



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

MESTRADO EM GEOTECNIA

MICHELE ALVES DE CASTRO

**UTILIZAÇÃO DE SOLOS SAPROLÍTICOS NA CONSTRUÇÃO DE
PEQUENAS BARRAGENS DE TERRA**

FORTALEZA

2014

MICHELE ALVES DE CASTRO

**UTILIZAÇÃO DE SOLOS SAPROLÍTICOS NA CONSTRUÇÃO DE PEQUENAS
BARRAGENS DE TERRA**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação do Curso de Pós Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de
Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Francisco Chagas da
Silva Filho, DSc.

FORTALEZA

2014

MICHELE ALVES DE CASTRO

**UTILIZAÇÃO DE SOLOS SAPROLÍTICOS NA CONSTRUÇÃO DE PEQUENAS
BARRAGENS DE TERRA**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Coordenação do Curso de Pós Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de
Concentração: Geotecnia

Aprovada em: ____/____/2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho (Externo à Instituição)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Prof. Dr. Antônio Nunes de Miranda (Externo ao Programa)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

“Tudo acontece na hora certa.
Tudo acontece, exatamente quando deve acontecer”

(Albert Einstein)

DEDICATÓRIA

*A Deus, por me conduzir sempre ao caminho da felicidade.
Aos meus amados pais, Rosa e João, pela minha educação e formação.
À minha filha, Mikaelly, que é a razão da minha vida.
Aos meus irmãos, João Roberto e Maísa, pelo apoio e compreensão.*

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, por iluminar e abençoar minha trajetória.

À minha filha Mikaelly, por ser minha fonte inspiradora.

Aos meus pais Rosa e João, pelo apoio e por tudo que sempre fizeram por mim, pela simplicidade, exemplo, amizade, e carinho, fundamentais na construção do meu caráter. Além da ajuda incansável da minha mãe para ajudar nos cuidados com minha filha.

Aos meus irmãos, Maísa e João Roberto, pelo apoio, compreensão e carinho.

Ao meu avô, pai Raimundo (*in memoriam*), pois sei que está no céu me iluminando e a minha avó Dedel, que sempre me abençoa nas minhas decisões.

Ao meu namorado Edson por sua paciência, atenção, companheirismo e por ser tão presente em minha vida.

Ao meu queridíssimo amigo Gleiber, pacientemente sempre me ajudando, dando conselhos, força, coragem e incentivo.

À minha amiga Diana, por sua amizade, apoio e torcida constante.

A Rosiel Leme pela ajuda com o programa utilizado e a todos os outros que conheci ao longo desse mestrado, pelo companheirismo e horas de estudos.

Ao professor Francisco Chagas da Silva Filho, meu orientador, pelo incentivo, orientações no desenvolvimento da pesquisa.

Aos Professores Silvrano Adonias Dantas Neto e Alfran Sampaio Moura pelos ensinamentos.

Aos colaboradores do Laboratório de Mecânica dos Solos pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa. Em especial ao Carlos Germano, Roberto, Anselmo e Francisco pelas constantes ajudas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de Mestrado.

RESUMO

Nesta dissertação estuda-se a obtenção de parâmetros dos solos saprolíticos provenientes do Bairro de Messejana, vendo a possibilidade de serem utilizados na construção de maciços e nos núcleos de pequenas barragens de terra. A principal característica deste solo é exibir claramente feições estruturais herdadas da rocha matriz. Este trabalho tem como principal meta modelar barragens de pequeno porte com os parâmetros obtidos e avaliar a influência da não saturação dos solos saprolíticos em análises de estabilidade de taludes em barragens de terra durante o enchimento. Para tanto, foi realizado um estudo de fluxo e estabilidade em uma Barragem hipotética utilizando o Sistema GeoStudio 2007 (SEEP/W, SLOPE/W). Para a determinação dos parâmetros geotécnicos do maciço, foram obtidas amostras deformadas para a realização de ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade, adensamento e resistência ao cisalhamento direto. A partir dos resultados dos ensaios geotécnicos, foram feitas simulações transientes para um período de trinta e seis meses de operação da barragem hipotética. Pelas simulações de fluxo, foi possível conhecer as condições de fluxo durante o período analisado. Com base nos resultados do estudo de percolação transiente, foram realizadas análises de estabilidade no talude de jusante para o período de enchimento do reservatório. Nos resultados obtidos foi constatada a influência na estabilidade de talude ao considerar a sucção, visualizando uma redução no fator de segurança conforme ocorre o avanço da frente de saturação. Também foi constatado que nos resultados em que foi considerada a sucção nas análises de estabilidade, os valores dos fatores de segurança foram mais elevados que os apresentados pela metodologia tradicional, constatando o conservadorismo da metodologia tradicional. Assim, os solos saprolíticos são materiais apropriados para a construção de núcleos impermeáveis e maciços homogêneos de barragens de terra.

Palavras-chave: Solos saprolíticos, Barragens de terra, Simulação numérica.

ABSTRACT

This dissertation studies to obtain parameters of the saprolite soils from neighborhood Messejana, seeing the possibility of being used in the construction of massive cores and small earth dams. The main feature of this soil is showing clearly inherited structural features of the rock matrix. This work has as main goal to model small dams with the parameters obtained and to evaluate the influence of non- saturation of saprolite soils in slope stability analysis in earth dams during filling. To this end, a study of flow and stability in a hypothetical dam using GeoStudio System 2007 (SEEP / W, SLOPE / W) was conducted. To determine the geotechnical parameters of the massive, deformed samples for testing characterization, compaction, permeability, consolidation and direct shear resistance were obtained. From the results of geotechnical, transient simulations for a period of thirty-six months of operation of hypothetical dam were made. By flow simulations, it was possible to know the flow conditions during the reporting period. Based on the results of the transient seepage, slope stability analyzes in the downstream for the period of reservoir filling were performed. The results we observed the influence of slope stability by considering the suction, visualizing a reduction in the safety factor as the advance of the saturation occurs. It was also noted that the results in which the suction was considered in stability analyzes, the values of the safety factors were higher than those presented by the traditional method, noting the conservatism of traditional methodology. Thus, the saprolite soils are suitable for constructing waterproof and homogeneous masses of cores earth dams materials.

Keywords: Soil saprolite, earth dams, Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama triangular mostrando as principais classes de textura dos solos.	21
Figura 2 – Perfil de solo saprolítico.....	23
Figura 3 - Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical.	30
Figura 4 - Ocorrência de solos saprolíticos no território brasileiro.	31
Figura 5 - Modelos de macroestrutura de solos saprolíticos em diferentes graus de evolução (crescente de baixo para cima).	32
Figura 6 - Principais elementos de uma barragem homogênea.	36
Figura 7 - Principais Domínios dos Terrenos Pré-Cambrianos do Estado do Ceará.....	41
Figura 8 – Coberturas residuais jovens na área de pesquisa.....	42
Figura 9 - Método de Otimização.....	44
Figura 10 - Localização da área de pesquisa no contexto estadual e municipal, respectivamente.	47
Figura 11 - Vista dos locais das coletas a) Jazida do Conjunto Palmeiras b) Jazida de Alto Alegre.	47
Figura 12 - Amostras de solo coletadas da jazida	48
Figura 13 - Localização da Jazida do Conjunto Palmeiras.....	49
Figura 14 - Localização da jazida de Alto Alegre.	50
Figura 15 - Preparação da amostra para ensaio de granulometria a) amostra para quarteamento b) destorroamento da amostra.....	52
Figura 16 - Ensaio de granulometria a) amostras do solo b) estufa c) lavagem do material grosso após secagem na estufa d) conjunto de peneiras utilizadas.....	53

Figura 17 - Ensaio de sedimentação a) equipamento utilizado b) aparelho dispersor c) bôquer com amostras d) leitura.....	54
Figura 18 - Ensaio de densidade real a) picnômetro com solo b) picnômetro com solo e água c) aquecimento do picnômetro d) picnômetro com solo e cheio de água.....	56
Figura 19 - Ensaio de limite de liquidez a) amostra na concha para início de ensaio b) amostra com ranhura na parte central	58
Figura 20 - Ensaio de limite de plasticidade a) placa de vidro dispolido b) cilindro e solo preparado para ser colocado na capsula	59
Figura 21 - Ensaio de compactação procto normal a) compactação b) preparação da amostra para pesagem	61
Figura 22 - Influência do tipo de material na curva de compactação.....	62
Figura 23 - Ensaio de adensamento a) Prensa devidamente equipada com a célula de adensamento (edômetro) b) corpo de prova moldado e saturado c) diâmetro do anel e pressões utilizadas no ensaio.....	63
Figura 24 - Ensaio de Permeabilidade a) equipamento utilizado para o ensaio b) corpo de prova compactado e devidamente moldado c) adição de pedras porosas no corpo de prova d) cilindro completamente fechado e) cilindro devidamente instalado f) adição de carga hidráulica.....	65
Figura 25 - Caixa bipartida do ensaio de resistência ao cisalhamento direto.....	68
Figura 26 - Ensaio de cisalhamento a) Peneiramento da amostra b) conservação do teor de umidade da amostra c) Moldando o corpo de prova d) Altura do corpo de prova e) Corpo de prova dentro da caixa bipartida f) Prensa de realização do ensaio.....	69
Figura 27 - Amostra 01 com lente de aumento de 10x a) imagem microscópica a luz natural; b) imagem microscópica com nicól cruzado.	84
Figura 28 - Amostra 02 com lente de aumento de 10x a) imagem microscópica a luz natural; b) imagem microscópica com nicól cruzado.	85

Figura 29 - Amostra 01 com lente de aumento de 4x a) imagem microscópica a luz natural; b) imagem microscópica com nicól cruzado	86
Figura 30 - Amostra 02 com lente de aumento de 4x a) imagem microscópica a luz natural; b) imagem microscópica com nicol cruzado.	86
Figura 31 - Seção adotada nas análises de fluxo	88
Figura 32 - Malha de elementos Finitos	89
Figura 33 - Enchimento da Barragem com 7 dias.	92
Figura 34 - Enchimento da Barragem com 35 dias.	92
Figura 35 - Enchimento da Barragem com 63 dias.	92
Figura 36 - Enchimento da Barragem com 210 dias	92
Figura 37 - Enchimento da Barragem com 360 dias.	93
Figura 38 - Enchimento da Barragem com 480 dias.	93
Figura 39 - Enchimento da Barragem com 600 dias.	93
Figura 40 - Enchimento da Barragem com 1080 dias	93
Figura 41 - Condição inicial de poropressões	94
Figura 42 - Análises de fluxo transientes.	95
Figura 43 - Detalhe dos vetores de velocidades do fluxo pelo maciço.	95
Figura 44 - Malha dos possíveis centros e raios dos círculos de ruptura.	96
Figura 45 - Fator de segurança no início do enchimento.	97
Figura 46 - Fator de segurança na última simulação de enchimento.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos solos quanto à granulometria	22
Tabela 2 - Perfis de intemperização.	28
Tabela 3: Tabela com ensaios laboratoriais realizados para análise dos solos.....	51
Tabela 4: Peneiras utilizadas no peneiramento grosso	54
Tabela 5: Peneiras utilizadas no peneiramento fino	55
Tabela 6 : Resultados dos ensaios laboratoriais realizados no solo saprolítico.....	71
Tabela 7 - Limites de Atterberg.....	73
Tabela 8 – Resultados do ensaio de Permeabilidade.....	77
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de Resistência ao cisalhamento direto das Amostras.	82
Tabela 10 – Valores típicos de ϕ	83
Tabela 11 – Porcentagem dos minerais encontrados na análise petrográfica da amostra 01. ...	85
Tabela 12 - Porcentagem dos minerais encontrados na análise petrográfica da amostra 02....	85
Tabela 13 - Porcentagem dos minerais encontrados na análise petrográfica da amostra 01....	86
Tabela 14 - Porcentagem dos minerais encontrados na análise petrográfica da amostra 01....	87
Tabela 15 - Parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade de taludes.	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do solo saprolítico – Amostras 01 e 02.	72
Gráfico 2 - Curva de compactação sem reuso do solo da amostra 01 para a energia de Proctor Normal.	74
Gráfico 3 - Curva de compactação com reuso do solo da amostra 01 para energia de Proctor Normal.	75
Gráfico 4 - Curva de compactação sem reuso do solo amostra 02 para energia de Proctor Normal.	75
Gráfico 5 - Curva de compactação com reuso da amostra 02 com energia de Proctor Normal.	76
Gráfico 6 - Curva de adensamento da amostra 01.	78
Gráfico 7 - Curva de adensamento da amostra 02.	79
Gráfico 8 - Deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante da amostra 01 em estado saturado.	80
Gráfico 9 - Envoltória de ruptura da amostra 01 em estado saturado.	80
Gráfico 12 - Função da permeabilidade pela sucção para o solo compactado.	91
Gráfico 13 – Evolução do fator de segurança com o tempo.	99

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Metodologia	16
1.2	Estrutura da Dissertação.....	17
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	Introdução	18
2.2	Definição e origem dos solos	18
2.3	Classificação dos tipos de solos	20
2.4	Perfil do solo	23
2.5	Solos Tropicais.....	24
2.5.1	Síntese das experiências brasileira e internacional	25
	Fonte: Mori,1983 (Adaptada)	28
2.5.2	Conceituação dos Solos Encontrados em Regiões Tropicais.....	28
2.6	Barragens de Terra	33
2.6.1	Objetivos para a construção de uma barragem	34
2.6.2	Elementos de uma barragem	36
2.6.3	Concepção e processo de construção de uma pequena barragem de terra.....	37
2.6.4	Características Geotécnicas.....	38
2.6.5	Barragens de terra construídas no semiárido	38
2.7	Contexto Geológico	40
2.7.1	Análise Petrográfica das amostras de solos saprolíticos.....	43

2.8	Descrição do Sistema GeoStudio 2007 (SEEP/W, SLOPE/W).....	43
2.9	Ensaio de laboratório.....	44
3	Materiais e Métodos.....	46
3.1	Metodologia.....	46
3.2	Local do estudo.....	46
3.3	Coleta de amostras.....	48
3.4	Ensaio de caracterização.....	50
3.4.1	Ensaio realizado nas amostras de solos.....	50
3.5	Utilização do Sistema GeoStudio 2007 (SEEP/W), (SLOPE/W).....	70
4	Apresentação dos Resultados e Análises.....	71
4.1	Ensaio de caracterização.....	71
4.1.1	Ensaio realizado no solo.....	71
4.2	Ensaio especiais de Laboratório.....	77
4.2.1	Ensaio de permeabilidade.....	77
4.2.2	Ensaio de Adensamento.....	77
4.2.3	Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto Saturado.....	79
4.2.4	Análise Petrográfica dos solos saprolíticos.....	83
5	ANÁLISES NUMÉRICAS.....	88
5.1	Análises de fluxo.....	88
5.1.1	Descrição da geometria do problema.....	88
5.1.2	Propriedades hidráulicas dos materiais.....	89

5.1.3	Condições de contorno.....	91
5.1.4	Condição inicial das poro pressões	93
5.1.5	Simulações Transientes durante o enchimento do reservatório	94
5.2	Análise de estabilidade de taludes	95
5.2.1	Descrição das análises.....	95
5.2.2	Parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade de taludes.....	96
5.2.3	Resultados das Análises de estabilidade durante o enchimento do reservatório.....	97
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
6.1	Conclusões	100
6.2	Recomendações.....	101
7	Referências bibliográficas.....	102

1 INTRODUÇÃO

A elaboração do presente trabalho surgiu da necessidade de se conhecer as propriedades que caracterizam o material utilizado (saprolito) e a importância destas, nas análises de estabilidade e percolação pelo maciço na construção de uma pequena barragem de terra. Acrescenta-se a análise do enchimento do reservatório e o estado transiente devido ao enchimento do reservatório.

Vargas (1978) define saprolito (material utilizado na barragem), como sendo o solo que mantém a estrutura original da rocha-matriz, inclusive veios intrusivos, fissuras, xistosidades e camadas, mas que perdeu totalmente sua consistência, podendo se confundir com uma rocha alterada, esboroando-se completamente pela pressão dos dedos.

Para todos esses estudos é de grande importância conhecer as características dos materiais que vão compor a barragem. Para se ter esse conhecimento deve-se realizar ensaios geotécnicos de laboratório para determinar as propriedades granulométricas, de resistência, de deformabilidade dentre outras propriedades que são determinadas em laboratório.

Aliando o conhecimento das características dos materiais às ferramentas computacionais desenvolvidas e disponíveis para tais estudos, pode-se determinar as características de uma pequena barragem hipotética e prever resultados que se aproximam bem das condições reais de campo.

Assim, esta dissertação tem por objetivo estudar a percolação e estabilidade de uma barragem, durante sua operação via métodos numéricos. O sistema computacional adotado foi o GeoStudio 2007, (SEEP/W, SLOPE/W).

Com a realização deste trabalho pretende-se verificar a utilização de solos saprolíticos como material de vedação e resistência de uma barragem de terra.

1.1 Metodologia

A metodologia adotada para a realização desta pesquisa tem como base a execução das seguintes etapas: escolha do tipo de solo para execução do estudo; coleta de amostras deformadas de solo; realização de ensaios de caracterização; ensaios especiais de

laboratório: adensamento, permeabilidade de carga variável, resistência ao cisalhamento direto em solos saprolíticos; análise de percolação e estabilidade através do programa GeoStudio 2007 e apresentação dos resultados.

A escolha desse tipo de material foi realizada considerando-se a necessidade de se conhecer as propriedades de resistência e de impermeabilização do mesmo na utilização em pequenos barramentos.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação foi estruturada em 6 capítulos. O Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica dos diversos aspectos envolvidos no trabalho. No Capítulo 3 é apresentado os materiais e métodos utilizados nas análises feitas no presente estudo. No Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios. No Capítulo 5, são apresentadas as análises do estudo de percolação e estabilidade em barragens construídas com saprolitos. Finalmente, no Capítulo 6, as conclusões inerentes ao assunto tratado nos capítulos anteriormente descritos, como também as sugestões para pesquisas futuras a serem realizadas em continuidade a este trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Introdução

Neste capítulo será exposto um pouco da história da formação dos solos, a evolução das barragens de terra, características geológicas da cidade onde se localizam as jazidas no qual foram coletadas as amostras e a descrição da utilização do sistema GeoStudio 2007, para análises de fluxo e estabilidade do maciço.

2.2 Definição e origem dos solos

Segundo a ABNT - NBR 6502 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995), os solos são definidos como: "Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica".

Para Teixeira (2000), todos os processos que causam desagregação das rochas, com separação dos grãos minerais antes coesos e com sua fragmentação, transformando a rocha inalterada em material descontínuo e friável, constituem o intemperismo físico.

