneiras para ensaios.

MB-27 (NBR 6427) – Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

MB-28 (NBR 6508) – Grãos de solo que passam na #4 – Determinação da massa específica.

MB-30 (NBR 6459) – Solo – Determinação do limite de liquidez.

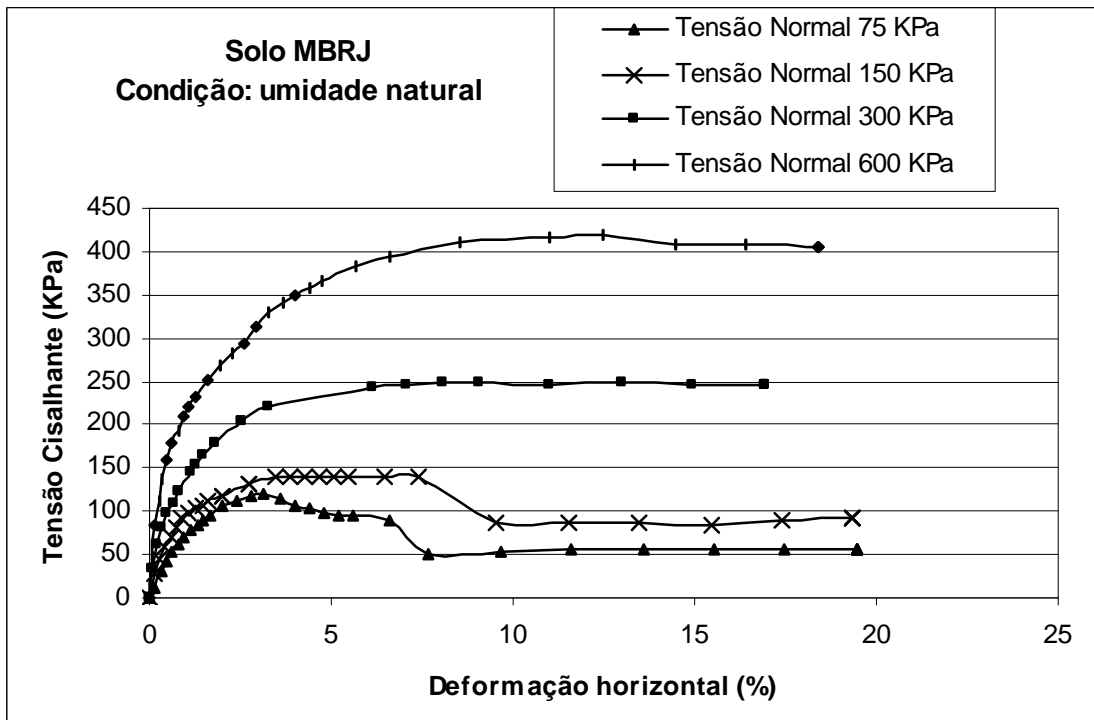
MB-31 (NBR 9180) – Solo – Determinação do limite de plasticidade.

MB-32 (NBR 7181) – Solo – Análise granulométrica.

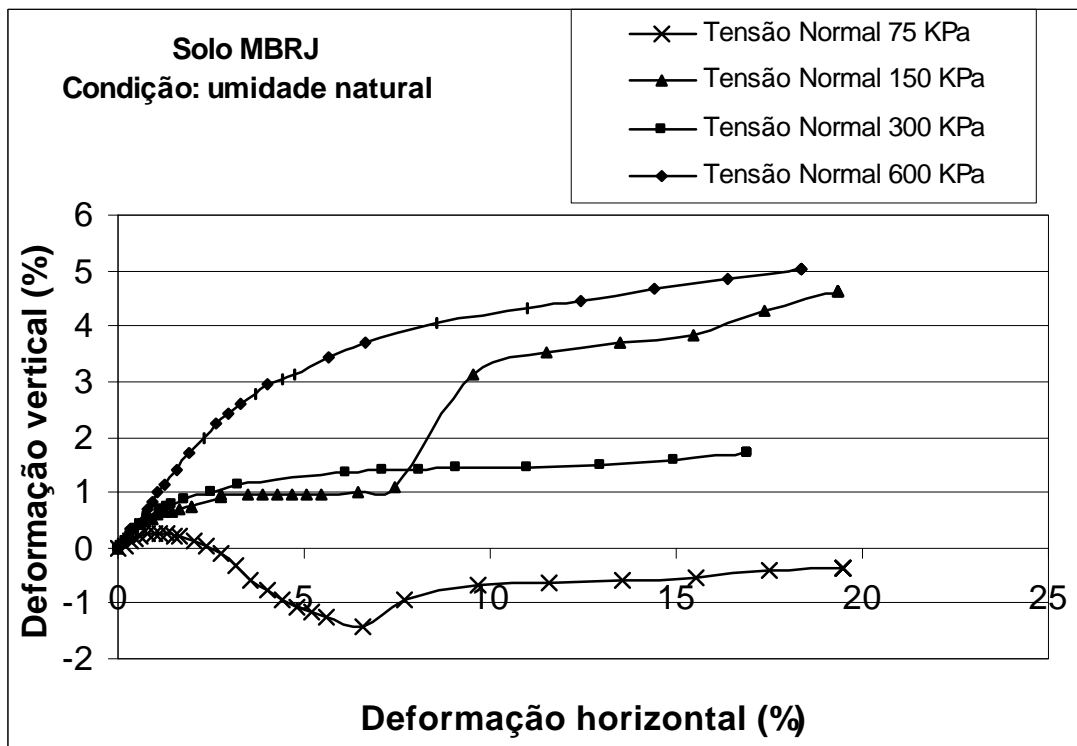
10. APÊNDICE

Nas Figuras 54 a 61 encontram-se os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, tensão de cisalhamento *versus* deformação horizontal e deformação vertical *versus* deformação horizontal.

Nas Figuras 62 a 65 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios triaxiais CIU-nat, tensão desviadora *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial.

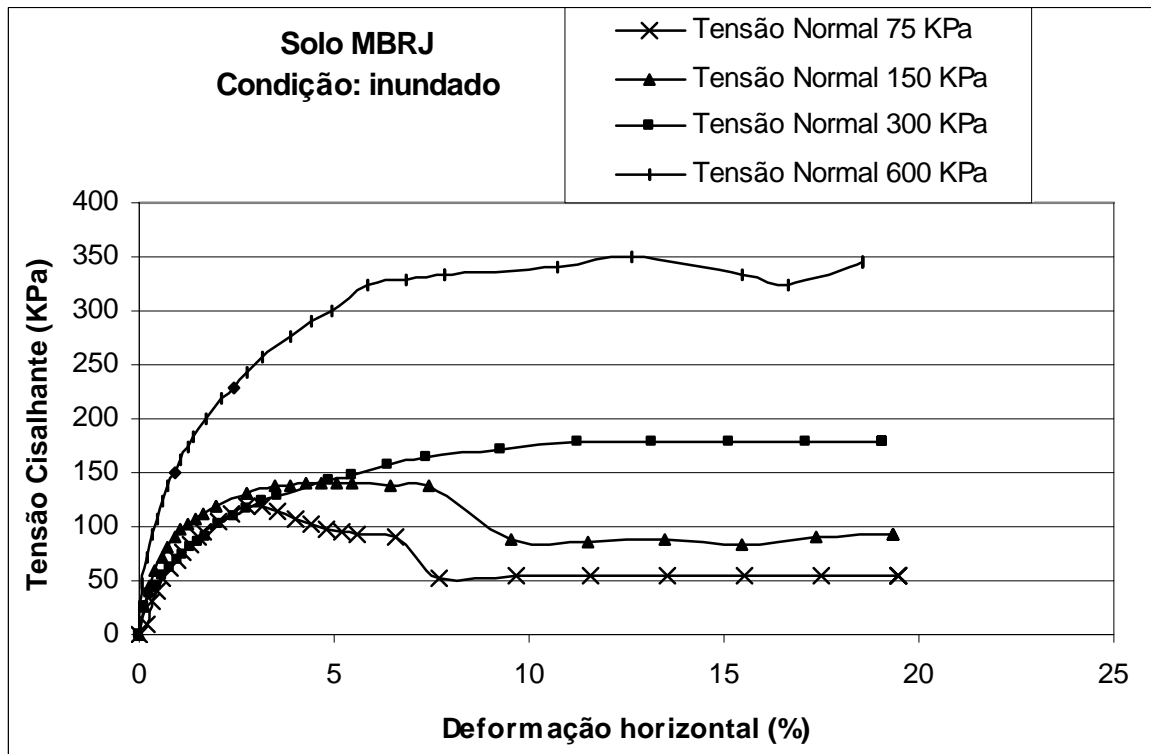


(A)