Segundo este autor, as diversas variações de temperatura ao longo dos dias e das diferentes estações do ano, causam expansão e contração das rochas, levando a sua desfragmentação, esse tipo de intemperismo também ocorre quando as partes mais profundas dos corpos rochosos ascendem aos níveis mais superficiais. Com o alívio de pressão as rochas se expandem, causando a abertura de fraturas paralelas à superfície ao longo da qual a pressão foi aliviada.

De acordo com Teixeira (2000), o principal agente do intemperismo químico é a água da chuva, que infiltra e percola entre as rochas. A partir das variações de temperatura, trincas são abertas nas rochas, por onde água penetra, atacando quimicamente os minerais.

Esse processo submete as rochas a elevadas tensões, provocando a fragmentação dos blocos, gerando rochas menores que dão origem aos solos. A presença da fauna e flora promove o ataque químico, através de hidratação, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, etc.

Para Lima (2013), o intemperismo biológico ocorre através dos seres vivo (plantas ou/e animais) onde estes desempenham de forma direta ou indireta o trabalho muito

importante na intemperização das rochas. Segundo Lima (2013), nesse processo as raízes das árvores penetram nas fissuras e alargam ou trituram as paredes rochosas em busca de sais minerais, além da ação de fraturamento nas raízes elas também liberam ácidos húmicos que irão causar o intemperismo químico. Assim, o intemperismo biológico é uma categoria do intemperismo químico em que as reações químicas que ocorrem nas rochas são propiciadas por seres vivos.

Para Reichet (2007), em seu trabalho sobre “Pedogênese”, “os solos são corpos naturais, ocupando porções na superfície terrestre, suportando plantas e edificações, e verificando-se propriedades resultantes do clima e do relevo da região”. Logo, o solo é a camada mais fina que envolve a terra.

De acordo com a Embrapa (2006), “a unidade básica de estudo da classificação dos solos é o perfil, que constitui a menor porção da superfície da terra, com três dimensões e perfazendo um volume mínimo que possibilite estudar a variabilidade dos atributos, propriedades e características dos horizontes ou camadas do solo”. Já Reichet (2007), trás que “o perfil do solo é representado por uma superfície vertical do solo expondo os horizontes”, ou seja, as camadas mais ou menos horizontais, desde a superfície da terra até o material subjacente, inalterado. “O perfil é usado como base para o estudo dos solos no campo, como a morfologia dos solos, amostragem de material para análises físicas, químicas, biológicas e mineralógicas dos solos”.

No SiBCS (Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, 2009) encontra-se que: “Quando examinados a partir da superfície os solos consistem de seções aproximadamente paralelas - denominadas horizontes ou camadas - que se distinguem do material de origem inicial, como resultado de adições, perdas, translocações e transformações de energia e matéria”. Assim, o solo está dividido em camadas, ou perfis, nos quais podem-se encontrar cada tipo de solos existente na natureza.

Segundo Caputo (1988), a formação de um solo (s) é função da rocha de origem (r), da ação dos organismos vivos (o), do clima (cl), da fisiografia (p) e do tempo (t), podendo-se, então, escrever que:

$$S = f(r, o, cl, p, t)$$

Para Caputo (1988), “a decomposição química é entendida como o processo que envolve a modificação química e mineralógica na rocha de origem”. A água é o principal agente deste processo. Na natureza, verifica-se que é constituído de duas partes; a primeira é formada pela camada mais superficial da terra, constituída por restos de animais e vegetais. Essa camada possui uma coloração escura, formando a parte orgânica do solo conhecida como húmus. Já a segunda camada é composta por areia, silte e argila, e é formada pela parte mineral do solo, juntamente com a água e o ar.

Segundo Ortigão (2007), para a engenharia civil, os solos são um aglomerado de partículas provenientes da decomposição da rocha, que podem ser escavados com facilidade, sem o emprego de explosivos, e que são bastante utilizados como material de construção ou de suporte para estruturas. Ainda de acordo com Ortigão (2007), como material de construção e de fundação, os solos têm grande importância para a construção civil. Nas barragens de terra, nas fundações de estruturas, o solo – assim como o concreto e o aço – está sujeito a esforços que tendem a comprimi-lo e a cisalhá-lo, provocando deformações e podendo, eventualmente, levá-lo à ruptura.

2.3 Classificação dos tipos de solos

Para Santos (2007), em seu trabalho sobre “Composição dos Solos”, os solos são originados de uma rocha matriz através da ação do tempo, das condições de temperatura (clima da região), da ação do vento e da água. Esses fenômenos químicos, fazem com que a rocha se desgaste, formando assim a parte mineral dos solos (areia, calcário e argila). Já a parte orgânica (húmus), surge dos restos de animais e vegetais em decomposição. Os solos são constituídos de partículas que se diferenciam pelo tamanho e pela composição química. A concentração de cada tipo de partícula em um solo depende fundamentalmente da composição química da rocha que lhe deu origem.

Segundo Pinto (2006), “os solos são formados por um conjunto de partículas com água e ar nos espaços intermediários, dessa forma as partículas encontram-se livres para se deslocar. As variações de temperatura provocam trincas nas rochas, por onde a água penetra, atacando quimicamente os minerais”.

Pinto (2006) descreve que, “o objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos,

Tabela 1 – Classificação dos solos quanto à granulometria

Tipo de Solo	Diâmetro dos Grãos (mm)
Argila	Até 0,005
Silte	0,005 a 0,05
Areia fina	0,05 a 0,15
Areia média	0,15 a 0,84
Areia grossa	0,84 a 4,8
pedregulho	4,8 a 16,0

Fonte: ABNT (Rochas e Solos - NBR 6502,1995).

Ainda de acordo com Santos (2007), os minerais das frações silte-arenoso são importantes, pois são uma fonte potencial para o solo. A liberação desses minerais acontece de forma lenta, à medida que o solo evolui os minerais primários se decompõem lentamente liberando os nutrientes contidos nos minerais.

Para Teixeira (2000), os minerais primários são aqueles originados do material originário e mantêm-se praticamente inalterado na sua composição. São derivados das rochas por simples fragmentação, formados em rochas no interior da crosta terrestre sob altas pressões e temperaturas e geralmente são instáveis nas condições reinantes na superfície da Terra. Já os minerais secundários são aqueles sintetizados ou neoformados nas condições ambientais de superfície. Como explica Teixeira (2000), geralmente os minerais secundários formam-se através do intemperismo químico, são sintetizados no próprio solo (in situ) a partir dos produtos da meteorização dos minerais primários menos resistentes ou resultam de alterações de estrutura de certos minerais primários, que ocorrem também in situ ou, ainda, são herdados do material originário. Segundo Santos (2007), os principais minerais contidos nos solos silte-arenosos são o quartzo, feldspatos, anfibólios e piroxênios e as micas. Os minerais da fração argila são geralmente formados a partir da reorganização de elementos originários dos minerais primários. Ainda para Santos (2007), Os principais minerais da fração argila de solo são os filo-silicatos de alumínio e os óxidos de ferro e alumínio.

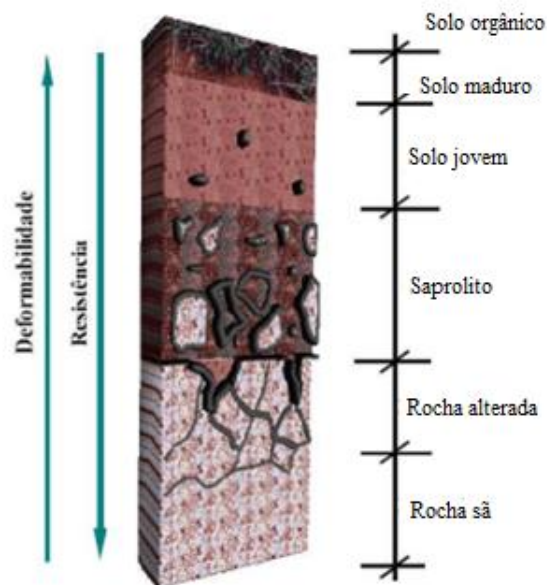
2.4 Perfil do solo

À medida que o material de origem se transforma em solo, ele vai se diferenciando em camadas, mais ou menos paralelas às superfícies, camadas essas que denominamos Horizontes. O conjunto de horizontes, situados em uma seção vertical que vai da superfície até o material originário, é o perfil do solo conforme mostrado na Figura 2.

Os horizontes de um perfil de solo são formados por processos de adição, perdas, transformações translocações devido ao fato de estes processos ocorrerem com intensidade diferente através do regolito, este, sendo todo material inconsolidado ou começando a se decompor, que está sobre a rocha.

Os perfis mostram as características do solo numa direção, ou seja, em profundidade. Se a estas características acrescentamos as que ocorrem nas duas dimensões laterais da área teremos o corpo do solo.

Figura 2 – Perfil de solo saprolítico.



2.5 Solos Tropicais

As características geotécnicas de um solo são determinadas em função do tipo de clima, da topografia, da fauna e do tempo. Nas regiões de clima tropical ocorrem fenômenos como a predominância de altas temperaturas, ausência de congelamento do sub-solo, altos índices pluviométricos, lixiviação, etc. (BARROSO, 2002).

Não existe uma terminologia consagrada para a definição do que são solos tropicais. Há um grande número de bibliografias nacionais e internacionais que procuram definir o que são solos tropicais. Essas definições geram confusões no âmbito técnico-científico, visto que termos iguais podem ser usados para definir materiais diferentes e materiais iguais podem ser denominados por vários nomes diferentes (BARROSO, 2002).

Os solos saprolíticos vêm sendo utilizados na construção de maciços de barragens de terra e núcleos de barragens de enrocamento desde o final da década de cinquenta. Os primeiros relatos de utilização desses solos na construção de barragens foram apresentados nos anais do Congresso Internacional de Grandes Barragens, acontecido no México, em 1976. (MAFRA et al. 2003).

No Brasil, as primeiras experiências com a utilização de saprolitos iniciaram na década de setenta, nas obras de construção de usinas hidrelétricas na Bacia do Alto Paraná. Este horizonte de solos, típico dos climas tropicais, era deixado a um segundo plano, pois ocorrem na natureza, com aspecto heterogêneo, e em geral, com umidade elevada. O preconceito contra a utilização de tais solos era resultante ainda da grande dificuldade de sua caracterização geotécnica por meio dos ensaios rotineiros de laboratório, pois o preparo da amostra (destorroamento, secagem prévia) descaracterizava o saprolito por meio da destruição de sua característica fundamental que é a estrutura herdada da rocha que lhe deu origem. Contribuía ainda para sua não utilização, o desconhecimento das propriedades dos solos residuais, por parte dos Consultores Internacionais que acompanhavam o projeto e a execução das grandes barragens brasileiras. (MAFRA et al. 2003).

Entretanto, a grande quantidade destes solos no Brasil, chamou a atenção para o seu aproveitamento. Diversos estudos foram realizados, e em face de importância econômica

da utilização destes materiais, a ABMS – Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica criou o Comitê Brasileiro de Solos Tropicais, que muito contribuiu para esclarecer as complicações das propriedades dos solos brasileiros, criando uma metodologia nativa para sua caracterização, aplicação e controle de construção de maciços de barragens homogêneas e núcleos de barragens de enrocamento. (MAFRA et al. 2003).

2.5.1 Síntese das experiências brasileira e internacional

As primeiras referências sobre estudos de solos residuais no Brasil remontam ao ano de 1947. Quando em visita ao país, o Prof. Karl Terzaghi, em uma de suas palestras, ressaltou que “estudar e descobrir as intrincadas propriedades dos solos residuais era a tarefa dos engenheiros brasileiros” (CAPUTO, 1976). Foram os escorregamentos de taludes na Serra do Mar que ensejaram os primeiros estudos sistemáticos dos solos residuais brasileiros. Vargas (1953,1969) foi o primeiro autor a descrever o perfil de intemperismo dos solos da região centro sul do Brasil, tendo feito algumas revisões posteriores. No respeitante às barragens de terra, a década de setenta foi profícua para os estudos das propriedades dos saprolitos, tendo em vista a necessidade de conhecimento sobre o comportamento destes solos, tanto como fundação, quanto como material de construção para maciços compactados.

Tais estudos coincidiram com a época de construção das maiores barragens de terra brasileiras, principalmente na região centro sul, na bacia do rio Paraná, onde a ocorrência de solos saprolíticos é generalizada. Assim, apareceram nesta fase os trabalhos de De Mello (1972), Mori et al. (1978), Mori (1979a,1979b, 1983), Bourdeaux (1980), Bourdeaux et al. (1983) e Leme (1981, 1984). Todos estes autores trataram da identificação, ensaios de laboratório para obtenção das propriedades índices e comportamento dos saprolitos oriundos de diversas litologias, aplicados na construção de barragens homogêneas e em núcleos de barragens de enrocamento.

Não obstante tantos estudos sobre os solos saprolíticos, naquela época, qualquer material que não fosse argila coluvionar vermelha, era genericamente chamado de “material não convencional” e sua aplicação na construção de maciços compactados para barragens era encarada com reservas. Tais reservas estavam vinculadas à trabalhabilidade dos materiais. Em

geral, os solos saprolíticos tem elevada umidade “in situ”, em relação à sua umidade ótima de compactação referida ao ensaio de Proctor Normal. Some-se a estes fatos a característica visual “desuniforme uniforme” descrita por Vargas (1964) e interpretada por Mori et al. (1978) como solos “heterogeneamente homogêneos”. Além disso, existia uma grande polêmica com relação aos ensaios de caracterização, tendo em vista que estes ensaios foram originariamente concebidos para solos de natureza sedimentar. No caso dos saprolitos, as estruturas reliquiares oriundas da rocha que lhes deu origem eram destruídas no preparo de amostras para os ensaios, o que introduzia modificações no corpo de prova compactado, não refletindo o real comportamento do material.

Mori (1983) divide a utilização de solos saprolíticos em duas etapas distintas – até meados da década de setenta, quando as explorações das áreas de empréstimo terminavam no topo dos solos saprolíticos, e o período subsequente, no qual os saprolitos compactados são considerados materiais apropriados para a execução de maciços de terra e núcleos de barragens de terra-enrocamento, sempre que utilizados adequadamente.

Um trabalho de grande repercussão internacional, publicado por Deere e Patton (1971), sintetizou o conhecimento existente àquela época, constituindo um relatório do estado da arte sobre os solos residuais. Posteriormente, De Mello (1972) sugeriu o reagrupamento destas subdivisões, em apenas três, assim constituídos: horizonte superior – composto por solo residual maduro, sem vestígios da rocha mãe, tratado como solo de acordo com os preceitos clássicos da Mecânica dos Solos; horizonte intermediário – composto por saprolito, cujo comportamento é de solo, mas que deve levar em consideração as heterogeneidades e descontinuidades impostas pelas estruturas reliquiares; horizonte inferior – constituído por rocha decomposta, nas suas diversas gradações. O material deste horizonte tem comportamento de rocha fraca com descontinuidades igualmente fracas, e é regido pela Mecânica das Rochas.

Mori et al. (1978) também propuseram unificar alguns horizontes na classificação proposta originalmente por Deere e Patton (1971). Tal simplificação facilita a identificação dos materiais e é suficiente para aplicações práticas de engenharia. Assim, a proposição de Mori et al. (1978) distingue três horizontes: Zona I – Solo residual maduro; Zona II –

Saprolito / Rocha muito alterada; Zona III – Rocha pouco alterada, capeando a rocha sã. Nesta classificação, o saprolito constitui a base da Zona I, solo residual maduro, em geral poroso, homogêneo e sem vestígios da estrutura da rocha que lhe deu origem.

No Brasil a primeira experiência de utilização de saprolitos foi à barragem de Capivara (Cruz, 1996), onde foi utilizado como material de aterro o “fundo da caixa de empréstimo”. Seguiu-se com a utilização de saprolitos na construção das barragens e diques de Paraibuna/Paraitinga (saprolito de granito-gnaiss) e do núcleo da barragem e dique de Salto Santiago. A utilização dos saprolitos até então seguiu especificações de tratamento de umidade e compactação de solos coluvionares e residuais maduros, ou seja, com escarificação e destorroamento intenso com grades de disco e controle estrito do teor de umidade.

A mais recente utilização de saprolito na construção de barragens no Brasil foi à construção do núcleo impermeável da barragem de rejeitos da Mina do Sossego. Programada para ser construída em etapas, teve sua primeira etapa concluída entre maio e dezembro de 2002. (MAFRA ET AL. 2003).

O saprolito apresenta a estrutura herdada da rocha mãe, porém com o comportamento essencialmente de solo. Sua estrutura tem variação contínua com a profundidade, transicionando-se gradativamente para rocha muito alterada, até alcançar características de uma rocha pouco alterada, que se apoia no topo da rocha sã. Na Tabela 2 estão resumidas as classificações citadas. Pode-se observar na tabela que as classificações propostas por Vargas (1969) e Mori et al (1978) são muito próximas.

Tabela 2 - Perfis de intemperização.

VARGAS (1953)	VARGAS (1969)	BARATA (1969)	DEERE & PATTON (1971)		DE MELO (1972)	MORI et al. (1978)
Solo residual maduro	Argila porosa ou camada de areia	Solo residual maduro	Solo residu al	Horizonte A	Solo maduro	Solo residual maduro
	Argila composta ou areia argilosa			Horizonte B		
Solo residual jovem	Solo residual jovem	Solo residual jovem	Rocha altera da	Horizonte C (Saprolito)	Solo residual ou saprolito	Saprolito
Camada de rocha desintegrante	Rocha alterada			Rocha muito alterada		
		Rocha fraturada ou fissurada	Rocha parcialmente alterada	Rocha alterada e não alterada	Rocha alterada	
Rocha sã	Rocha sã ou fissurada	Rocha mãe	Rocha não alterada			Rocha sã

Fonte: Mori,1983 (Adaptada)

2.5.2 *Conceituação dos Solos Encontrados em Regiões Tropicais*

Solos são materiais naturais não consolidados, isto é, constituídos de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos, de fácil dispersão em água, e que podem ser escavados com equipamentos comuns de terraplenagem (pá carregadeira, motoescavotransportadora etc.). O solo pode, também, apresentar-se como estrutura natural ou artificial. Terá estrutura artificial quando transportado e/ou compactado mecanicamente, em aterros, barragens de terra, reforços do subleito de pavimentos etc.

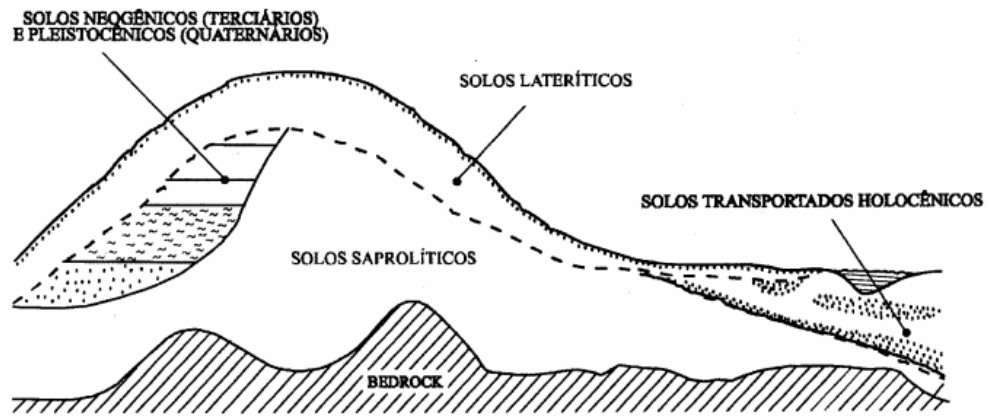
Dentro da classificação dos solos, aqueles que apresentam propriedades peculiares e de comportamento, são denominados de solos tropicais em decorrência da atuação de processo geológico e/ou pedológico típicos das regiões tropicais úmidas. Dentre os solos tropicais destacam-se duas grandes classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos. Os solos lateríticos são solos superficiais, resultantes do surgimento de crostas formadas a partir da concentração de hidróxido de ferro e alumínio. Segundo o Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (atual Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica), o solo pode ser considerado saprolítico se for solo no sentido geotécnico (não precisa de explosivos para ser escavado), além de ser o horizonte de transição entre o solo e a rocha (horizonte C). Há ação de pedogênese, mais ainda encontram-se características da rocha matriz.

Os solos saprolíticos são genuinamente residuais, isto é, derivam de uma rocha matriz, e as partículas que o constituem permanecem no mesmo lugar em que se encontrava em estado pétreo podendo ser confundidos com a própria rocha. As características mecânicas da rocha original se modificam, mas a aparência visual falhas, folheações, intrusões, xistosidades, descontinuidades e veios de outros materiais, são preservados.

Os solos residuais jovens constituem, portanto, a parte subjacente à camada de solo superficial laterítico (ou, eventualmente, de outro tipo de solo) aparecendo, na superfície do terreno, somente por causa de obras executadas pelo homem ou erosões. Estes solos são mais heterogêneos e constituídos por uma mineralogia complexa contendo minerais ainda em fase de decomposição. São designados também de solos residuais jovens, em contraste com os solos superficiais lateríticos, maduros.

Encontram-se os seguintes solos nas regiões tropicais: lateríticos, saprolíticos e transportados. Um perfil esquemático da ocorrência desses solos pode ser visto na Figura 3 conforme Vargas, (1978).

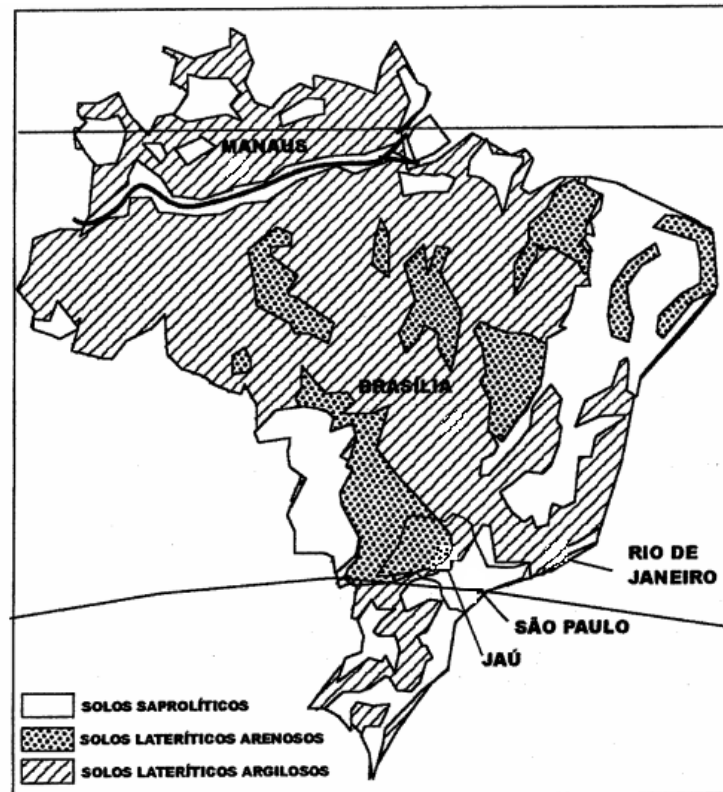
Figura 3 - Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical.



Fonte: Vargas, 1978.

Uma feição muito comum no horizonte superficial, ou no seu limite, é a presença de uma linha de seixos de espessuras variáveis (desde alguns centímetros até 1,5 m), delimitando o horizonte laterítico do saprolítico. A figura 4 ilustra a ocorrência de solos lateríticos e saprolíticos no território brasileiro.

Figura 4 - Ocorrência de solos saprolíticos no território brasileiro.



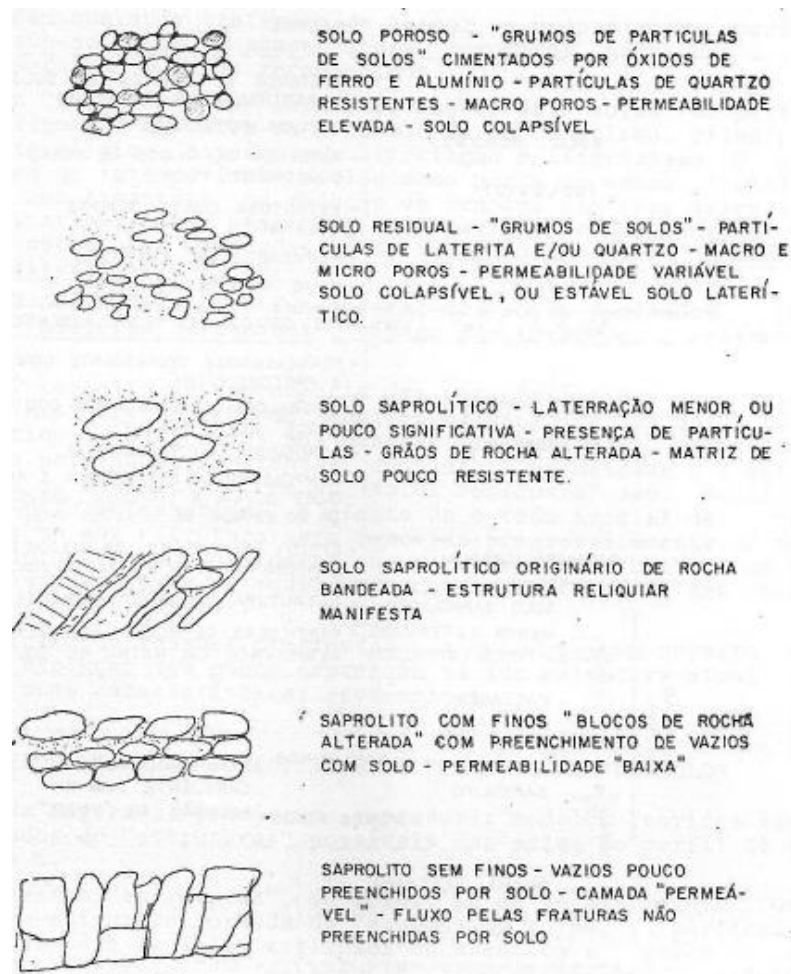
Fonte: Nogami et al, 2000.

Os solos tropicais diferem dos solos temperados devido a seu processo de intemperismo. Nos trópicos, o intemperismo químico das rochas predomina sobre o intemperismo físico. A alta pluviosidade, altas temperaturas e águas ácidas devidas à decomposição de compostos orgânicos que infiltram no solo favorecem as reações químicas que alteram os minerais, o que caracteriza o intemperismo químico (SOARES, 2001).

O início do processo de intemperização da rocha ocorre devido à micro fissuração seguido de dissolução e redistribuição dos materiais. Isto caracteriza uma perda de resistência ou rigidez, mudança de cor, textura, consistência, forma e volume. As alterações ao longo do perfil saprolítico não se dão de forma homogênea, uma vez que se propagam a partir das discontinuidades e fraturas, por onde a água infiltra, conforme Figura 5. (SOARES, 2011).

Os solos saprolíticos se localizam, geralmente, entre uma camada de solo laterítico e a rocha matriz, apresentando grandes espessuras, coloração diversificada, textura variável, veios, diáclases e fraturas conforme a rocha de origem (SOARES, 2011).

Figura 5 - Modelos de macroestrutura de solos saprolíticos em diferentes graus de evolução (crescente de baixo para cima).



Fonte: Cruz, 1987.

2.6 Barragens de Terra

Uma barragem consiste em uma intervenção do homem na natureza com o objetivo de adaptar os padrões das vazões naturais dos rios, aos padrões demandados pela sociedade (CAMPOS, 1996).

As barragens de terra e enrocamento têm sido construídas desde remota antiguidade. Cerca de 4.000 anos A.C. se tem conhecimento da sua construção, como por exemplo, a barragem Saad el Kafara construída 3.000 anos A.C. próxima a cidade do Cairo no Egito. Mesmo assim, apenas no final do século 19, as barragens de terra passaram a ter a configuração semelhante às construídas atualmente (SANDRONI, 1989).

Conforme Massad (2003) relata as barragens de terra eram “homogêneas”, com o material transportado manualmente e compactado por pisoteamento, por animais ou homens. Em 1820, consta que Telford introduziu o uso de núcleos de argila para garantir a estanqueidade das barragens. Já o uso de enrocamento na construção de barragens iniciou-se, provavelmente, com os mineiros da Califórnia, numa barragem em Serra Nevada construída no Século XIX, na década de 50. Era o período de mineração do ouro. Naquela região havia rocha em abundância, carência de material terroso e os mineradores estavam habituados ao uso de explosivos. A associação destes e de outros fatores viabilizou a construção da primeira barragem de enrocamento.

Os blocos de rocha eram simplesmente empilhados, sem nenhuma compactação. Em consequência deste procedimento, muitas barragens sofreram recalques bruscos, após o seu primeiro enchimento. Estes recalques eram associados à quebra da rocha nos pontos de contato devido à perda de resistência proporcionada pela saturação ou umedecimento (ALMEIDA, 2010).

Com o advento de ensaios com amostras de grandes dimensões, já na década de 60, foi possível estudar mais profundamente o comportamento mecânico dos enrocamentos.

Nesse período, foi introduzida a técnica de compactação com vibração e molhagem, obtendo-se um entrosamento maior entre as rochas (ALMEIDA, 2010).

Segundo Vargas (1977), as primeiras barragens de terra brasileiras foram construídas no Nordeste, no início do Século XX, dentro do plano de obras de combate à seca, e foram projetadas tendo como base o empirismo. A barragem de Curema, erguida na Paraíba em 1938, contava com os novos conhecimentos da Mecânica dos Solos. Mas somente em 1947, com a barragem do Vigário, atual Barragem Terzaghi, localizada no estado do Rio de Janeiro é que se inaugurou o uso da moderna técnica de projeto e construção de barragens de terra no Brasil. Foi também um marco, pois pela primeira vez Terzaghi empregou o filtro vertical ou chaminé como elemento de drenagem interna de barragens de terra.

As barragens de terra normalmente se prestam para qualquer tipo de fundação, desde a rocha compacta, até terrenos construídos de materiais inconsolidados. Existe uma certa variabilidade no tipo de barragem de terra, que poderá ser homogêneo ou zonado.

a) Homogêneo - é aquele composto de uma única espécie de material, excluindo-se a proteção dos taludes. Nesse caso, o material necessita ser suficientemente impermeável, para formar uma barreira adequada contra a água, e os taludes precisam ser relativamente suaves, para uma estabilidade adequada.

b) Zonado - esse tipo é representado por um núcleo central impermeável, envolvido por zonas de materiais consideravelmente mais permeáveis, zonas essas que suportam e protegem o núcleo. As zonas permeáveis consistem de areia, cascalho ou fragmentos de rocha, ou uma mistura desses materiais. Também existem barragens zonadas que em vez de possuírem um núcleo central são constituídas por um talude a montante de material impermeável e um talude a jusante de material permeável com funções estruturais. É importante a existência de um filtro fazendo a fronteira entre o material impermeável e o talude de jusante para evitar fenômenos de erosão interna provocados por forças de percolação que tendem a arrastar os filtros.

2.6.1 Objetivos para a construção de uma barragem

De acordo com Stephens (2011), os objetivos que regem a construção de uma barragem são vários e os principais se resumem em:

- a) aproveitamento hidrelétrico
- b) regularização das vazões do curso d'água para fins de navegação
- c) abastecimento doméstico e industrial de água
- d) controle de inundações
- e) irrigação.

As principais vantagens envolvidas na construção de pequenas barragens de terra são:

- São utilizados materiais naturais locais.
- Os procedimentos do projeto são simples.
- Comparativamente, são necessários pequenos ativos fixos tangíveis.
- Os requisitos para as fundações são menos exigentes do que para outro tipo de barragens. A base larga duma barragem de terra distribui a carga nas fundações.
- Barragens de terra resistem ao assentamento e movimentos melhor do que estruturas mais rígidas e podem ser mais adequadas para áreas onde os movimentos do solo são comuns.

No entanto, também existem desvantagens e estas são:

- Uma barragem de terra é mais fácil de ser danificada ou destruída pela água corrente, passando sobre ou batendo contra ela. Assim, um descarregador/vertedor e proteção adequada à montante são essenciais para qualquer barragem.
- Projetar e construir descarregadores/vertedores adequados é normalmente a parte tecnicamente mais difícil de qualquer trabalho de construção duma barragem..

- As barragens de terra requerem manutenção contínua de forma a evitar erosão, crescimento de árvores, sedimentação, infiltração e danos provocados por insetos e animais.

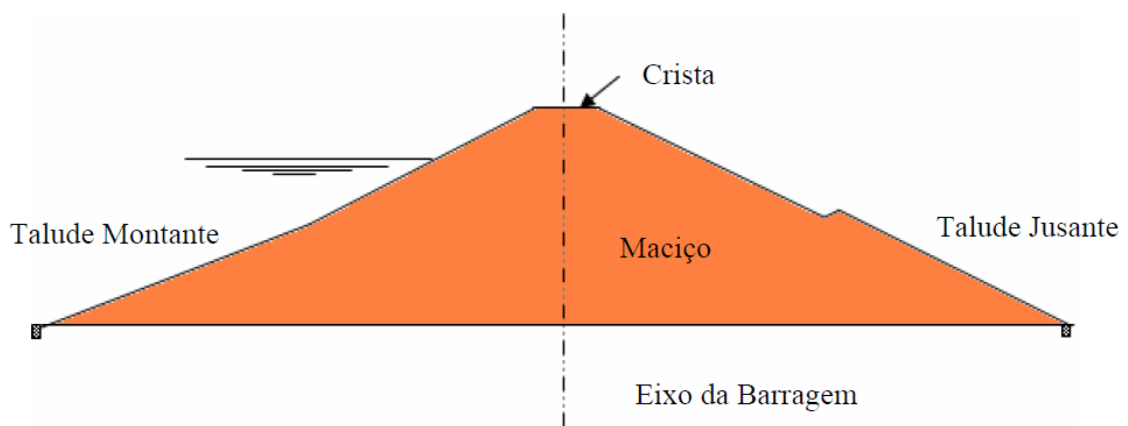
2.6.2 Elementos de uma barragem

O formato de uma barragem de terra é basicamente de um trapézio construído, geralmente, em um vale para a formação de um reservatório (DNOCS, 1981).

As definições expostas a seguir tem a finalidade apenas de orientar e auxiliar a compreensão da importância da geologia, nos trabalhos de construção de barragens.

São os seguintes os principais elementos de uma barragem de terra, os quais são apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Principais elementos de uma barragem homogênea.



Fonte: Carvalho, 2011.

Outros elementos encontrados no conjunto de obras que compõem uma barragem são:

- Maciço: corresponde ao corpo da barragem.

- **Crista:** topo da barragem. Utilizado normalmente para tráfego sobre a barragem, inclusive de veículos.

- **Taludes (Montante e Jusante):** é um termo genérico, compreendendo qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou ambos (FIORI, 2001). São as regiões que sofrem as maiores solicitações de tensão. A inclinação dessas áreas requer um estudo de estabilidade a fim de verificar se a inclinação escolhida é a mais segura para o solo utilizado. Normalmente os taludes são protegidos da ação de chuvas e outros fatores naturais. Os taludes de montante recebem a cobertura de materiais grosseiros como bota-foras de escavações de rochas de fundação (U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1995). Os taludes de jusante recebem a cobertura de gramas.

2.6.3 Concepção e processo de construção de uma pequena barragem de terra

O sucesso na construção de uma barragem de terra requer planejamento, a definição do local de construção, projeto e manutenção. A elaboração do projeto envolve o desenvolvimento de alguns dos seguintes trabalhos (VIEIRA, 1996):

- Estudos Topográficos
- Estudos Hidrológicos
- Estudos Geotécnicos
- Outros Estudos

No estudo topográfico é definido o local da barragem. A capacidade de acumulação é o fator mais importante (U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1995). A definição leva em conta que a barragem deve possuir o menor volume possível em corpo e acumular o maior volume de água.

Definido o local, serão gerados a planta da bacia hidrográfica, a planta da bacia hidráulica, diagrama indicando as áreas cobertas pela água, planta do local da barragem e o perfil longitudinal ao longo do eixo da barragem.

No estudo Hidrológico é definida a capacidade do reservatório. É essencial que a bacia hidrográfica tenha competência para alimentar a bacia hidráulica. Do contrário a barragem ficará superdimensionada com custo sem retorno. Também não convém o caso inverso de barragem subdimensionada, ou seja, que a barragem encha em uma fração de ano hidrológico o que significa que a bacia não foi suficientemente aproveitada.

Ainda nesse estudo é calculada a cheia máxima do reservatório utilizando um retrospecto de 100 anos passados (GAIOTO, 1999).

Nos estudos geotécnicos fornecem informações básicas no projeto e construção de uma barragem. Através deles identificamos o local da barragem, tomada de água, o local do vertedouro e a ocorrência dos materiais de construção (VIEIRA, 1996).

2.6.4 Características Geotécnicas

Do ponto de vista teórico, um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de força distintos: forças devidas ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento (FIORI, 2001). A estabilidade do talude de uma barragem de terra deve levar em conta o equilíbrio dessas três forças.