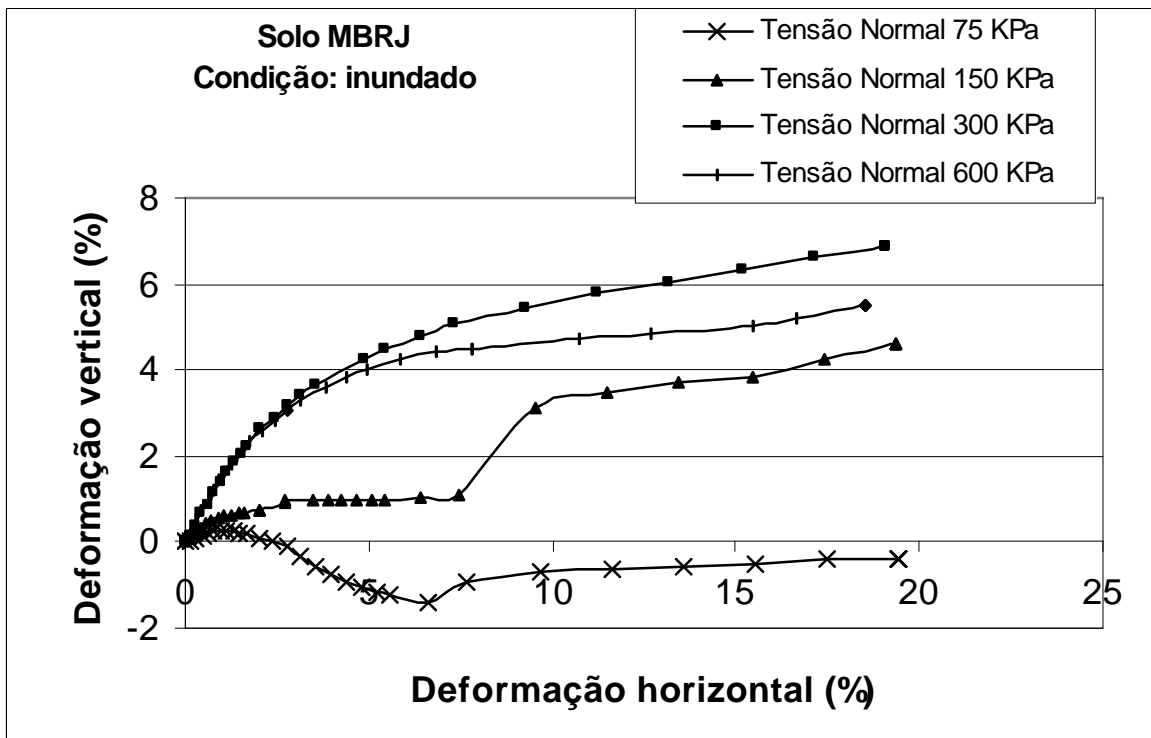


(B)

Figura 54 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo MBRJ na umidade natural: (A) gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal.

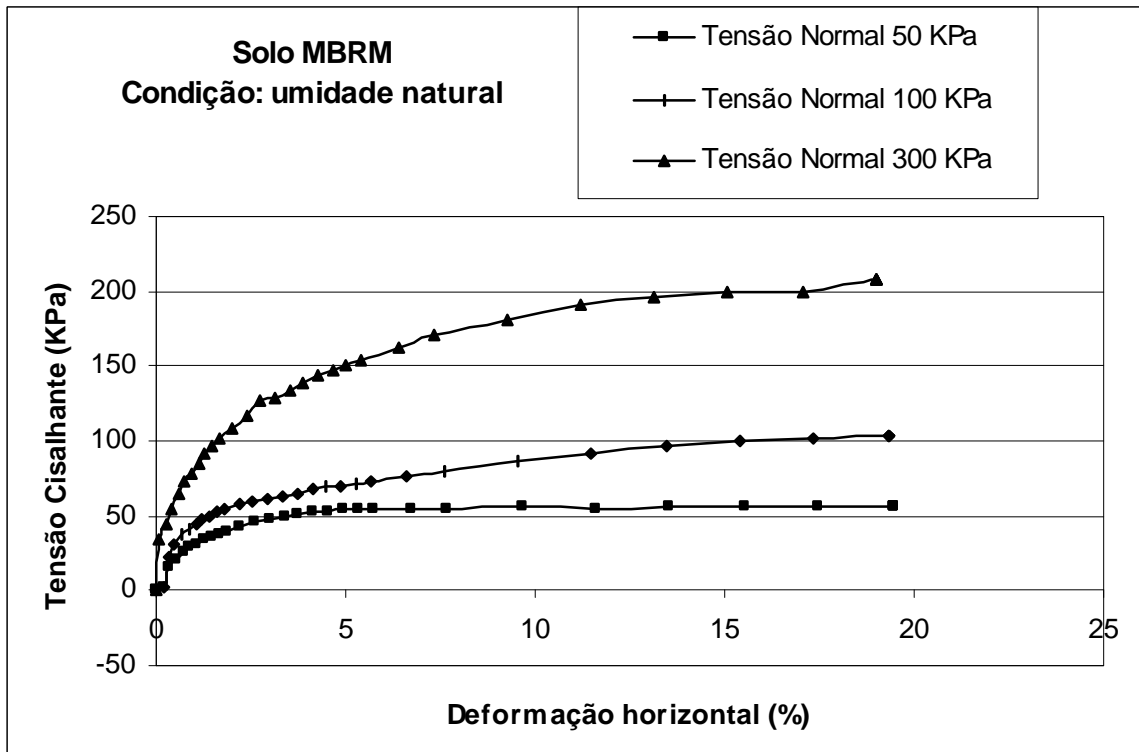


(A)

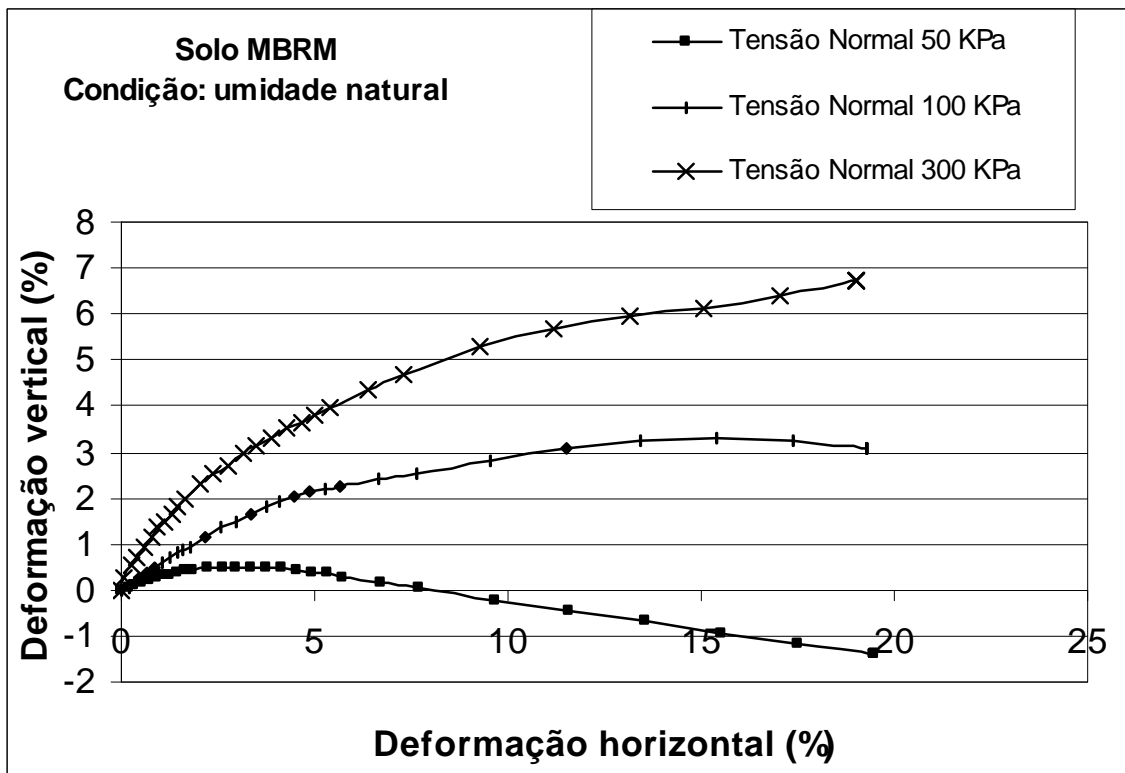


(B)

Figura 55 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo MBRJ inundado: (A) gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal.