Dependendo-se da definição de taludes que na estabilidade dos mesmos intervêm condicionantes relativos à natureza dos materiais constituintes e dos agentes perturbadores, quer sejam de natureza geológica, antrópica ou geotécnica. O estudo da estabilidade é bastante importante, haja vista os numerosos acidentes ocorridos, em todas as épocas e em todas as partes do mundo, não raramente, com perdas de vidas humanas (FIORI, 2001).

Uma barragem deve apresentar propriedades em seus materiais que possibilitem a formação de um maciço que tenha estabilidade suficiente para definir a formação do lago (ICOLD, 1999). O maciço, entretanto, é compressível e o aterro tem espessuras diferenciadas. Isto pode promover a formação de trincas. Estas fissuras, entretanto não deve comprometer a integridade da barragem.

2.6.5 Barragens de terra construídas no semiárido

As regiões semi-áridas são caracterizadas de modo geral, pela aridez do clima, pela deficiência hídrica com imprevisibilidade das precipitações pluviométricas e pela presença de solos pobres em matéria orgânica. O prolongado período seco anual eleva a temperatura local caracterizando a aridez sazonal. Na América do Sul, existem três espaços caracterizados pela semi-aridez. A área de domínio do Semi-árido brasileiro é, segundo Ab'Sáber (2003), a mais homogênea delas do ponto de vista fisiográfico, ecológico e social.

O Nordeste é uma região geográfica com uma área territorial absoluta de mais de 1.500.000 km², correspondendo a quase 20% da superfície territorial brasileira. O semiárido nordestino é uma sub-região definida por uma característica climática comum: secas periódicas e precipitações pluviométricas concentradas.

A disponibilidade e usos da água no semiárido continuam a ser uma questão crucial no que concerne ao seu desenvolvimento. É fato que grandes esforços vêm sendo empreendidos com o objetivo de implantar infraestruturas capazes de disponibilizar água suficiente para garantir o abastecimento humano e animal e viabilizar a irrigação.

Todavia, esses esforços ainda são, de forma global, insuficientes para resolver os problemas decorrentes da escassez de água, o que faz com que as populações continuem vulneráveis à ocorrência de secas, especialmente quando se trata do uso difuso da água no meio rural. De qualquer modo, a ampliação e o fortalecimento da infraestrutura hídrica, com uma gestão adequada, constituem requisitos essenciais para a solução do problema, servindo como elemento básico para minimizar o êxodo rural e promover a interiorização do desenvolvimento.

Com a construção dessa infraestrutura, as barragens são as maiores obras para reservar grandes quantidades de água. De porte maior que os açudes, são construídas em leito de rio ou riacho. Por serem caras, quase sempre o financiamento vem do governo e quando se fala na açudagem nordestina, estão incluídas as grandes barragens.

A função das barragens difere de uma região para outra, sendo isso uma dependência do tipo de necessidade e do potencial natural da área. A construção de barragens no nordeste brasileiro tem sido amplamente utilizada para o abastecimento humano e para o desenvolvimento da produção econômica, especialmente a agrícola. Em paralelo, as barragens nessas áreas também controlam as inundações, frequentemente observadas nessas regiões, haja vista o regime concentrado de precipitações e o elevado escoamento proporcionado pela predominância do cristalino.

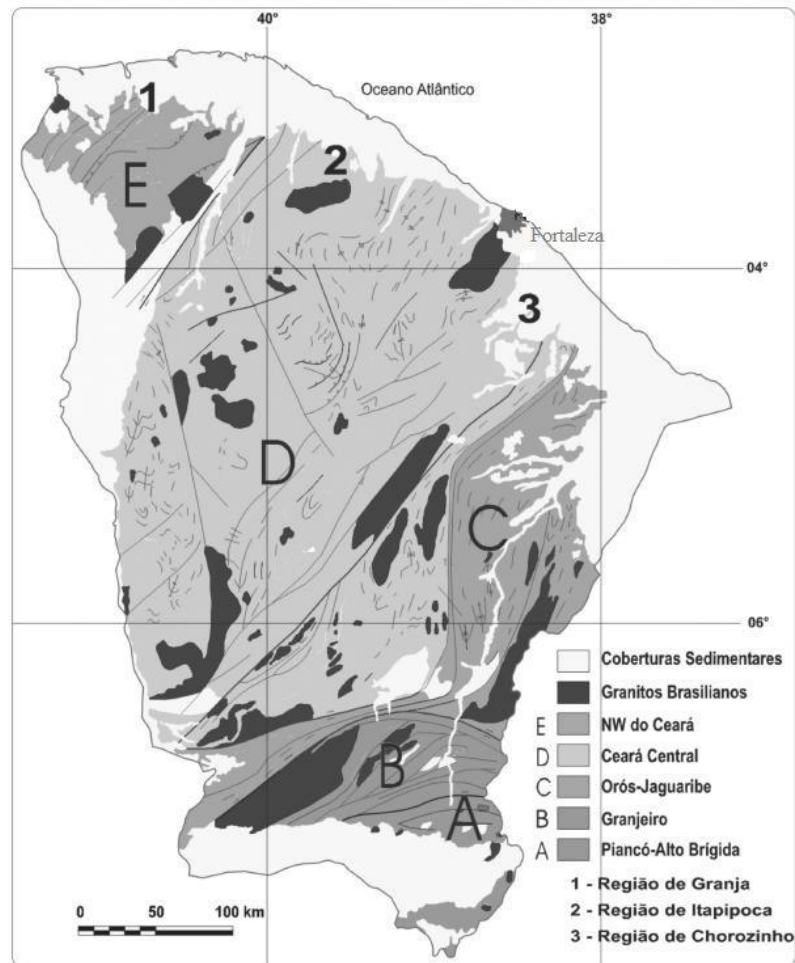
2.7 Contexto Geológico

O estudo da geologia associado a outras ciências torna-se preponderante para a explicação da formação dos solos. Sabe-se que um mesmo tipo de rocha, submetido a diferentes condições climáticas, pode originar solos diferentes e rochas diferentes, quando sujeitas às mesmas condições climáticas, podem originar solos idênticos. (BARROSO, 2002).

A cidade de Fortaleza está inserida no contexto geotectônico da Região de Dobramentos Nordeste ou Província Borborema (ALMEIDA *et al.*, 1977). Esta província é subdividida em quatro principais domínios que são limitados por grandes zonas de cisalhamentos transcorrentes, que são: Domínio Médio Coreaú, Domínio Setentrional (Ceará Central), Domínio Transversal e Domínio Sul. É caracterizada por apresentar uma unidade do Pré-Cambriano não Diferenciado (Complexo Tamboril-Santa Quitéria); uma unidade do Proterozóico Inferior, uma unidade do Terciário (Grupo Barreira Indiviso) e uma unidade Quaternária (Sedimentos Aluviais e Coluviais). Especificamente, o Município de Fortaleza encontra-se inserida no Domínio Ceará Central, e está recoberta por sedimentos da Província costeira.

Arthaud *et al.* (1998), subdividiu a Província Borborema Setentrional em cinco domínios principais, levando em consideração, também, a presença de grandes zonas de cisalhamentos transcorrentes como fator limitante, estes domínios são: Pianco-Alto Brígida, Granjeiro, Orós-Jaguaribe, Ceará Central e Noroeste do Ceará, (Figura 7).

Figura 7 - Principais Domínios dos Terrenos Pré-Cambrianos do Estado do Ceará.



Fonte: Arthaud *et al.*, 1998.

Segundo Brito Neves (1975), a Província Borborema Setentrional trata-se de uma ampla região de dobramentos por vezes limitada por maciços medianos, cercados por faixas de dobramentos laterais, zonas geoanticlinais ou geofraturas, forma, extensão, sedimentação, estrutura e metamorfismo.

Conforme dados do IPLANCE (1997), a geologia do Estado do Ceará está dividida em rochas cristalinas e sedimentares. As rochas cristalinas ocupam uma área que corresponde a 111.604 km², representando 75,4 % do Estado. Já as rochas sedimentares ocupam uma menor área, equivalente a 36.412 km², totalizando 24,6 % do Estado.

O Município de Fortaleza é caracterizado geologicamente por uma grande área ocupada, na sua quase totalidade, pela presença de rochas cristalinas (metamórficas e ígneas), rochas sedimentares de idade terciária e sedimentos recentes residuais, desenvolvidos a partir de uma sedimentação terrígena oriunda de rochas do Embasamento Cristalino. A unidade representativa do período Terciário na área é composta por rochas da Formação Barreiras. As unidades sedimentares que compõem o período Quaternário estão representadas pelas Coberturas Colúvio-eluviais, Paleodunas, Dunas móveis e os Depósitos Flúvio-aluvionares ou de Mangue, que se encontram expostos na região, em camadas e lentes de sedimentos siliciclásticos, pouco consolidados, retrabalhados pela ação de águas superficiais e subterrâneas, denominada litoestratigraficamente por Braga *et al.* (1977).

As rochas da Formação Barreiras distribuem-se de forma irregular na área de estudo, configurando manchas ou “ilhas” que se assentam diretamente sobre os terrenos cristalinos. Esses depósitos são resultantes do intemperismo *in situ* ou com pequeno deslocamento gravitacional. As coberturas residuais jovens são formadas a partir da profunda decomposição e lixiviação das rochas do embasamento, sendo caracterizadas por um material areno-siltoso, alaranjado e/ou avermelhado, de granulação média a grossa, inconsolidado, com horizonte laterizado na base e, muitas vezes, conservando resquícios de estruturas gnáissicas e fragmentos de veios de quartzo, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Coberturas residuais jovens na área de pesquisa



2.7.1 Análise Petrográfica das amostras de solos saprolíticos

A análise petrográfica fundamenta-se na observação de seções delgadas dos solos com espessura de 30 μ m ao microscópio óptico de luz transmitida.

É uma ferramenta muito útil para análise dos dados tecnológicos, podendo esclarecer os diferentes comportamentos das propriedades físicas e/ou mecânicas de rochas e solos aparentemente semelhantes.

O objetivo geral da realização desta análise foi classificar petrograficamente as rochas que originaram esses tipos de solos . Buscou-se com isto obter informações que possam ajudar na interpretação dos resultados dos ensaios geotécnicos de laboratório, principalmente no que diz respeito aos mecanismos responsáveis pelo comportamento dos solos saprolíticos estudados.

2.8 Descrição do Sistema GeoStudio 2007 (SEEP/W, SLOPE/W)

O SLOPE/W utiliza-se o método de Morgenstern-Price no cálculo do fator de segurança. Apresentado em 1965, este método é um dos mais rigorosos de análises de estabilidade, pois, admite-se uma superfície de ruptura qualquer (circular ou não circular) além de satisfazer todas as condições de equilíbrio estático.

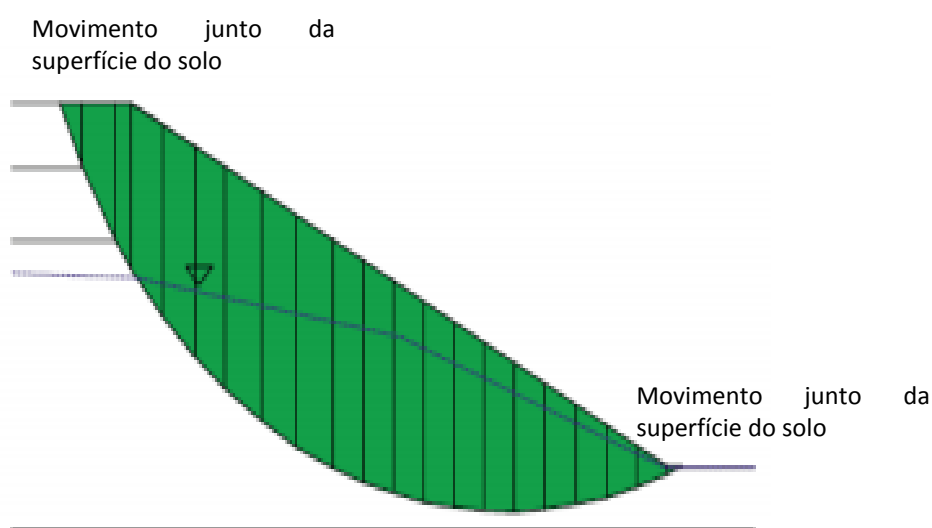
O sistema é também uma aplicação do método das fatias, no qual uma massa potencialmente instável é dividida. As condições de estabilidade satisfazem simultaneamente todas as condições de equilíbrio de forças e de momentos.

Este programa calcula o coeficiente de segurança para a superfície crítica de ruptura pesquisada automaticamente. Os dados de entrada são: a geometria completa da seção num sistema de coordenadas, os valores de coesão e ângulo de atrito do material, peso específico dos materiais, e condições de poro-pressão.

Além do calculo tradicional, o software também utiliza uma sub-rotina de “otimização” da superfície potencial de ruptura. Esta otimização conforme Figura 9 é realizada sobre a superfície de ruptura de menor coeficiente de segurança. A superfície é

subdividida em segmentos, e por um processo iterativo, os segmentos sofrem alterações angulares por meio de um procedimento estatístico baseado no método de Monte Carlo de forma que o coeficiente de segurança é recalculado. Este procedimento é realizado inúmeras vezes até adquirir uma configuração de uma superfície de ruptura de forma qualquer (não circular) e com menor coeficiente de segurança.

Figura 9 - Método de Otimização.



Fonte: Geostudio, 2007.

2.9 Ensaios de laboratório

Os ensaios laboratoriais de caracterização mecânica dos solos constituem uma das componentes de grande relevância na engenharia geotécnica. Na prática corrente, devido à dificuldade em obter amostras *indeformadas* de elevada qualidade, é habitual considerar-se que os ensaios laboratoriais são menos adequados quando comparados com os ensaios de campo. Outra forte razão, para o recurso menos frequente aos ensaios laboratoriais, prende-se com a demora dos ensaios, muitas vezes não compatível com o ritmo de avanço das obras.

A caracterização geotécnica consiste na determinação dos índices físicos, limites de Atterberg e granulometria dos solos saprolíticos estudados, propriedades básicas utilizadas

na identificação, descrição e classificação dos solos. Os procedimentos utilizados na sua determinação constituem práticas usuais em laboratórios de mecânica dos solos e encontram-se normalizados. Sua importância reside no fato de que estas propriedades refletem a composição dos solos e por isso podem estar relacionadas às suas propriedades mecânicas, permitindo assim uma avaliação qualitativa preliminar do comportamento desses materiais. (RIGO, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

A metodologia adotada para a realização desta pesquisa tem como base a execução das seguintes etapas:

- a) Coleta de amostras deformadas de solo;
- b) Realização de ensaios de caracterização em solos;
- c) Utilização do Sistema GeoStudio 2007 (SEEP/W, SLOPE/W);
- d) Apresentação dos resultados;
- e) Análise dos resultados.

A escolha do local do presente estudo foi o tipo de solo (saprolito) e a facilidade com que se pôde coletá-lo, já que, esse tipo de material encontra-se a uma pequena profundidade proporcionando a sua coleta sem muitos esforços.

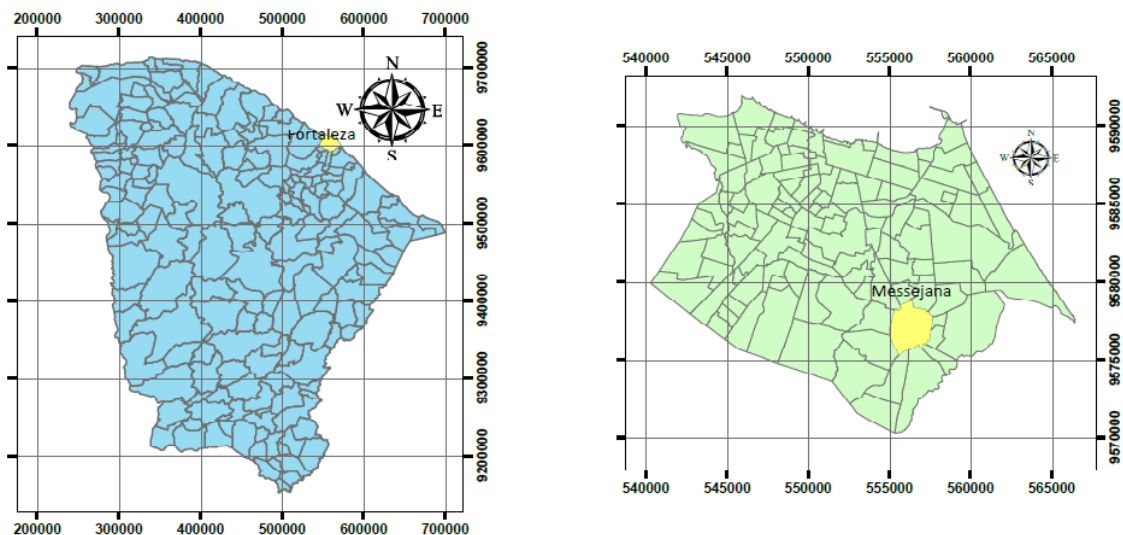
Essa coleta das amostras deformadas foi realizada para a execução de ensaios laboratoriais. A apresentação e as análises dos resultados dos mencionados ensaios serão abordadas no capítulo seguinte desta pesquisa.

3.2 Local do estudo

A seleção das áreas ocorreu devido à necessidade de se avaliar e comparar esse tipo de material (saprolito) para a construção de pequenos barramentos.

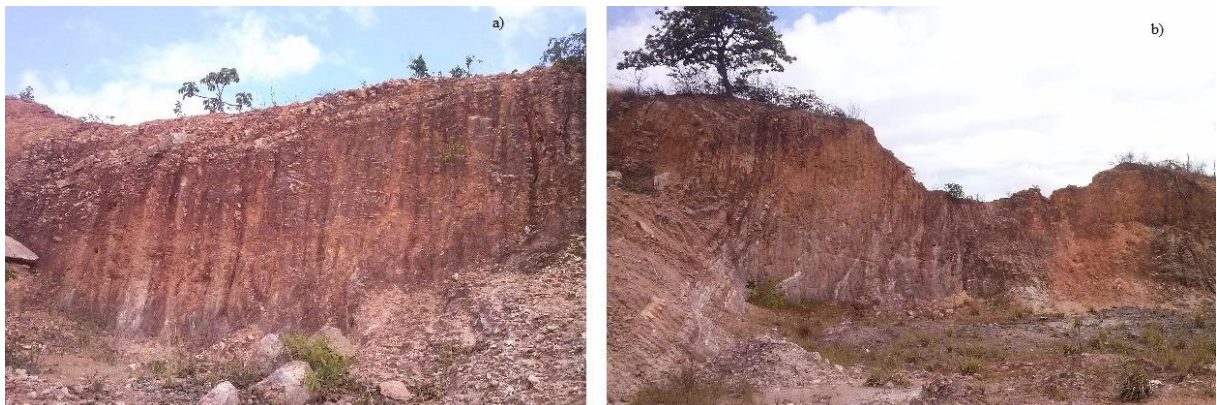
A jazida do Conjunto Palmeiras situa-se à margem esquerda aproximadamente 1,5 km da BR-116 em Messejana/CE, distando 15 km de Fortaleza pela BR- 116. Já a Jazida de Alto Alegre se distancia de Fortaleza em aproximadamente 12 km também pela BR- 116. A Figura 10 mostra a localização da área de pesquisa no contexto estadual e municipal, respectivamente, e a Figura 11 mostra a localização do local de coleta.