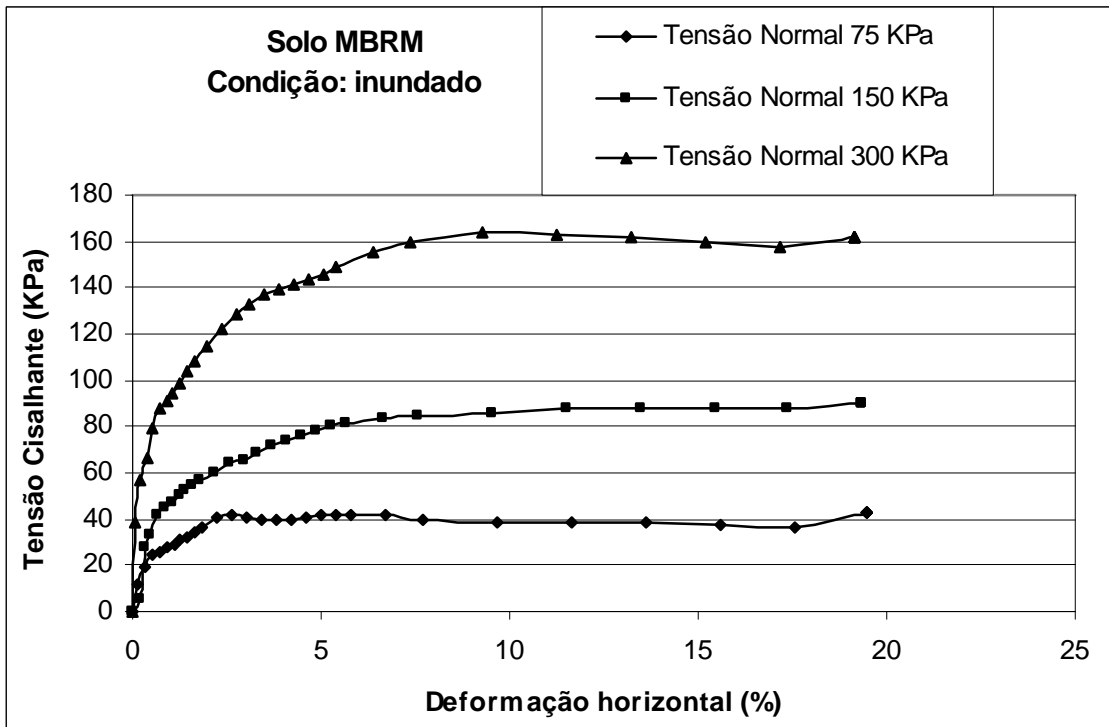


(A)

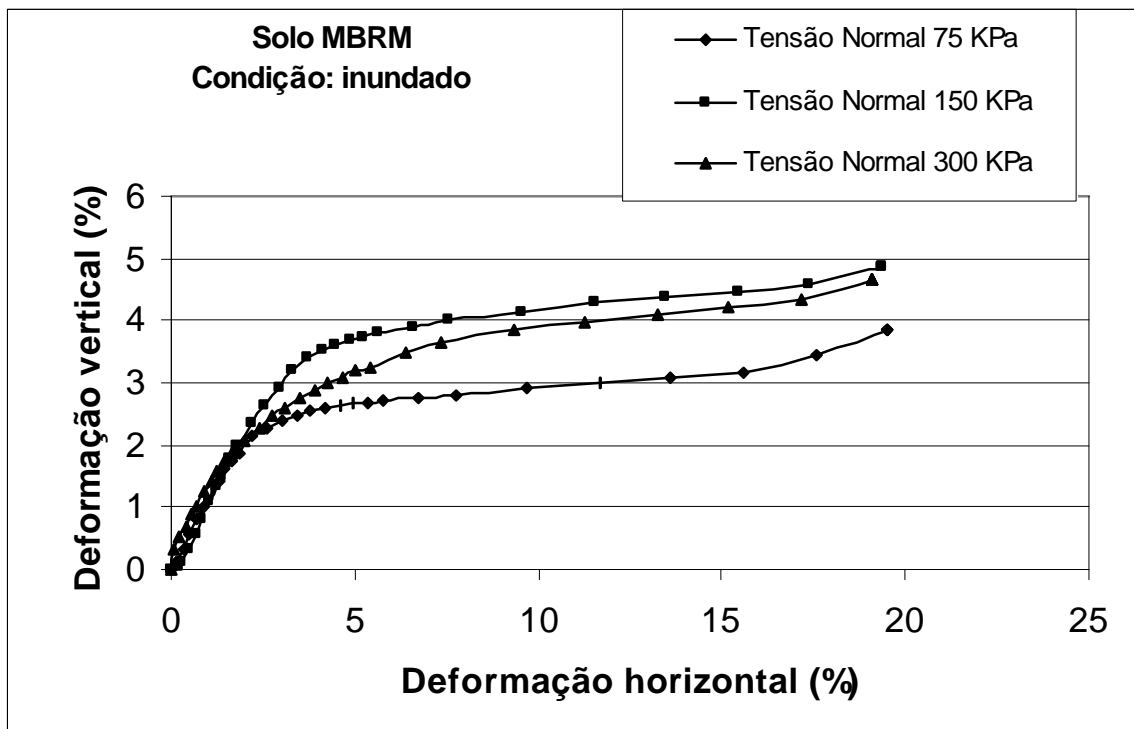


(B)

Figura 56 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo MBRM na umidade natural: (A) gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal.

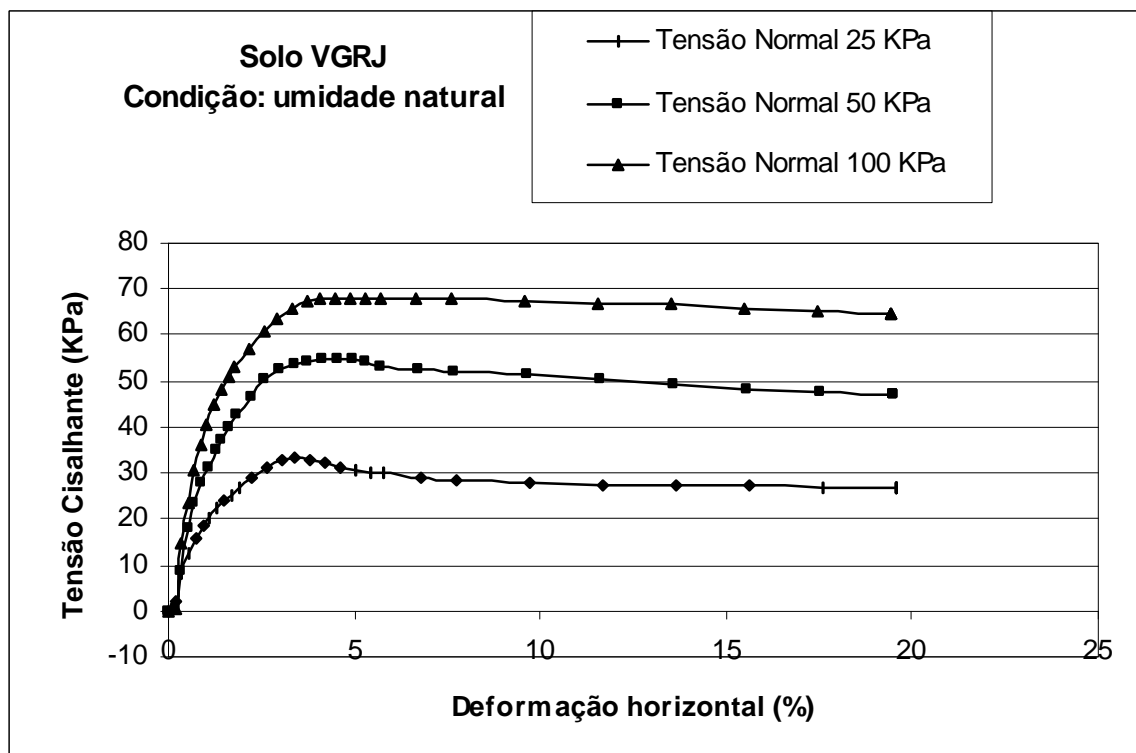


(A)

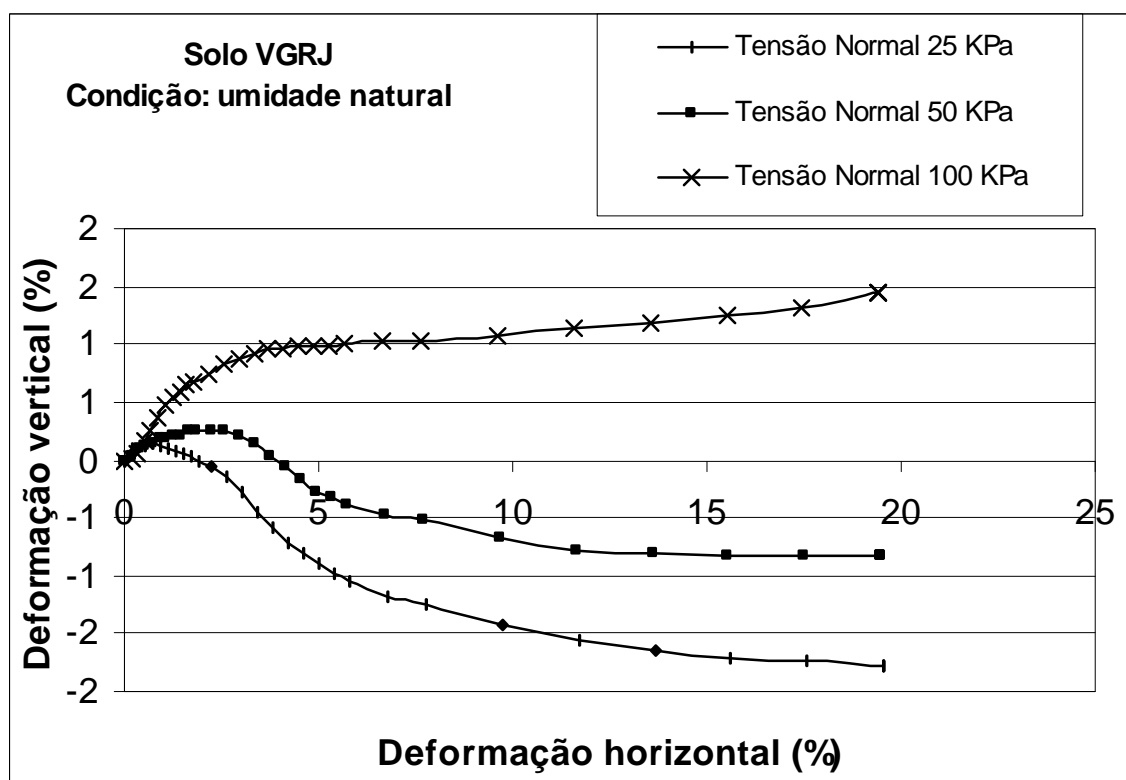


(B)

Figura 57 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo MBRM inundado: (A) gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal.

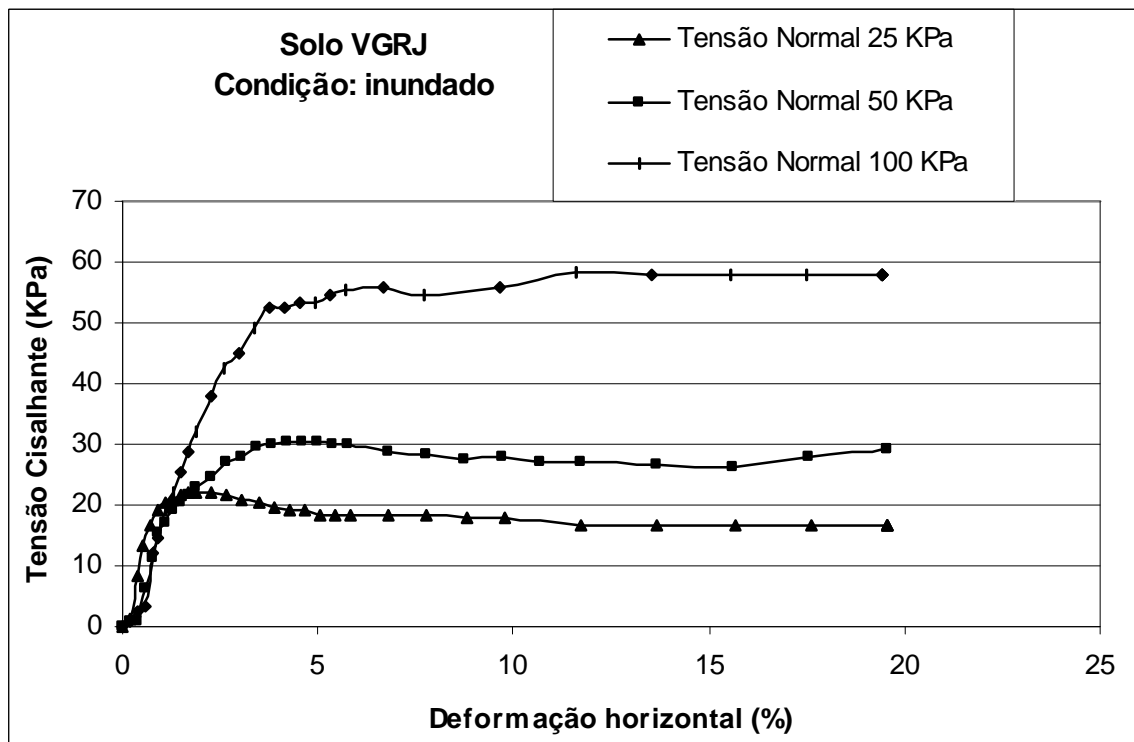


(A)

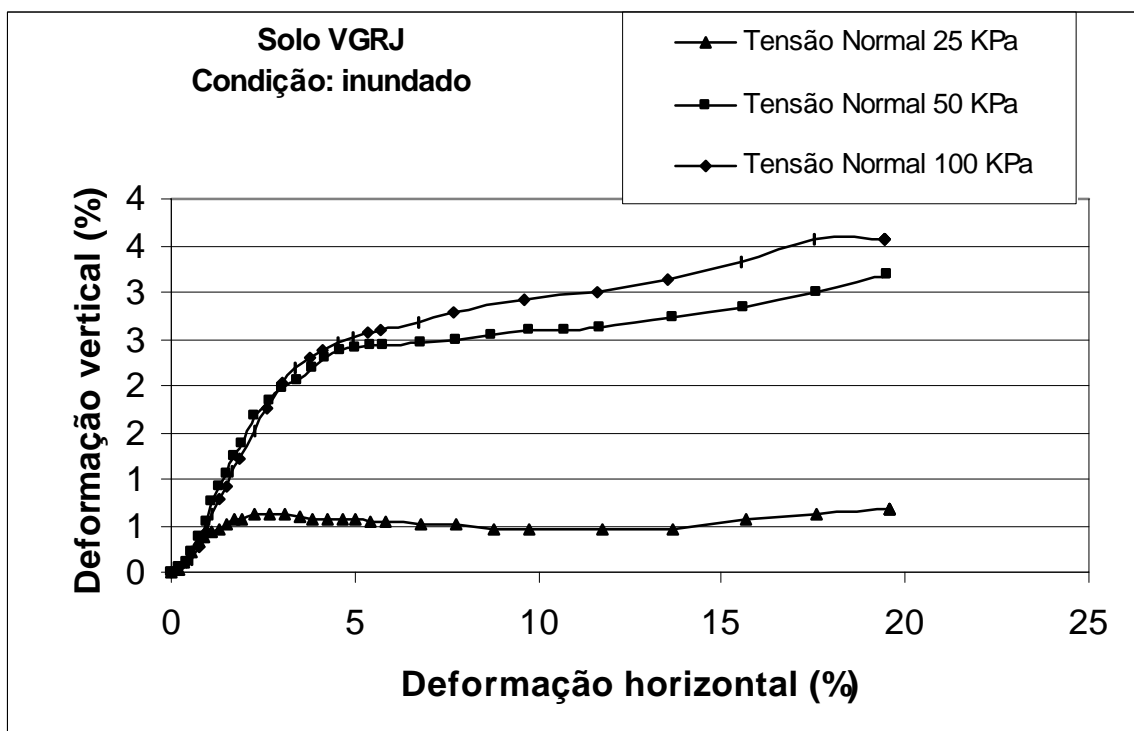


(B)

Figura 58 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo VGRJ na umidade natural: (A) gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal.