Figura 10 - Localização da área de pesquisa no contexto estadual e municipal, respectivamente.



Fonte: Autor, 2014.

Figura 11 - Vista dos locais das coletas a) Jazida do Conjunto Palmeiras b) Jazida de Alto Alegre.



Fonte: Autor, 2014

3.3 Coleta de amostras

As amostras de solo (Figura 12) foram coletadas através de picareta e pá. Os pontos de coletas das amostras estão sendo mostrados nas Figura 13 e Figura 14, onde representam as jazidas: Conjunto Palmeiras e Alto Alegre, respectivamente.

Figura 12 - Amostras de solo coletadas da jazida



Fonte: Autor, 2014

Após a coleta as amostras foram embaladas em sacos plásticos e levadas para o laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará. Vale observar que todos os procedimentos executados seguiram rigorosamente as recomendações pertinentes na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

Figura 13 - Localização da Jazida do Conjunto Palmeiras



Legenda

● Coleta de Amostra

Fonte: Autor, 2014.

Figura 14 - Localização da jazida de Alto Alegre.



Fonte: Autor, 2014.

3.4 Ensaios de caracterização

3.4.1 Ensaios realizados nas amostras de solos

Os ensaios de laboratório realizados nos solos foram os seguintes: granulometria, sedimentação, massa específica, limites de consistência, compactação, adensamento, permeabilidade e resistência ao cisalhamento direto. Vale destacar que todos os ensaios seguem as recomendações das normas da ABNT, DNER e NBR. A Tabela 3 mostra as normas tomadas como referência para execução dos ensaios.

Tabela 3: Tabela com ensaios laboratoriais realizados para análise dos solos.

Ensaio		Norma ABNT	Ano
Granulometria		7181	1984
Determinação da Massa Específica		6508	1984
Limites de Consistência	Liquidez	6459	1984
	Plasticidade	7180	1984
Compactação Procto Normal		7182	1984
Adensamento		NBR MB 3336	1990
Permeabilidade		NBR 14545	2000
Resistência ao cisalhamento direto		-	-

Fonte: Autor, 2014

3.4.1.1 Ensaio de Granulometria

A análise granulométrica consiste na determinação dos diâmetros das diversas partículas existentes no solo.

A forma mais direta de obter o diâmetro dos grãos é passando-os através de uma série de peneiras, com aberturas conhecidas. Esse procedimento permite conhecer os diâmetros dos grãos superiores a 0,075 mm, que é a menor abertura de peneira disponível. Para os grãos inferiores a essa dimensão, utiliza-se o processo de sedimentação. Esse método baseia-se no princípio de que, dispersando-se as partículas de solo em água, a velocidade de sedimentação dos grãos aumenta com o diâmetro dos mesmos (Lei de Stokes).

O ensaio de granulometria realizado determinou as porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da fase sólida dos solos seguindo a ABNT (1984). Para a

realização deste ensaio foi destorroado todo o solo coletado e após realizou-se o quartejamento do mesmo. Após a etapa de quartejamento foi separado 4kg de solo para o peneiramento na peneira de 2,0 mm (n° 10) como mostra a figura 15.

Figura 15 - Preparação da amostra para ensaio de granulometria a) amostra para quartejamento b) destorroamento da amostra



Fonte: Autor, 2014

Após a lavagem e secagem em estufa do solo retido na peneira de 2,0 mm, foi realizado o peneiramento grosso. Já com o material que passou foi realizado o peneiramento fino. Dessa forma, do solo que passou retirou-se cerca de 100 g para determinação da umidade e 120 g para a sedimentação. A Figura 16 ilustra a execução da granulometria por peneiramento.

Figura 16 - Ensaio de granulometria a) amostras do solo b) estufa c) lavagem do material grosso após secagem na estufa d) conjunto de peneiras utilizadas



Fonte: Autor, 2014

O teor de umidade foi determinado medindo-se o peso da amostra antes e depois de sua secagem em estufa a 105/110°C de temperatura.

No ensaio de sedimentação foi realizado transferindo-se o solo selecionado para um béquer e adicionando-se 125 cm³ de solução de hexametáfosfato de sódio. O béquer foi agitado até todo o material ficar imerso, depois o material foi transferido para o copo dispersor durante 15 minutos. Em seguida, transferiu-se a dispersão para a proveta adicionando água destilada até completar o volume de 1.000 cm³ e agitou-se para manter as partículas em suspensão. Após, foi colocado à proveta sobre a mesa e anotado a hora exata do início da sedimentação. Esse procedimento foi feito até a leitura ficar estável. A Figura 17 ilustra a execução do ensaio de sedimentação.

Figura 17 - Ensaio de sedimentação a) equipamento utilizado b) aparelho dispersor c) bôquer com amostras d) leitura



Fonte: Autor, 2014

Para o peneiramento grosso passou-se a amostra do solo selecionado por uma série de peneiras de malhas quadradas de dimensões padronizadas (Tabela 4), anotando-se as massas acumuladas em cada uma das peneiras utilizadas.

Tabela 4: Peneiras utilizadas no peneiramento grosso

PENEIRAS	
POLEGADAS/N°	Mm
2"	50,8
1 1/2"	38,1
1"	25,4
3/4"	19,1
1/2"	12,27
3/8"	9,52
N° 4	4,76
N° 10	2

Fonte: Autor, 2014

O peneiramento fino foi realizado lavando-se na peneira de 0,075 mm (n° 200) o material passado na peneira de 2,0 mm. Após a lavagem o solo foi secado em estufa e passado em um conjunto de peneiras (Tabela 5). Onde se anota as massas acumuladas em cada peneira.

Tabela 5: Peneiras utilizadas no peneiramento fino

PENEIRAS	
N°	Mm
N° 16	1,19
N° 30	0,59
N° 40	0,42
N° 50	0,297
N° 100	0,149
N° 200	0,075

Fonte: Autor, 2014

3.4.1.2 Ensaio de Densidade Real dos Grãos de Solo

O peso específico real dos grãos (γ_g) consiste na relação entre o peso e o volume de uma partícula individual de solo. Ou seja, no seu cálculo desconsideram-se completamente os vazios existentes no solo. Por esse motivo, γ_g recebe o adjetivo "real". Pode-se definir o peso específico real dos grãos com a seguinte expressão:

$$\gamma_g = \frac{P_s}{V_s} \quad (1)$$

sendo P_s o peso seco e V_s o volume dos grãos.

Para a obtenção de peso específico real dos grãos, é necessário conhecer o volume ocupado pelos mesmos. No laboratório, isso se torna possível com base no princípio de que um corpo imerso em água desloca certo volume de líquido. Esse volume é obtido indiretamente, através de uma relação com o peso da água deslocada. A execução do ensaio exige o uso de recipientes com volume conhecido (picnômetros).

O ensaio para determinação da densidade real dos grãos de solo foi realizado utilizando-se cinco picnômetros que foram devidamente pesados no estado seco. Do material que passou na peneira de 2 mm, retirou-se 10 g de solo que foi colocado em cada picnômetro e, em seguida, pesado. Após adicionar água destilada até cerca da metade dos volumes dos picnômetros, os mesmos foram submetidos a um aquecimento até cerca de 30min. Posteriormente, os picnômetros ficaram em repouso até que a temperatura ficasse equilibrada com a do ambiente. Em seguida, foi colocada água destilada até a base do menisco e fez-se a pesagem do conjunto (picnômetro + água + solo) anotando o peso. Depois de lavado adicionou-se água destilada até o seu preenchimento pesando-se em seguida (Figura 18).

Figura 18 - Ensaio de densidade real a) picnômetro com solo b) picnômetro com solo e água c) aquecimento do picnômetro d) picnômetro com solo e cheio de água.



Fonte: Autor, 2014

3.4.1.3 Limites de Consistência

Convenciona-se o limite de liquidez (LL) de um solo como sendo o teor de umidade acima do qual o solo perde as características de plasticidade, passando a se comportar como um fluido viscoso. Na definição de Atterberg, o limite de liquidez representa a fronteira entre o "estado plástico" e o "estado líquido".

Para a obtenção do LL em laboratório, utiliza-se um equipamento em forma de concha, conhecido como Aparelho de Casagrande. O ensaio baseia-se na determinação do número de golpes necessários para fechar um sulco padrão, efetuado no solo colocado na concha. O ensaio é executado diversas vezes, fazendo-se variar o teor de umidade da amostra. O limite de liquidez corresponde à umidade que determina o fechamento do sulco com 25 golpes.

Para esse ensaio de limite de liquidez (LL) utilizou-se 100g da amostra de solo que foi colocada em uma cápsula onde foi adicionada água destilada em pequenos incrementos de forma a obter uma pasta homogênea. Em seguida, uma parte da mistura foi transferida para a concha, moldando-a de forma que a parte central apresentasse uma espessura da ordem de 10 mm. Após, isso o cinzel foi passado na massa de solo de forma a dividir o solo em duas partes, abrindo uma ranhura na parte central. A concha foi golpeada contra sua base e foi anotado o número de golpes necessário para que as bordas inferiores da ranhura se unissem. Em seguida, uma pequena quantidade do material das bordas foi retirado para a determinação da umidade. O procedimento foi repetido de forma a se obter outros pontos do ensaio (Figura 19).

Figura 19 - Ensaio de limite de liquidez a) amostra na concha para início de ensaio b) amostra com ranhura na parte central



Fonte: Autor, 2014

Após o ensaio, deve-se construir um gráfico, colocando-se no eixo das abcissas (em escala linear) os teores de umidade, e no eixo das ordenadas (em escala logarítmica) o número de golpes. Aos pontos assim determinados é ajustada uma reta. Pontos que eventualmente estiverem muito afastados da tendência dos demais devem ser desprezados.

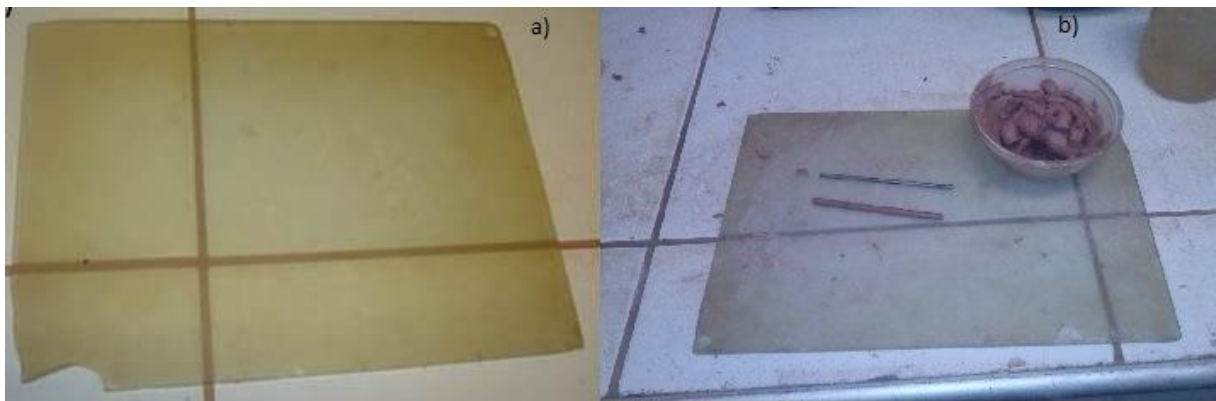
O limite de plasticidade (LP) representa o teor de umidade a partir do qual um solo passa a exibir plasticidade. Na definição clássica de Atterberg, o LP é a fronteira entre o "estado semi-sólido" e o "estado plástico". Ou seja, para umidades superiores ao limite de plasticidade, o solo deixaria de apresentar a consistência de um material "sólido", tornando-se moldável.

No laboratório, o limite de plasticidade é definido como sendo o teor de umidade com o qual um cilindro de solo começa a se fragmentar, quando moldá-lo com 3 mm de diâmetro.

Para a realização desse ensaio utilizou-se 100g da amostra de solo que foi colocada em uma cápsula onde foi adicionada água destilada em pequenos incrementos de forma a obter uma pasta homogênea. Em seguida, foi retirado 10 g da amostra que foi rolada

sobre uma placa de vidro dispolido até formar um cilindro com 3 mm de diâmetro e comprimento de 10 cm. Em seguida, o material foi transferido para um recipiente adequado para determinação da umidade. O procedimento foi repetido para a obtenção de outros pontos de ensaio (Figura 20).

Figura 20 - Ensaio de limite de plasticidade a)placa de vidro dispolido b)cilindro e solo preparado para ser colocado na capsula



Fonte: Autor, 2014

O limite de plasticidade é obtido a partir da média dos teores de umidade encontrada. Entretanto, os valores de umidade utilizados não devem diferir mais de 5% da respectiva média. Ou seja, deve-se verificar se cada valor de umidade atende a esse critério. Os valores que não atingirem essa faixa de $\pm 5\%$ em relação à média são desprezados.

3.4.1.4 Ensaio de Compactação

Experimentalmente, é possível constatar que a adição de água a um solo seco facilita a sua compactação. Em outras palavras, cada vez que se adiciona água a esse solo pouco úmido, a densidade final do material compactado aumenta.

Entretanto, isso não ocorre indefinidamente. Na verdade, o acréscimo de água tem um efeito benéfico enquanto não se alcança um certo teor de umidade, que é chamado de

umidade ótima (h_{ot}). Quando a adição de água conduz a umidades superiores a h_{ot} , passa-se a verificar o processo inverso. Ou seja, a densidade do material compactado tende a se reduzir com o acréscimo de umidade.

Assim, o ensaio de compactação tem basicamente dois objetivos:

- Determinar a umidade ótima do solo, para uma dada energia de compactação;
- Determinar o peso específico aparente seco máximo (γ_s , máx) associado à umidade ótima.

O ensaio de compactação foi realizado utilizando-se a energia Proctor normal sem reaproveitamento de material e com reuso do mesmo. Realizou-se o ensaio com cerca de 6kg de solo para cada ensaio e passando-o na peneira de 4,8 mm (nº4). O solo que passou nesta peneira foi submetido ao quarteamento e foi adicionado água destilada gradativamente revolvendo continuamente o material de forma que o teor de umidade fosse 5% abaixo da umidade ótima presumível. Após a homogeneização do material o solo foi colocado por camadas, no cilindro para iniciar a compactação com o soquete (Figura 21).

Figura 21 - Ensaio de compactação procto normal a) compactação b) preparação da amostra para pesagem



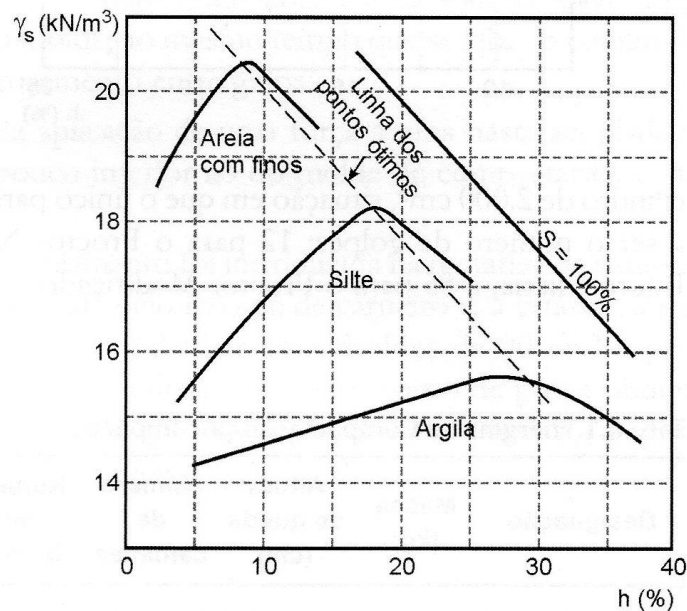
Fonte: Autor, 2014

A etapa posterior consiste na elaboração da "curva de compactação". Para tanto, cria-se um gráfico em que o teor de umidade h é colocado no eixo das abcissas, e o peso específico aparente seco γ_s no eixo das ordenadas. Plota-se então os dados de cada ensaio e ajusta-se uma curva aos mesmos, desprezando-se os pontos mais afastados.

O ponto de máximo da curva ajustada corresponderá ao peso específico aparente seco máximo do solo ($\gamma_s \text{ max}$). O teor de umidade associado a esse valor é denominado "umidade ótima" (h_{ot}).

A influência na forma da curva de compactação depende do tipo de solo. Os solos grossos tendem a exibir uma curva de compactação com um maior valor de ($\gamma_s \text{ max}$) e um menor h_{ot} contendo grande quantidade de finos (Figura 22).

Figura 22 - Influência do tipo de material na curva de compactação.



Fonte: Massad, 2010.

3.4.1.5 Ensaio de Adensamento

Entende-se por adensamento a deformação plástica e a redução do índice de vazios de uma massa de solo em função do tempo e da pressão aplicada.

O ensaio é feito em estágios de pressão aplicada em corpos de prova, geralmente indeformados e saturados, confinados lateralmente com a consequente aferição da redução de sua altura. Desse ensaio são interpretados parâmetros fundamentais para o cálculo de recalques por adensamento.

Esse ensaio foi realizado com o corpo de prova, deformado, onde ele foi compactado no próprio molde usado na prensa. Instalou-se o corpo de prova entre duas pedras porosas, no edômetro, no qual foi saturado por 24 horas conforme Figura 23.

Figura 23 - Ensaio de adensamento a) Prensa devidamente equipada com a célula de adensamento (edômetro) b) corpo de prova moldado e saturado c) diâmetro do anel e pressões utilizadas no ensaio.



Fonte: Autor, 2014

3.4.1.6 Ensaio de Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele. Todos os solos são mais ou menos permeáveis.

O conhecimento do valor da permeabilidade é muito importante em algumas obras de engenharia, principalmente, na estimativa da vazão que percolará através do maciço

e da fundação de barragens de terra, em obras de drenagem, rebaixamento do nível d'água, adensamento, etc.