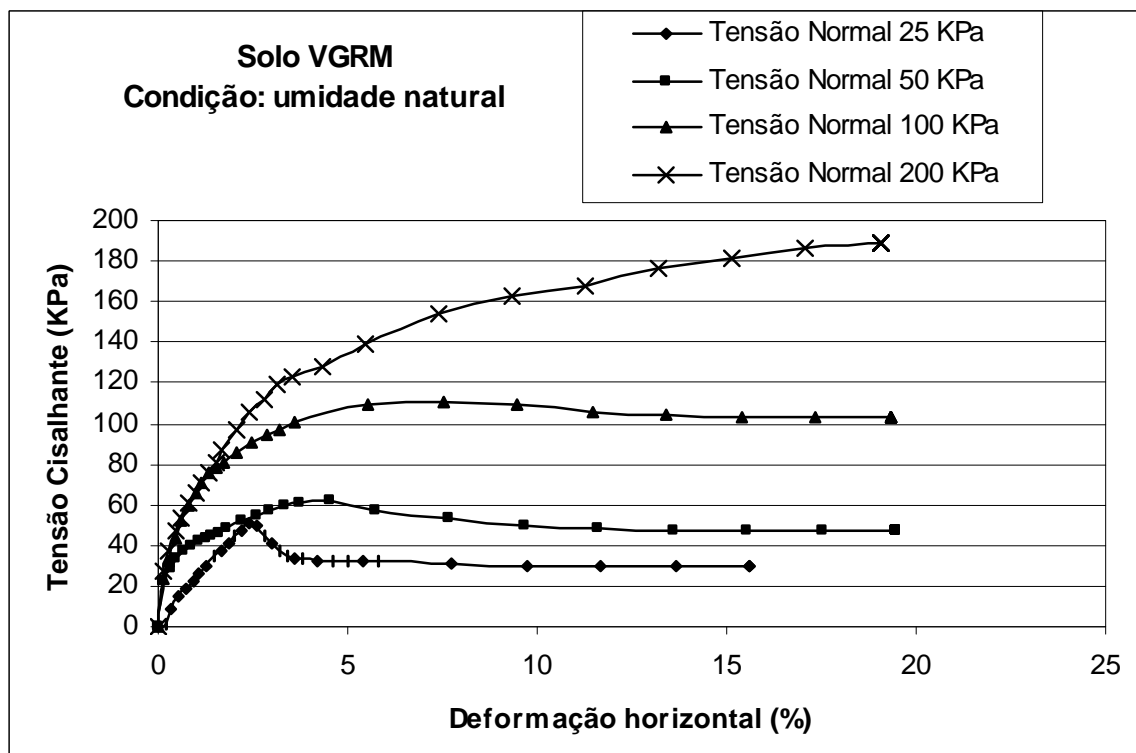


(A)

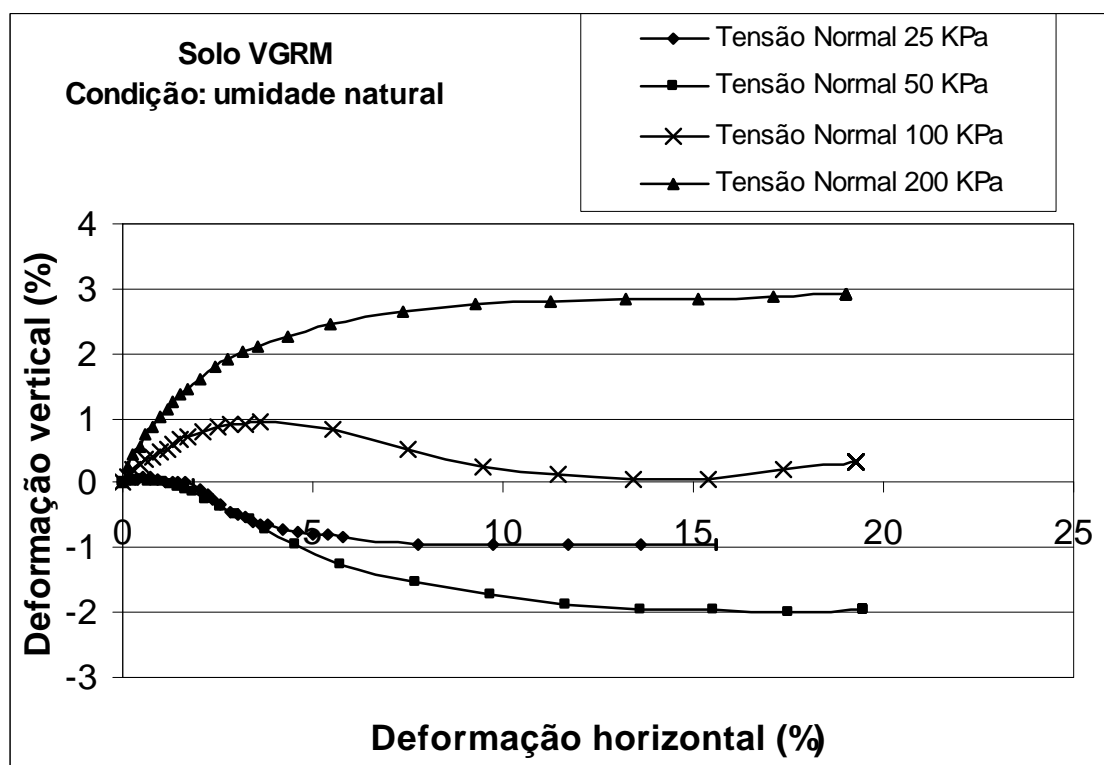


(B)

Figura 59 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo VGRJ inundado: (A) gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal.

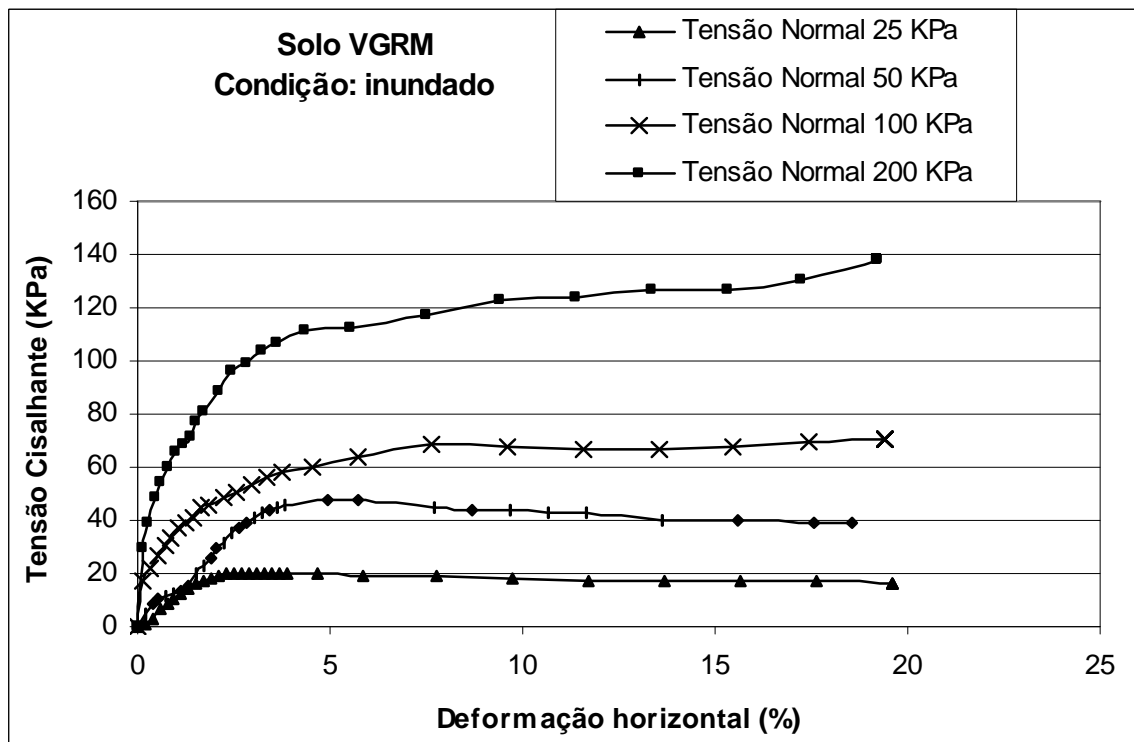


(A)