O coeficiente de permeabilidade é a grandeza que mede a facilidade com que um fluido escoar através de um meio poroso. Seu valor depende da viscosidade do fluido, do índice de vazios, do grau de saturação, do tamanho e da forma das partículas, etc. Sua determinação baseia-se na lei de Darcy para escoamento laminar, segundo a qual a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, e pode ser feita em laboratório por permeômetros (carga constante ou carga variável). O conhecimento do coeficiente de permeabilidade é importante em problemas de drenagem, percolação, rebaixamento de nível d'água, recalques, etc.

O ensaio de permeabilidade foi realizado com a compactação do corpo de prova na umidade desejada (em geral a umidade ótima). Transferiu-se o c.p. para o cilindro do ensaio de permeabilidade, colocando-se sobre o mesmo, pedras porosas conforme Figura 24.

Concluída a montagem do permeômetro, procede-se à saturação no sentido base-topo para facilitar a saída do ar dos vazios do solo até que saia água no topo do aparelho. Fez-se fluxo no sentido topo-base e efetuaram-se algumas leituras de cargas e seus tempos correspondentes.

Figura 24 - Ensaio de Permeabilidade a) equipamento utilizado para o ensaio b) corpo de prova compactado e devidamente moldado c) adição de pedras porosas no corpo de prova d) cilindro completamente fechado e) cilindro devidamente instalado f) adição de carga hidráulica.



Fonte: Autor, 2014

Os principais fatores que influenciam no coeficiente de permeabilidade são: granulometria, índice de vazios, composição mineralógica, estrutura, fluido, macro-estrutura e a temperatura.

- Granulometria - O tamanho das partículas que constituem os solos influencia no valor de “k”. Nos solos pedregulhosos sem finos (partículas com diâmetro superior a 2mm), por exemplo, o valor de “k” é superior a 0,01cm/s; já nos solos finos (partícula com diâmetro inferior a 0,074mm) os valores de “k” são bem inferiores a este valor.

- Índice de vazios - A permeabilidade dos solos esta relacionada com o índice de vazios, logo, com a sua porosidade. Quanto mais poroso for um solo, maior será o índice de vazios, conseqüentemente, mais permeável.
- Composição mineralógica - A predominância de alguns tipos de minerais na constituição dos solos tem grande influência na permeabilidade. Por exemplo, argilas moles que são constituídas, predominantemente, de argilo-minerais (caulinitas, ilitas e montmorilonitas) possuem um valor de “k” muito baixo, que varia de 10^{-7} a 10^{-8} cm/s. Já nos solos arenosos, cascalhentos sem finos, que são constituídos, principalmente, de minerais silicosos (quartzo) o valor de “k” é da ordem de 1,0 a 0,01 cm/s.
- Estrutura - É o arranjo das partículas. Nas argilas existem as estruturas isoladas e em grupo que atuam forças de natureza capilar e molecular, que dependem da forma das partículas. Nas areias o arranjo estrutural é mais simplificado, constituindo-se por canalículos, interconectados onde a água flui mais facilmente.
- Fluido - O tipo de fluido que se encontra nos poros. Nos solos, em geral, o fluido é a água com ou sem gases (ar) dissolvidos.
- Macro-estrutura - Principalmente em solos que guardam as características do material de origem (rocha mãe) como diaclases, fraturas, juntas, estratificações. Estes solos constituem o horizonte C dos perfis de solo, denominados de solos saprolíticos (material utilizado para a realização deste trabalho).
- Temperatura - Quanto maior a temperatura, menor a viscosidade d'água, portanto, maior a permeabilidade, isto significa que a água mais facilmente escoará pelos poros do solo. Por isso, os valores de “k”

obtidos nos ensaios são geralmente referidos à temperatura de 20°C, o que se faz pela seguinte relação:

$$K_{20} = 2,3 \cdot \frac{aL}{At} \cdot \log \frac{h_o}{h_f} \cdot F_c \quad (2)$$

Onde,

L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA (cm)
A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA (cm ²)
a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA (cm ²)
t -TEMPERATURA DO ENSAIO
Fc - FATOR DE CORRELAÇÃO (20°C)
ho - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)
hf - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)

3.4.1.7 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto

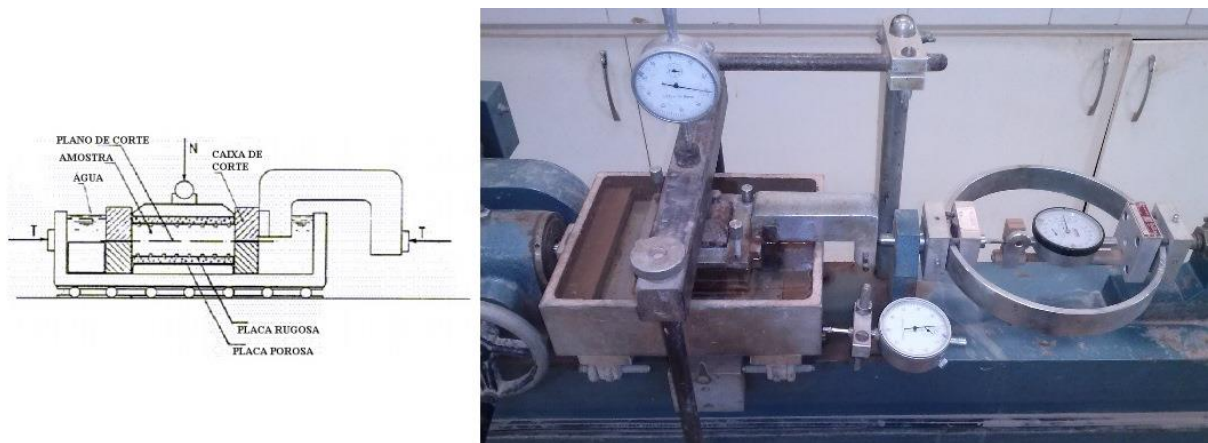
A resistência do solo ao cisalhamento é determinada pelas características coesivas e friccionais entre as partículas do solo, sendo definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura (PINTO, 2000). Os principais fatores que influenciam a resistência do solo ao cisalhamento são a distribuição de partículas do solo, a densidade, a estrutura e o teor de água no solo (MCKYES ET AL., 1994).

Em solos de textura arenosa, a resistência ao cisalhamento depende basicamente do atrito entre as partículas, enquanto em solos argilosos ela depende não só do atrito entre partículas, como também da coesão do solo (LEBERT & HORN, 1991).

O ensaio de cisalhamento direto foi executado em uma caixa metálica bipartida (Figura 25), deslizando-se a metade superior do corpo de prova em relação à inferior. O corpo de prova foi inicialmente comprimido pela força normal “N”, seguindo-se a aplicação da força cisalhante “T”.

Esta força impôs um deslocamento horizontal (Δl) à amostra até a ruptura do corpo de prova (que ocorreu ao longo do plano XX). Para cada tensão normal aplicada ($\sigma = N/A$), obteve-se um valor de tensão cisalhante de ruptura ($\tau = T_{cis}/A$), permitindo o traçado da envoltória de resistência.

Figura 25 - Caixa bipartida do ensaio de resistência ao cisalhamento direto.



Fonte: Autor, 2014

O ensaio de cisalhamento direto drenado (Figura 26) foi executado a uma velocidade lenta de 0,09 mm/min, estabelecendo as pressões neutras nos poros da amostra. A relação entre altura e o diâmetro do corpo de prova deve ser pequena, possibilitando uma completa drenagem em menores espaços de tempo. Nas areias, devido à alta permeabilidade a dissipação de poro pressão é automática; em solos argilosos, é necessário reduzir a velocidade de deformação para aumentar o tempo de ensaio.

Figura 26 - Ensaio de cisalhamento a) Peneiramento da amostra b) conservação do teor de umidade da amostra c) Moldando o corpo de prova d) Altura do corpo de prova e) Corpo de prova dentro da caixa bipartida f) Prensa de realização do ensaio.



Fonte: Autor, 2014

As características de cisalhamento do solo são representadas pela coesão, pelo ângulo de atrito interno e pela resistência do solo ao cisalhamento (ORTIGÃO, 1995). A coesão do solo é a força de atração entre as superfícies de suas partículas, podendo ser real ou aparente. A coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes, como teor de óxidos e de argilas silicatadas (MULLINS et al., 1990). A coesão aparente é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, formando meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente saturados, que tendem a aproximá-las entre si. A coesão aparente constitui uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

O ângulo de atrito interno do solo representa as características friccionais entre as partículas do solo, sendo definido como o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que haja o cisalhamento do solo no plano de ruptura. O ângulo de atrito interno do solo depende de fatores como grau de

compactação, percentagem e tipo de argila, tamanho e forma dos grãos de areia do solo (PINTO, 2000).

3.5 Utilização do Sistema GeoStudio 2007 (SEEP/W), (SLOPE/W)

O programa possui recursos que facilitam a geração do modelo além de permitir a definição adequada das reais características e condicionantes da situação em análise.

Quanto à apresentação tanto do modelo como dos resultados o programa permite a geração de figuras coloridas facilmente incorporadas a editores de texto. Os resultados são mostrados na forma de regiões representativas de intervalos de valores permitindo uma clara visualização do comportamento do modelo.

As análises realizadas permitem a avaliação do comportamento de meios porosos em diversas condições, dentre as quais se destacam:

- Análise do comportamento transiente do lençol freático;
- A avaliação do comportamento das poro pressões na barragem quando da ocorrência de rebaixamento rápido do reservatório;
- Determinar a evolução da frente de saturação na barragem quando do enchimento do reservatório;
- Dimensionamento de sistemas de rebaixamento e avaliação de sua eficiência;
- Análise do espalhamento do fluxo em análises horizontais.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Ensaios de caracterização

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados nas amostras de solo.

4.1.1 Ensaios realizados no solo

Para a caracterização geotécnica dos solos foram realizados ensaios laboratoriais como: ensaios de análise granulométrica, densidade real dos grãos, índices de consistência, compactação, adensamento, permeabilidade e resistência ao cisalhamento direto.

O resumo dos resultados dos ensaios de laboratório realizados para granulometria no solo saprolítico é apresentado na Tabela 6.

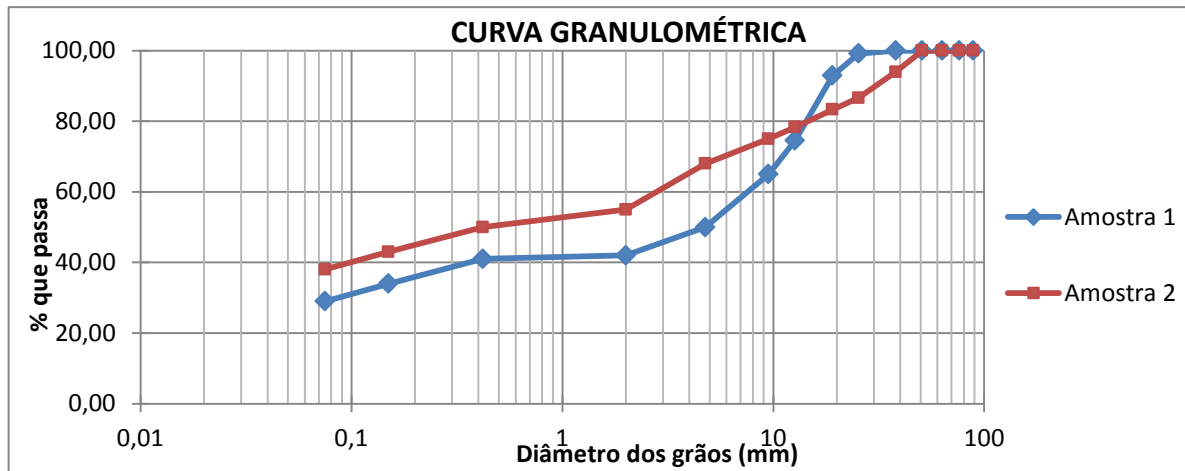
Tabela 6 : Resultados dos ensaios laboratoriais realizados no solo saprolítico.

Amostras	Granulometria que passa (%)										
	Peneiramento grosso							Peneiramento fino			
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº. 4	Nº. 10	Nº. 40	Nº. 100	Nº. 200
1	100	100	99,17	92,94	74,55	65	50	42	41	34	29
2	100	93,98	86,63	83,31	78,33	75	68	55	50	43	38

Fonte: Autor, 2014.

No Gráfico 1 apresentam-se as curvas granulométricas das amostras 01 e 02 do solo saprolítico. As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 10 cm (amostra 01) e 20 cm (amostra 02).

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do solo saprolítico – Amostras 01 e 02.



Fonte: Autor, 2014

Através do gráfico 1 observam-se curvas bastante coincidentes, o que nos permite observar a homogeneidade das amostras de solo ensaiadas.

A amostra 01 apresenta 50% de pedregulho, 8% de areia grossa, 1% de areia média, 12% de areia fina e 29% de silte + argila. Já a amostra 02 apresenta 32% de pedregulho 13 % de areia grossa, 5% de areia média, 12% de areia fina e 38% de silte + de argila. De acordo com o Sistema de Classificação Unificada (SUCS) as duas amostras de solo correspondem ao tipo SM, que corresponde a uma areia ou uma areia siltosa.

Quando se estuda o comportamento mecânico dos solos grossos – areias e pedregulhos, com pequena quantidade ou ausência da fração fina, geralmente negligencia-se a influência da umidade nestes solos, isto porque a quantidade de água que possa estar presente nos mesmos tem um efeito secundário em seu comportamento.

Podemos concluir por meio da classificação dos solos coletados que a amostra 01 é um solo mais pedregulhoso apresentando um maior índice de vazios e conseqüentemente, uma menor resistência.

A densidade real dos grãos (G) foi determinada pelo método do picnômetro através da realização de três ensaios, onde foram obtidos resultados em média de 2,71 para amostra 01 e 2,61 para amostra 02. De acordo com Terzaghi e Peck (1967), valores típicos de solos ficam em torno de 2,7 logo, os valores obtidos encontram-se na faixa de variação típica dos solos.

Para o solo natural, os resultados dos limites de consistência estão apresentados na tabela 7, onde estão comparados os limites de Atterberg de solos saprolíticos.

Tabela 7 - Limites de Atterberg.

SOLO	LL	LP	IP	SUCS
AMOSTRA 01	30	22	8	SM
AMOSTRA 02	26	0	0	SM

Fonte: Autor, 2014.

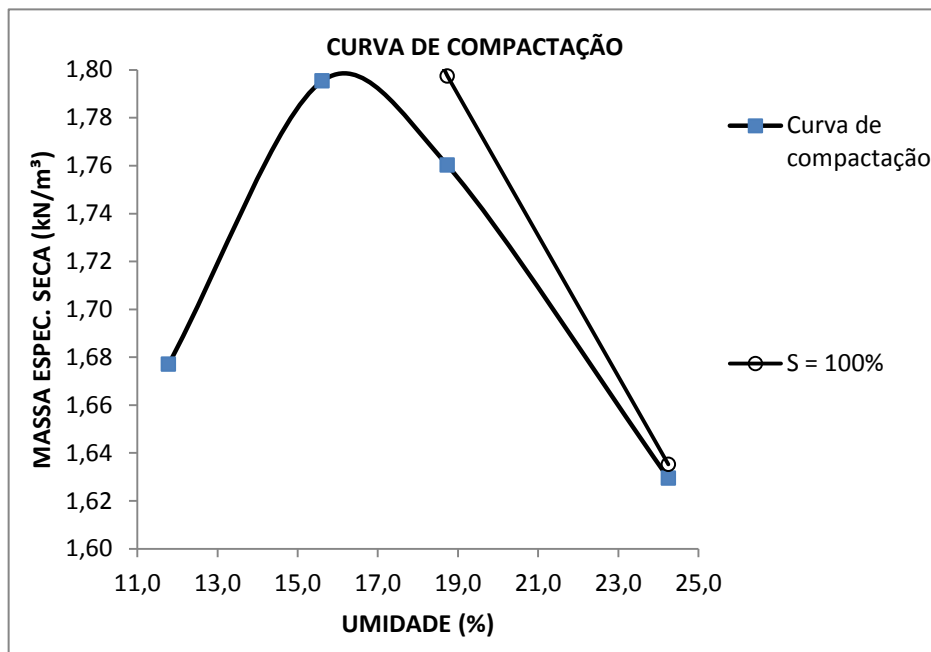
Pela classificação SUCS, o solo é um SM, ou uma areia siltosa. As amostras apresentam a mesma classificação, porém, a amostra 02 não apresentou plasticidade. Isso se deve pela ausência de argila na amostra.

As curvas de compactação do solo foram construídas através da execução de ensaios de compactação na energia Proctor Normal. Os ensaios foram realizados a partir da moldagem de quatro corpos de prova com umidades diferentes para, de forma a se obter cinco pontos nos gráficos. A partir das curvas de compactação das amostras ensaiadas, foi possível obter-se o peso específico aparente seco máximo (γ_{smax}), e a umidade ótima do solo (w_{ot}), conforme mostradas nos gráficos 2, 3, 4 e 5.

Os gráficos citados acima de umidade x peso específico aparente seco máximo (γ_{smax}) apresentam curvas com formas características de uma areia siltosa (SOUSA PINTO,

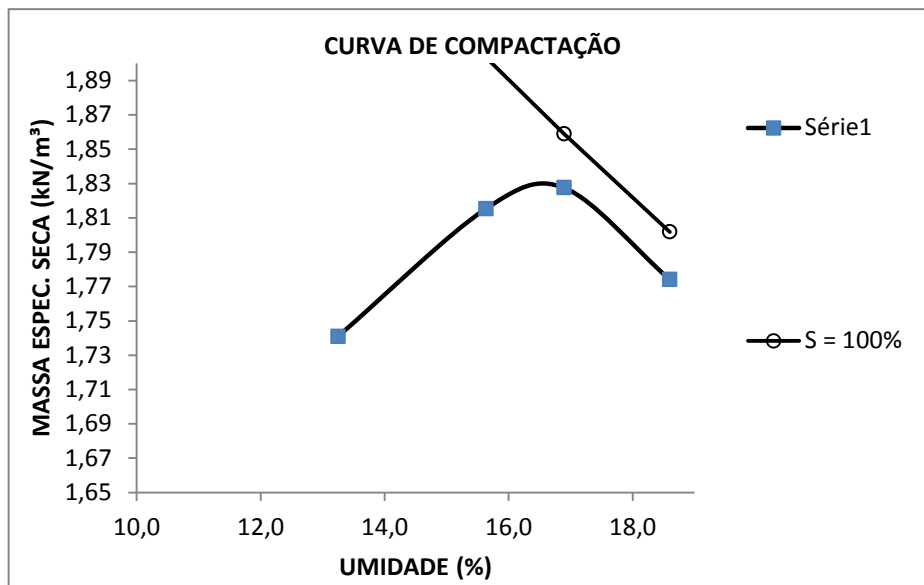
2006). Além disso, as umidades ótimas também apresentam valores característicos de solos arenosos.