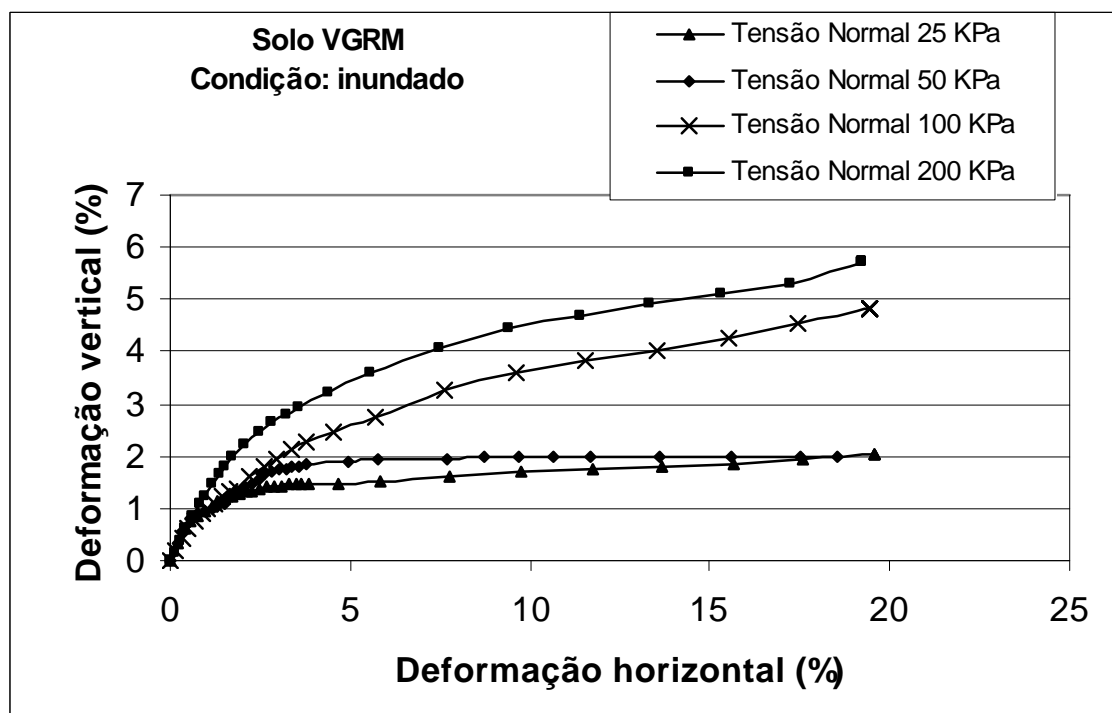


(B)

Figura 60 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo VGRM na umidade natural: (A) gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal.

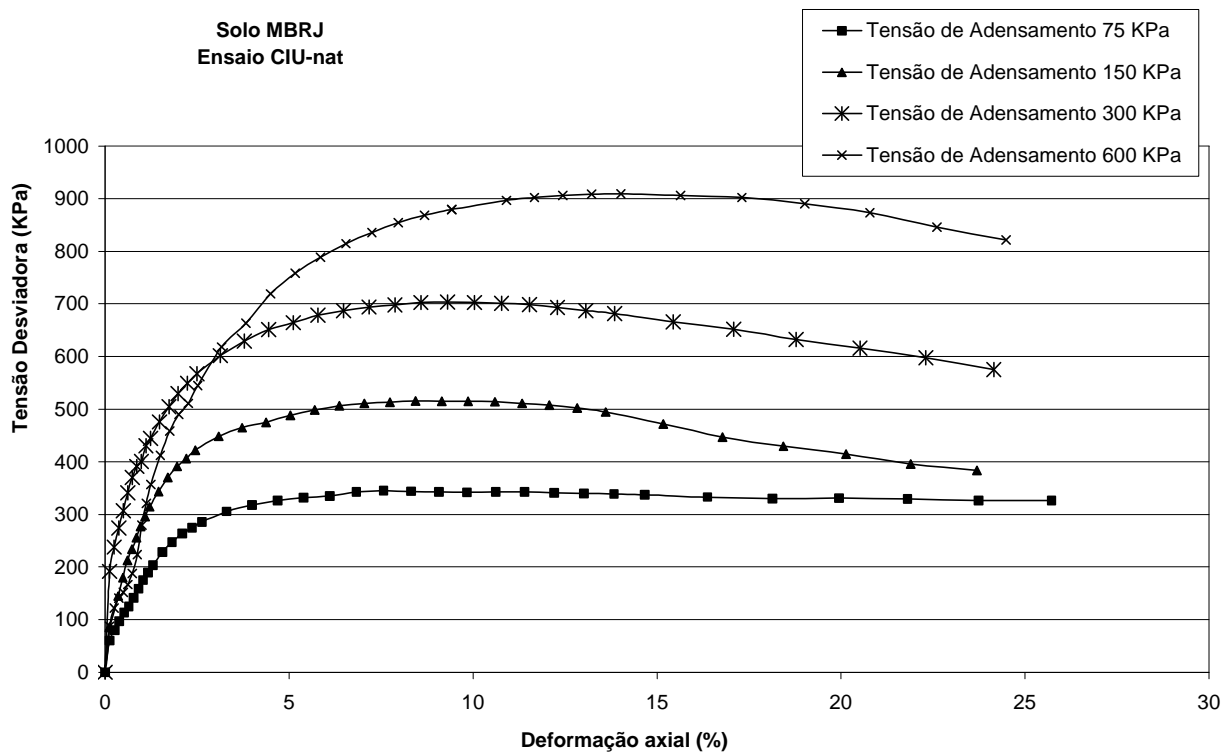


(A)

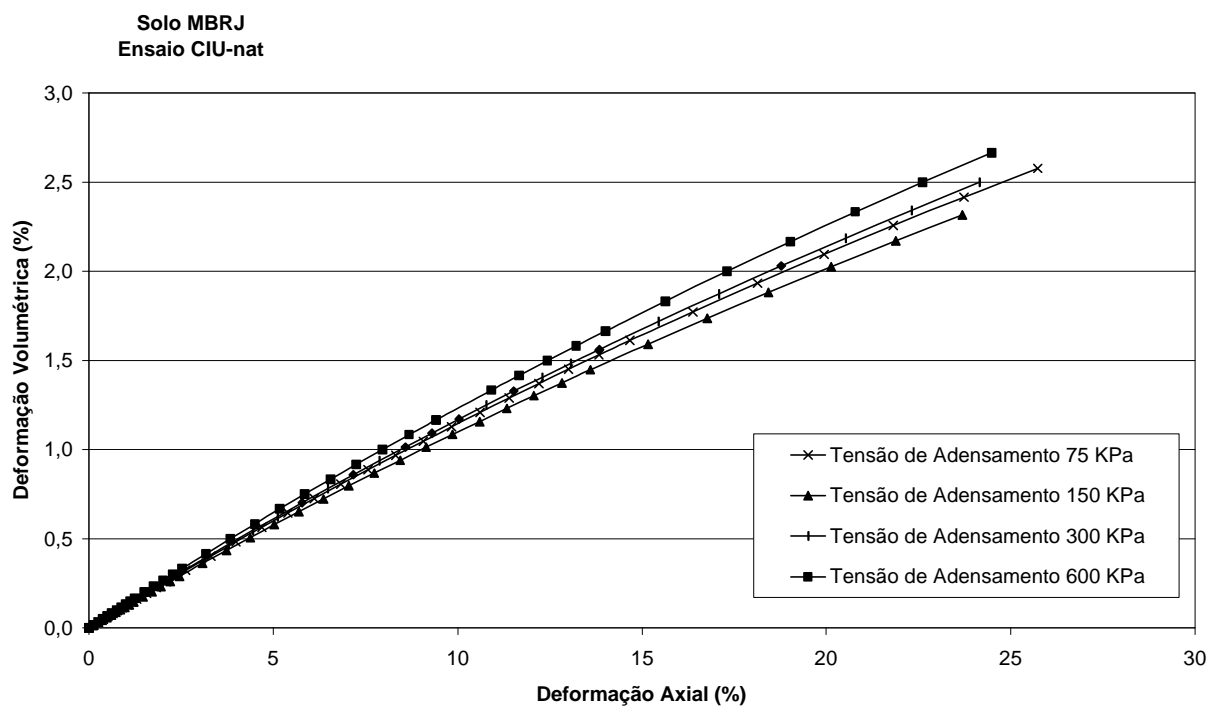


(B)

Figura 61 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo VGRM inundado: (A) gráfico de tensão cisalhante *versus* deformação horizontal; (B) gráfico de deformação vertical *versus* deformação horizontal.