Gráfico 2 - Curva de compactação sem reuso do solo da amostra 01 para a energia de Proctor Normal.



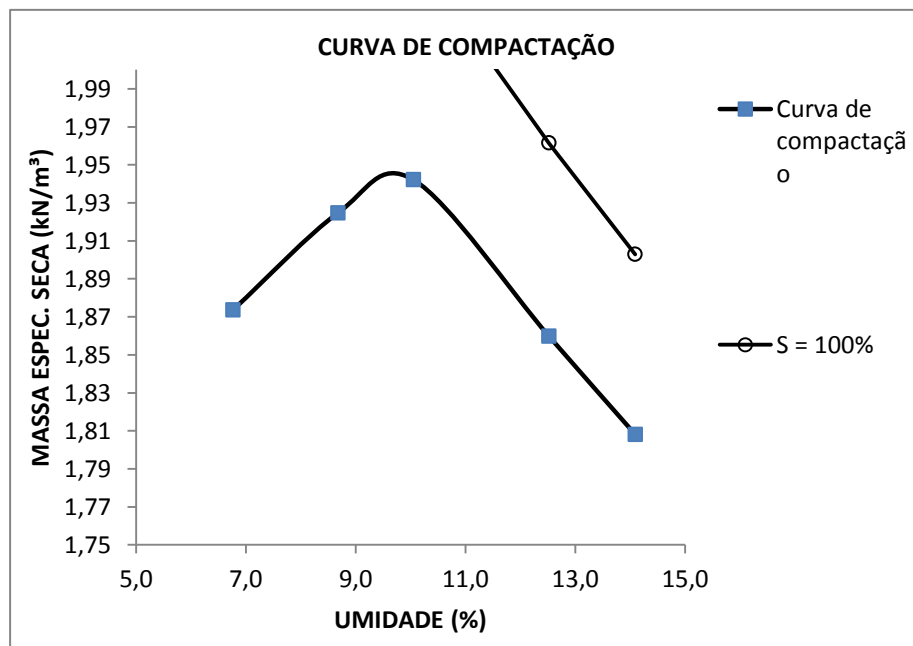
Fonte: Autor, 2014

Gráfico 3 - Curva de compactação com reuso do solo da amostra 01 para energia de Proctor Normal.



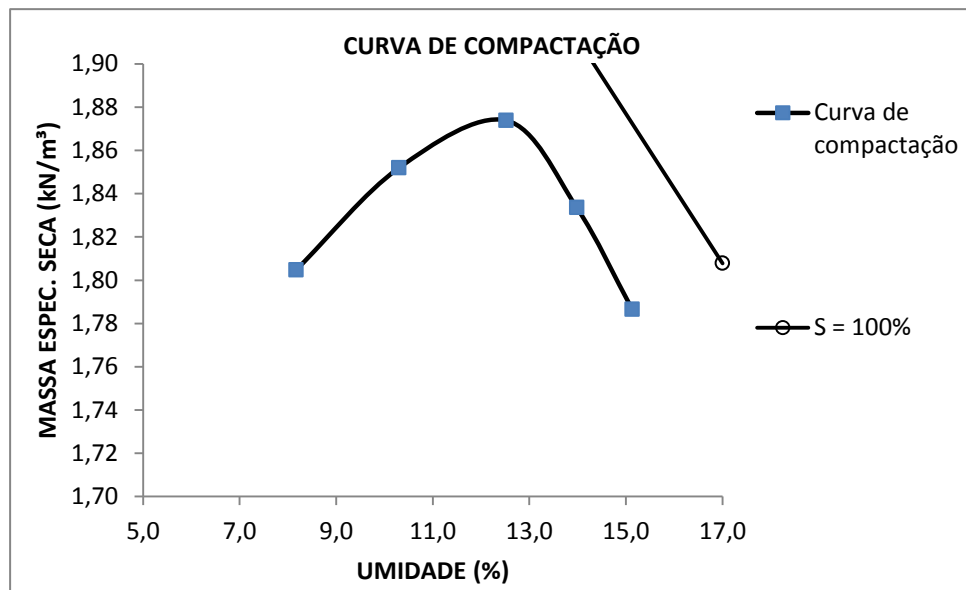
Fonte: Autor, 2014

Gráfico 4 - Curva de compactação sem reuso do solo amostra 02 para energia de Proctor Normal.



Fonte: Autor, 2014

Gráfico 5 - Curva de compactação com reuso da amostra 02 com energia de Proctor Normal.



Fonte: Autor, 2014.

Como se pode observar, os resultados obtidos para as duas amostras foram muito próximos. Nestes ensaios as coordenadas dos pontos correspondentes às umidades ótimas da Amostra 01 são dadas pela média dos pesos específico aparente seco máximo no valor de 1,81 kN/m³ e teor de umidade de 13%. Para a Amostra 02, a média dos pesos específico aparente seco máximo foi no valor de 1,90 kN/m³ para um valor médio de umidade de 10%.

Com a compactação, foi aumentada a capacidade de suporte do material, dando-lhe uma maior resistência ao cisalhamento, além de melhorar consideravelmente os aspectos de permeabilidade, minimizando as consequências destas características geotécnicas no material de solo utilizado.

4.2 Ensaios especiais de Laboratório

4.2.1 Ensaio de permeabilidade

Mori (1987) afirma quanto à permeabilidade, que os ensaios de laboratório não representam fielmente a situação de campo, pois como o destorroamento é maior no laboratório, costuma-se obter coeficientes de permeabilidade maiores in situ. O autor informa, ainda, que valores de permeabilidade esperados para solos saprolíticos compactados são de ordem de 10^{-8} m/s.

A tabela 8 a seguir apresenta os resultados obtidos pelo ensaio:

Tabela 8 – Resultados do ensaio de Permeabilidade.

Amostra	h_0 (cm)	h_f (cm)	t (seg)	K_{20} (cm/s)
1	122	118	1800	7,20E-07
	122	118	1800	7,40E-07
	122	118	1800	6,10E-07
	122	118	1800	5,00E-07
Média				6,43E-09
2	122	122	1.050	2,50E-06
	122	122	1.062	2,50E-06
	122	122	1.062	2,50E-06
	122	122	1.077	2,50E-06
Média				2,50E-08

Fonte: Autor, 2014

Pelos resultados, foi obtido para a Amostra 01 um coeficiente de permeabilidade de $6,4 \times 10^{-9}$ cm/s e para a Amostra 02 um coeficiente de $2,5 \times 10^{-8}$ cm/s. Os coeficientes de permeabilidade obtidos serão utilizados nos estudos de percolação, que definirá as condições de fluxo no interior da barragem e sua influência na estabilidade do maciço.

4.2.2 Ensaio de Adensamento

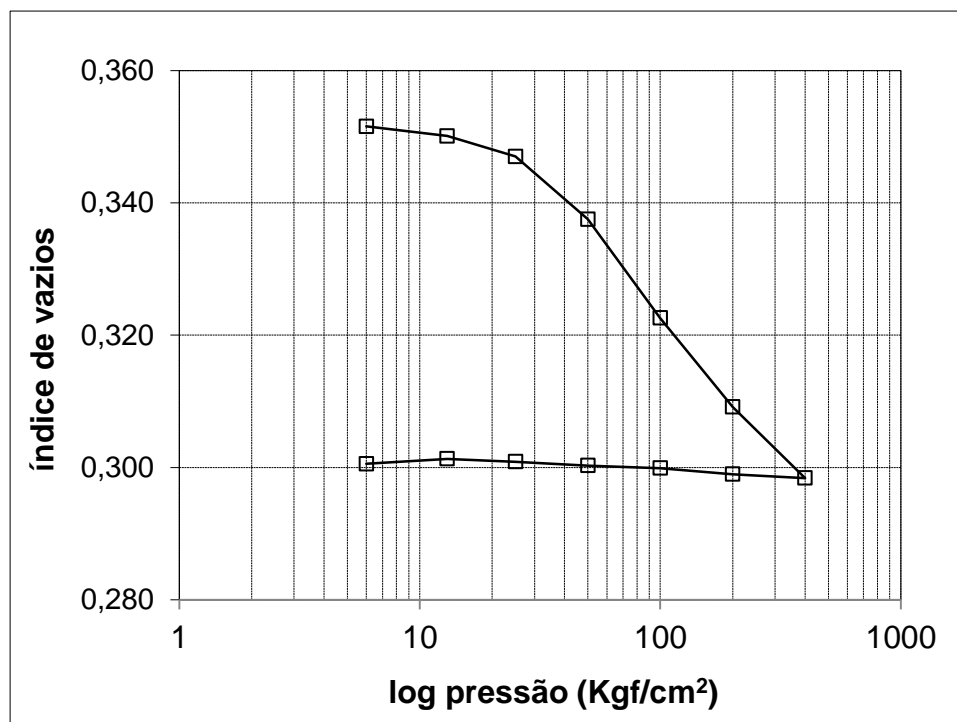
No ensaio de adensamento simples foi acrescentado durante sua execução um estágio de inundação do corpo de prova.

O corpo de prova foi submetido à tensão de adensamento até o segundo estágio, que corresponde a carga de 13 kPa, nesse momento foi realizada a inundação da amostra e esperada a estabilização das deformações. Em seguida procedeu-se de maneira convencional

aplicando-se os incrementos de cargas correspondentes a cada estágio do adensamento. As cargas aplicadas foram de 6 kPa, 13 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.

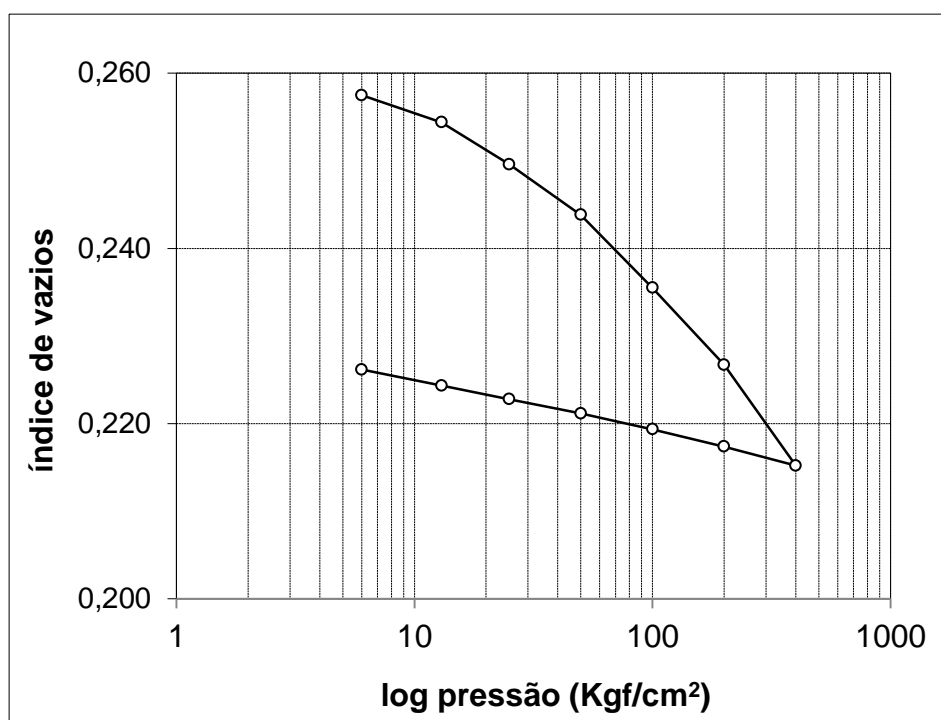
A partir do resultado dos ensaios puderam-se construir gráficos relacionando o índice de vazios (e) com o logaritmo das tensões aplicadas ($\log \sigma_v$). Os Gráfico 6 e 7, apresentados a seguir, são resultados do adensamento simples com amostras de solo deformada.

Gráfico 6 - Curva de adensamento da amostra 01.



Fonte: Autor, 2014.

Gráfico 7 - Curva de adensamento da amostra 02.



Fonte: Autor, 2014.

A curva de adensamento da amostra 01 apresentou um maior o índice de vazios, tornando-o menos resistente que a amostra 02.

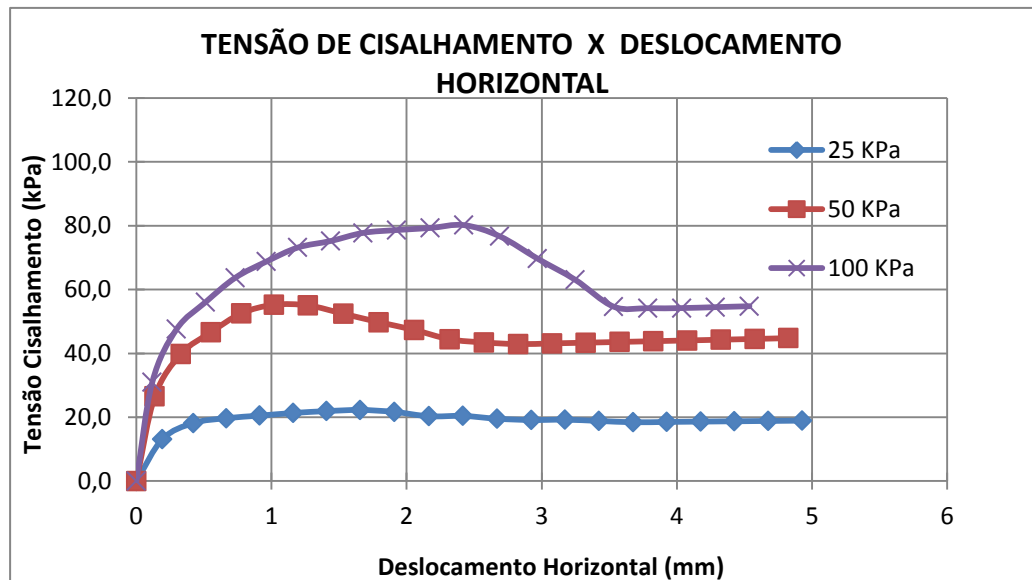
4.2.3 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto Saturado.

Os ensaios de cisalhamento saturado foram realizados nas duas amostras de solos saprolíticos. É importante ressaltar com relação à saturação da amostra, que os corpos de prova foram ensaiados numa condição inundada, com um período mínimo de saturação de 24 horas. A saturação obtida para os ensaios foi em média de 98 %, entretanto, os parâmetros obtidos por meio dos ensaios de cisalhamento direto são considerados neste trabalho como representativos dos corpos de prova no estado saturado.

Com relação aos resultados dos ensaios, na amostra 01 foi obtido um ângulo de atrito no valor de 36,2° e uma coesão no valor de 9,79 kPa. No gráfico 8 é apresentado o

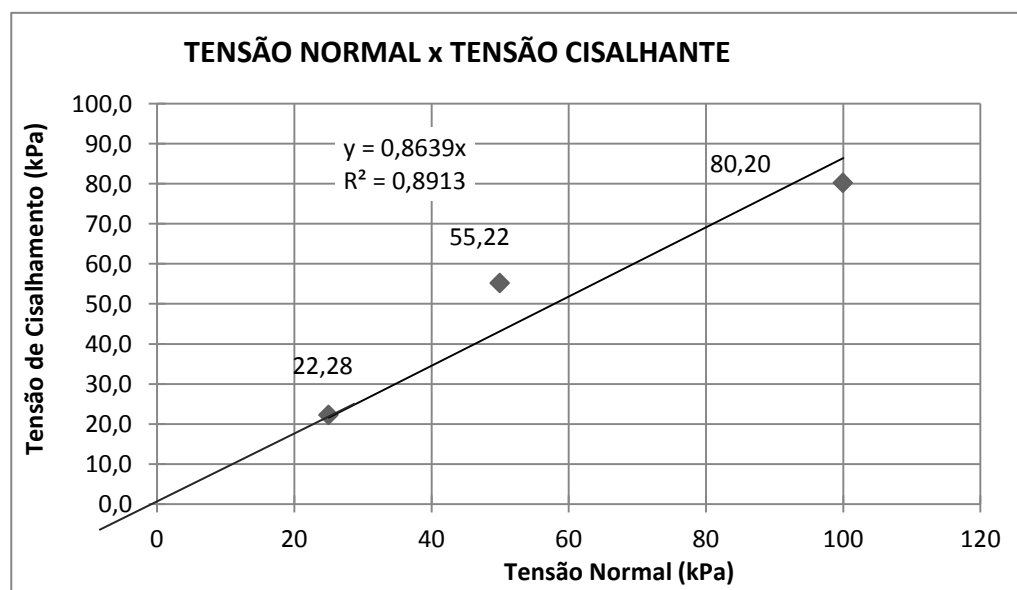
comportamento do deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante, e no gráfico 9 é apresentado a envoltória de ruptura para o solo.

Gráfico 8 - Deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante da amostra 01 em estado saturado.



Fonte: Autor, 2014

Gráfico 9 - Envoltória de ruptura da amostra 01 em estado saturado.

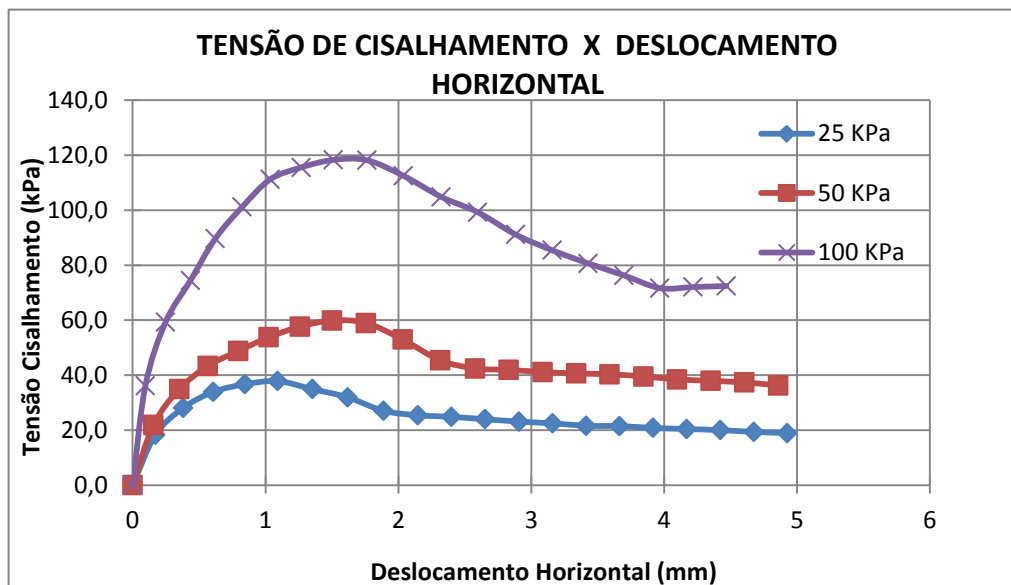


Fonte: Autor, 2014

No gráfico 8 mostra que as curvas para as diferentes tensões apresentam um mesmo aspecto, aumentando a tensão desviadora até um valor máximo da tensão cisalhante. Os resultados de resistência obtidos também mostram serem coerentes para o tipo de solo que foi ensaiado.