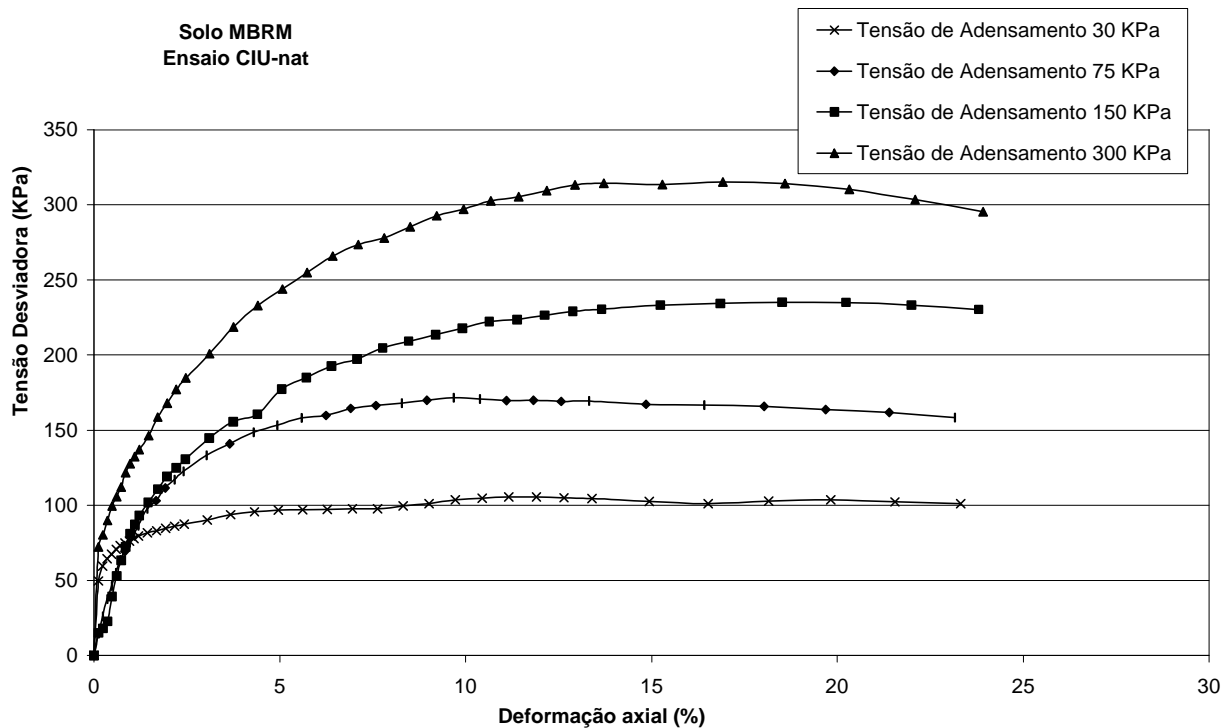


(A)

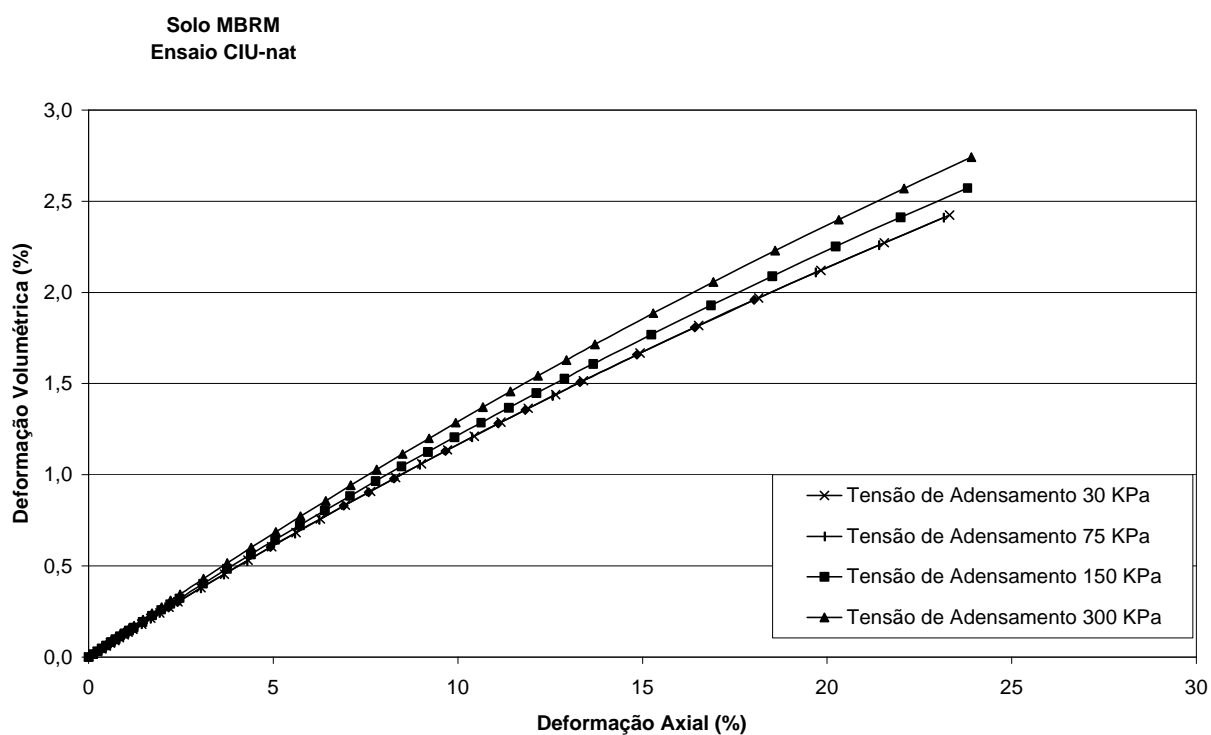


(B)

Figura 62 – Gráficos dos ensaios triaxiais do solo MBRJ: (A) tensão desviadora *versus* deformação axial; (B) deformação volumétrica *versus* deformação axial.

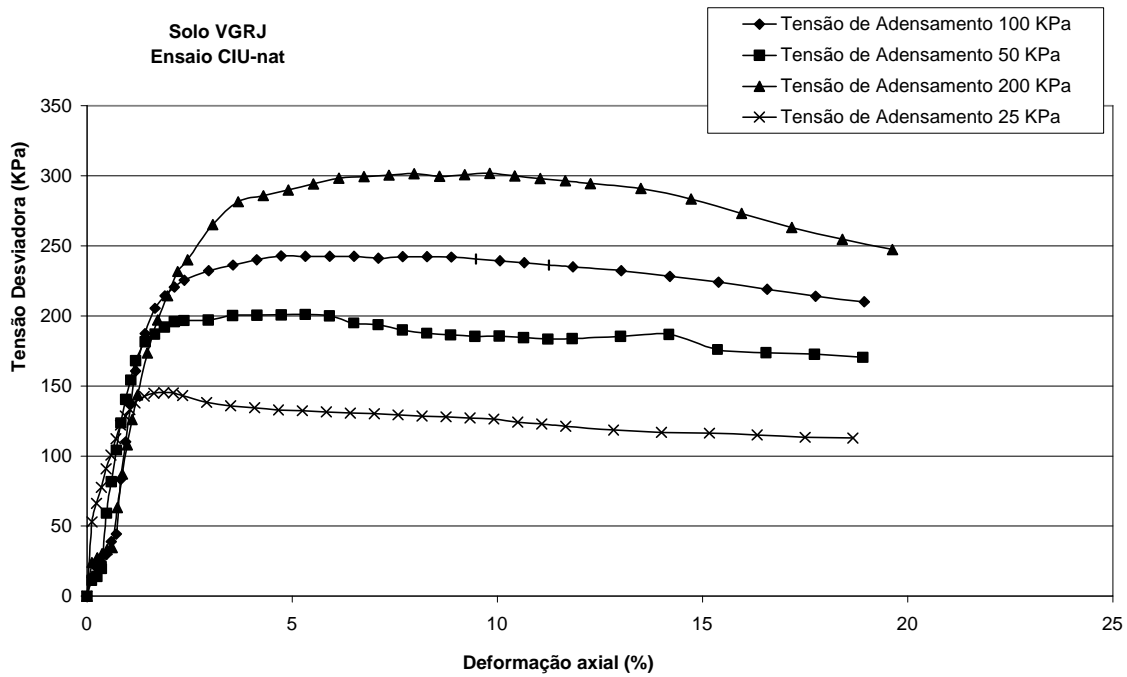


(A)

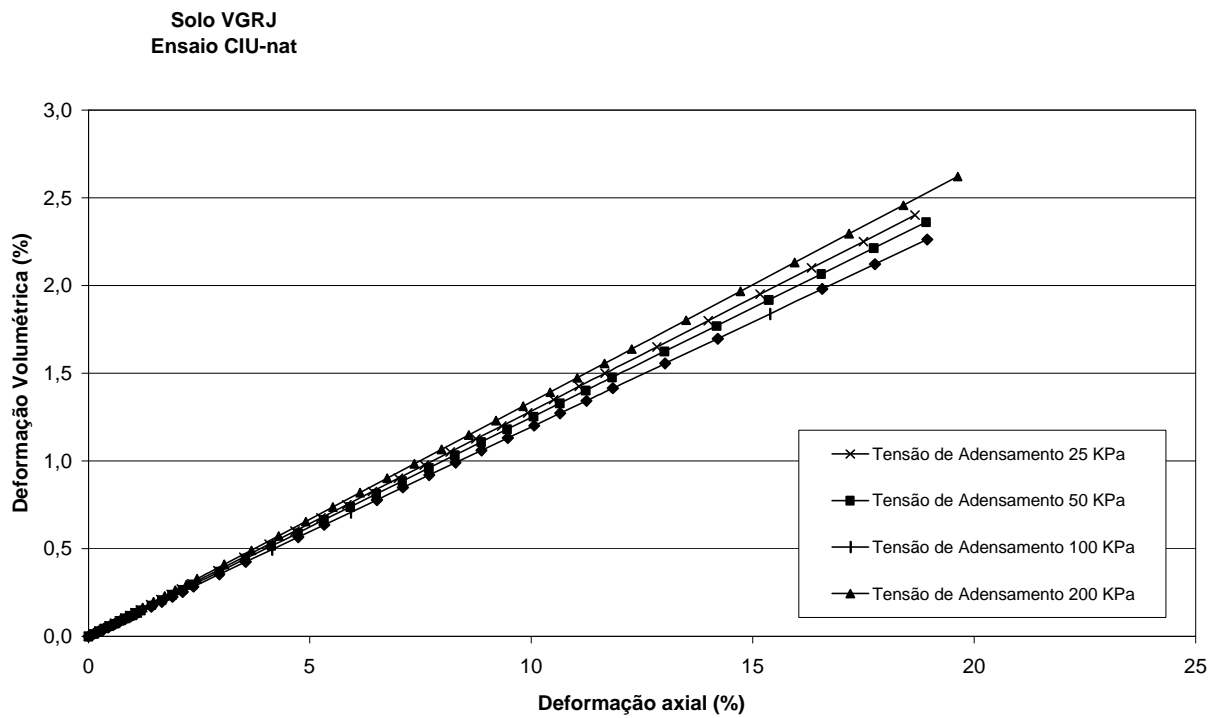


(B)

Figura 63 – Gráficos dos ensaios triaxiais do solo MBRM: (A) tensão desviadora *versus* deformação axial; (B) deformação volumétrica *versus* deformação axial.

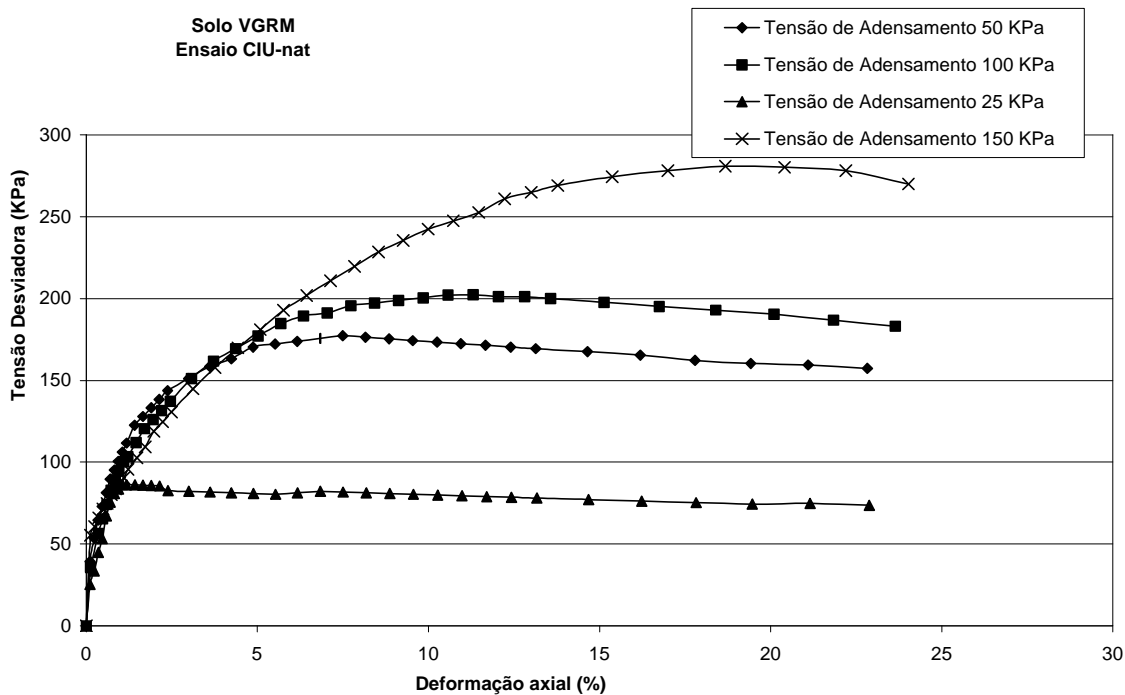


(A)

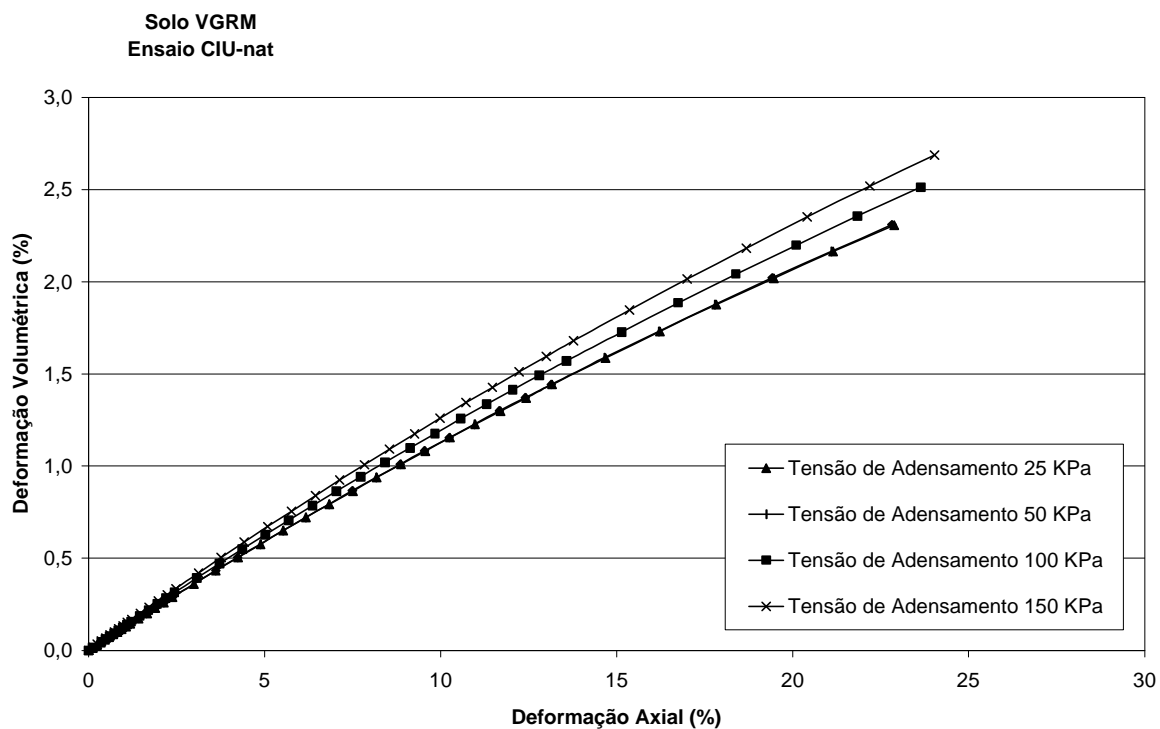


(B)

Figura 64 – Gráficos dos ensaios triaxiais do solo VGRJ: (A) tensão desviadora *versus* deformação axial; (B) deformação volumétrica *versus* deformação axial.



(A)



(B)

Figura 65 – Gráficos dos ensaios triaxiais do solo VGRM: (A) tensão desviadora *versus* deformação axial; (B) deformação volumétrica *versus* deformação axial.