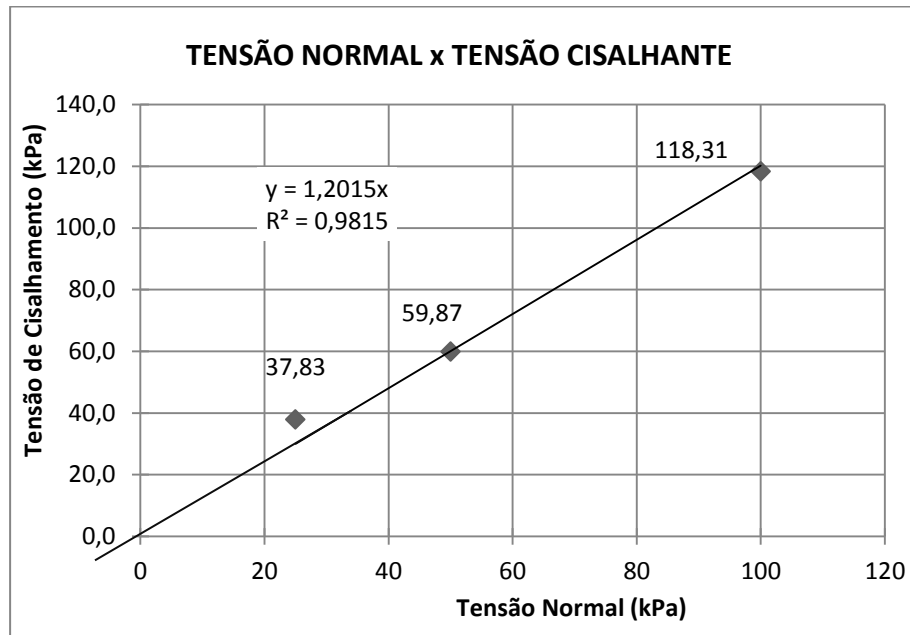
Com relação aos resultados dos ensaios, na amostra 02 foi obtido um ângulo de atrito no valor de $47,3^\circ$ e uma coesão no valor de 8,61 kPa. No gráfico 10 é apresentado o comportamento do deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante, e no gráfico 11 é apresentada a envoltória de ruptura para o solo.

Gráfico 10 – Deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante da amostra 02 em estado saturado



Fonte: Autor, 2014.

Gráfico 11 - Envoltória de ruptura da amostra 02 em estado saturado.



Fonte: Autor, 2014

Nos gráficos 8 e 10 mostraram que as curvas para as diferentes tensões apresentam um mesmo aspecto, aumentando a tensão desviadora até um valor máximo da tensão cisalhante.

Na Tabela 9 são mostrados os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de Resistência ao cisalhamento direto das Amostras.

AMOSTRA	MASSA ESP. APAR. SECA (g/cm ³)	UMIDADE (%)	TENSÃO	TENSÃO	COESÃO (kPa) Pico	ATRITO (Graus) Pico
			NORMAL (kPa)	CIS. MÁX. (kPa)		
1	1,810	13	25	22,28	9,79	36,25
			50	55,22		
			100	80,20		
2	1,900	10	25	37,83	8,61	47,38
			50	59,87		
			100	118,31		

Fonte: Autor, 2014.

Com esses resultados de resistência da amostra 02, a mesma, não será utilizada na análise numérica apresentada no capítulo seguinte.

De acordo com Das (2007), o valor encontrado de ângulo de atrito da amostra 02 é considerado de um pedregulho e de acordo com a classificação realizada foi encontrada de uma areia siltosa. Portanto, a amostra está fora dos valores típicos de ϕ , conforme mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores típicos de ϕ .

Solo	ϕ (°)	Solo	ϕ (°)
Areia (grãos arredondados)		Areia (grãos angulares)	
Fofa	27 - 30	Fofa	30 – 35
Média	30 - 35	Média	35 – 40
Compacta	35 - 38	Compacta	40 – 45
Pedregulho	34 - 48	Silte	26 – 35

Fonte: Das, 2007.

Sabe-se que a envoltória de resistência ao cisalhamento é não linear. O ajuste através de uma reta pode atribuir inclinações maiores. Provavelmente a amostra 2 apresenta valores de ϕ mais elevados, tendo em vista que os ensaios foram realizados com baixos valores de pressão normal.

4.2.4 Análise Petrográfica dos solos saprolíticos

Os aspectos microscópicos foram determinados através do estudo de quatro lâminas delgadas confeccionadas a partir de amostras de saprolitos coletadas em campo, nas quais foram descritos as principais associações mineralógicas dos solos:

QUARTZO - é um mineral bastante resistente e por isso é herdado da rocha original, nas amostras da área em estudo encontra-se com concentrações superiores a 50 %. Sua presença foi verificada em todas as amostras analisadas. É anguloso, subanguloso a subarredondado. A granulação vai de tamanho silte à areia grossa e apresenta dureza 7 (FIGURAS 27 a 30).

APATITA – Também foi verificada em todas as amostras analisadas. Ocorre na forma de bastões como inclusões no quartzo e apresenta dureza 5 (FIGURAS 27, 28 e 30).

ZIRCÃO - Foi constatado nas amostras 02 no formato subarredondado, coloração acinzentado, fosco, tem hábito mais ou menos prismático e apresenta dureza 7,5 (FIGURAS 27 e 28).

MUSCOVITA – ocorre em rochas derivadas do metamorfismo regional, no caso os gnaisses, apresenta densidade 2,7 a 3,1 em razão de inclusões de quartzo, zircão e apatita. (FIGURA 29).

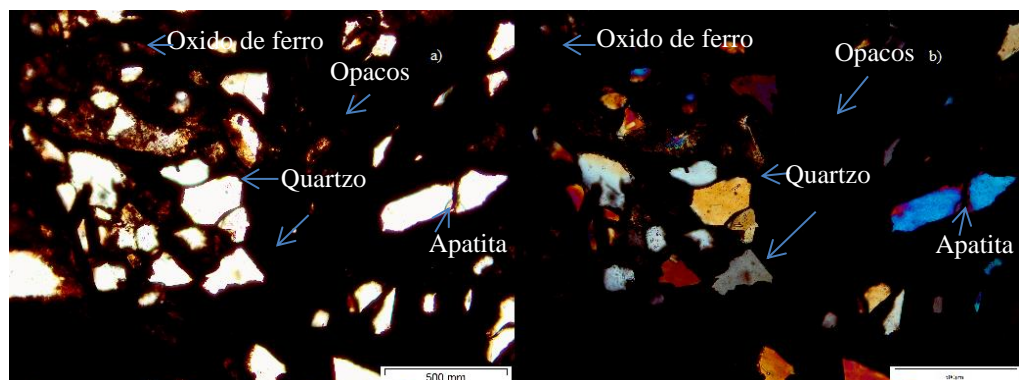
GRANADA – é encontrada em rochas metamórficas (gnaisses) é um mineral secundário. Apresenta uma dureza de 6,5 a 7,5. (FIGURA 28).

PLAGIOCLÁSIO - Os cristais de plagioclásio frequentemente exibem zoneamento composicional, especialmente nas rochas ígneas, apresentam zoneamento normal com núcleo mais cálcico, contínuo ou não. (FIGURA 30).

OPACOS - apresentam comumente altos pesos específicos devido ao seu elevado teor em ferro. (FIGURAS 27 A 30).

ÓXIDOS DE FERRO – são minerais formados a partir da liberação dos íons de ferro pelo intemperismo de minerais primários e secundários. (FIGURAS 27, 29 e 30).

Figura 27 - Amostra 01 com lente de aumento de 10x a) imagem microscópica a luz natural; b) imagem microscópica com nicól cruzado.

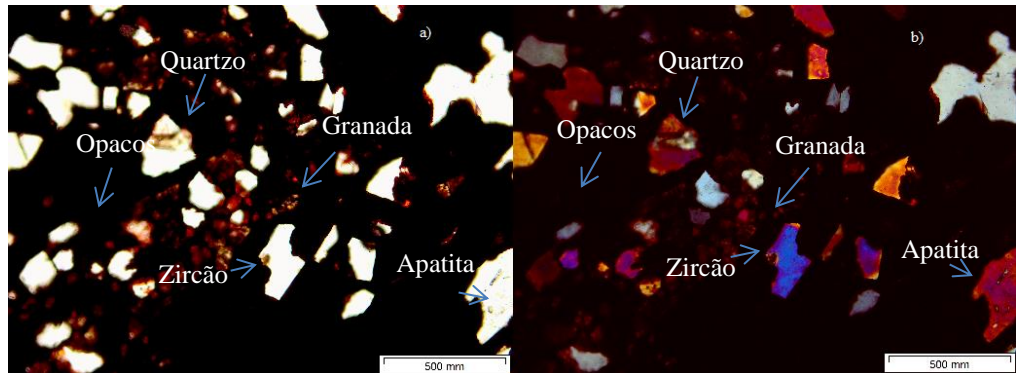


Fonte: Autor, 2014.

Tabela 11 – Porcentagem dos minerais encontrados na análise petrográfica da amostra 01 com lente de aumento de 10x.

Porcentagem	Minerais					
	Quartzo	Apatita	Zircão	Muscovita	Óxido de ferro	Opacos
	25%	10%	2%	8%	5%	50%

Figura 28 - Amostra 02 com lente de aumento de 10x a) imagem microscópica a luz natural; b) imagem microscópica com nicól cruzado.

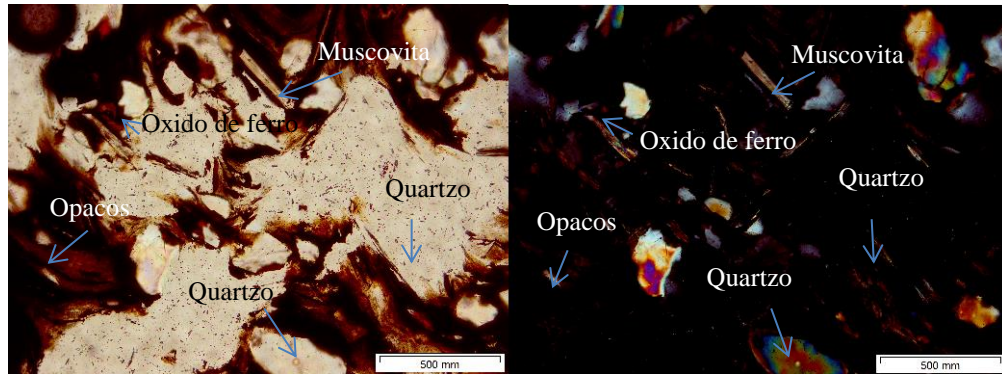


Fonte: Autor, 2014.

Tabela 12 - Porcentagem dos minerais encontrados na análise petrográfica da amostra 02 com lente de aumento de 10x.

Porcentagem	Minerais				
	Quartzo	Apatita	Zircão	Granada	Opacos
	30%	8%	2%	35%	25%

Figura 29 - Amostra 01 com lente de aumento de 4x a) imagem microscópica a luz natural; b) imagem microscópica com nicól cruzado

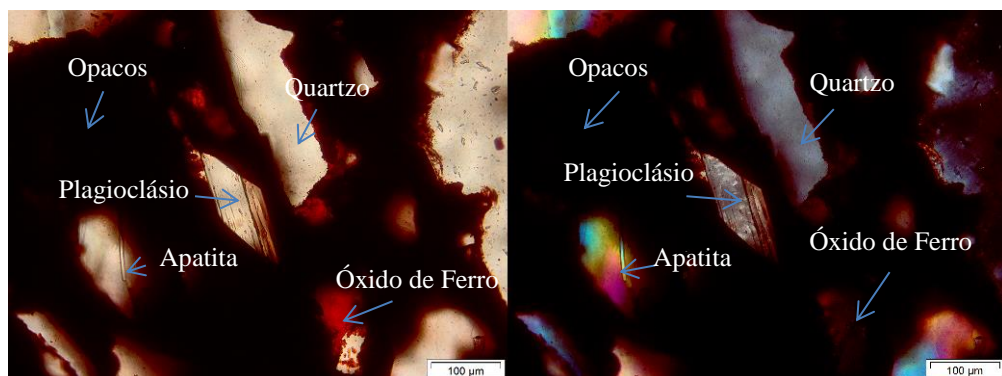


Fonte: Autor, 2014.

Tabela 13 - Porcentagem dos minerais encontrados na análise petrográfica da amostra 01 com lente de aumento de 4x.

Porcentagem	Minerais				
	Quartzo	Apatita	Muscovita	Óxido de ferro	Opacos
	40%	5%	15%	8%	32%

Figura 30 - Amostra 02 com lente de aumento de 4x a) imagem microscópica a luz natural; b) imagem microscópica com nicol cruzado.



Fonte: Autor, 2014.

Tabela 14 - Porcentagem dos minerais encontrados na análise petrográfica da amostra 02 com lente de aumento de 4x.

Porcentagem	Minerais				
	Quartzo	Apatita	Plagioclásio	Óxido de ferro	Opacos
	25%	7%	5%	10%	53%

As lâminas apresentam minerais de quartzo, apatita, zircão, ripas de muscovita com alto grau de alteração, granada, plagioclásio, óxido de ferro e opacos. Há algumas relíquias de biotita transformando-se em anfibólio.

Nos saprolitos, alguns minerais não se decompõem, como o quartzo, outros são resistentes à decomposição, como o zircão, e outros de baixa resistência, como as apatitas.

De acordo com Choudhuri (1997), na série de estabilidade de Goldich para os minerais nas condições superficiais, o quartzo, o zircão e a turmalina são os mais resistentes ao intemperismo.

A análise microscópica das amostras de saprolito constatou a presença de grande quantidade de minerais de quartzo, zircão (em uma das amostras) e apatita, esta, associada ao mineral de quartzo. A presença desses minerais evidencia a alta resistência dos solos em estudo.

5 ANÁLISES NUMÉRICAS

O presente capítulo trata das análises numéricas realizadas em uma barragem hipotética. As simulações incluem análises de fluxo e de estabilidade. As análises de fluxo têm por objetivo investigar as condições de percolação em função das propriedades do solo e das condições de carregamento durante o período de enchimento da barragem. Para esta análise utilizou-se o software SEEP/W (Geostudio 2007 - Geoslope International) em que utiliza o Método de Elementos Finitos para as soluções de fluxo em meio poroso.

As análises de estabilidade definem a segurança do talude para as diferentes condições de fluxo durante o enchimento e o esvaziamento do reservatório, expressos em um coeficiente de segurança. Para a realização destas análises utilizou-se o software SLOPE/W (Geostudio 2007 - Geoslope International) associado ao SEEP/W.

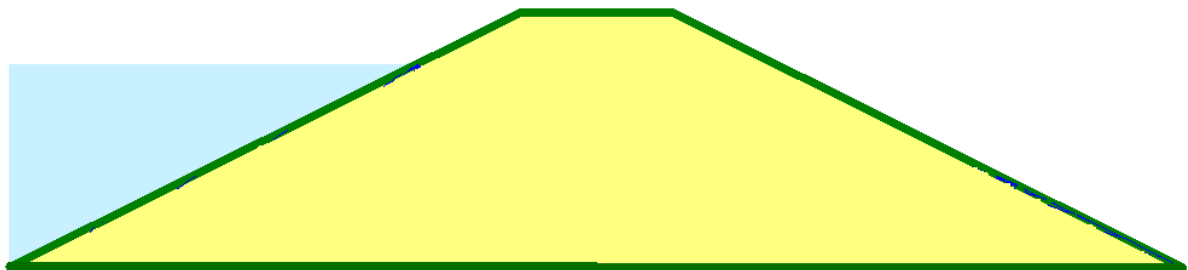
Os parâmetros adotados nas análises foram obtidos nos resultados dos ensaios de laboratório apresentados no Capítulo 4 deste trabalho.

5.1 Análises de fluxo

5.1.1 Descrição da geometria do problema.

A geometria tomada como base nas análises corresponde a uma barragem hipotética, mostrada na Figura 31. Para os dados de entrada, foram considerados os materiais referentes ao solo compactado. Para a simplificação do problema, assumiu-se que se tratava de uma seção homogênea.

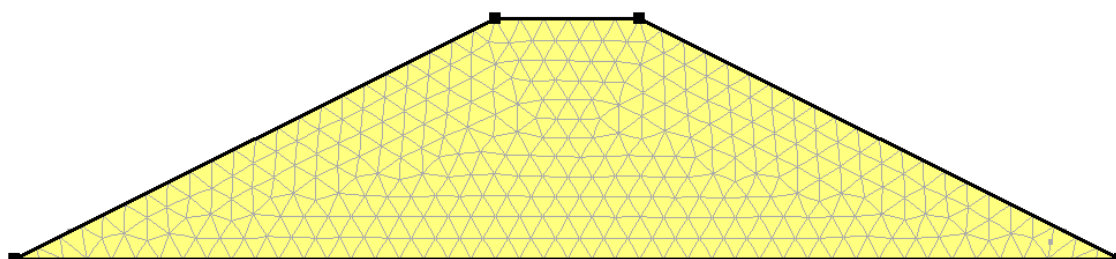
Figura 31 - Seção adotada nas análises de fluxo



A seção da Barragem foi discretizada em uma malha de 2249 Elementos Finitos, que foram gerados automaticamente pelo programa SEEP/W e distribuídos uniformemente

em sete regiões. A malha foi definida com elementos triangulares de seis nós, (3 principais e 3 secundários). A Figura 32 apresenta a malha.

Figura 32 - Malha de elementos Finitos



5.1.2 Propriedades hidráulicas dos materiais.

As propriedades hidráulicas são referentes basicamente à permeabilidade do material. Assim como em diversas propriedades geotécnicas, a permeabilidade é um dos parâmetros que sofre influência da sucção presente no solo. É sabido que quanto maior a sucção, menor é o coeficiente de permeabilidade do solo. O extremo oposto em que a sucção é nula tem-se o que é chamado de permeabilidade saturada, comumente utilizada e que pressupõe que todos os vazios do solo são ocupados exclusivamente por água.

Para entender melhor o comportamento hidráulico, o solo é constituído por um conjunto de partículas sólidas e de vazios intersticiais. Estes poros ou vazios podem ser preenchidos tanto por água como por ar, ou ainda mais, por uma combinação de ambos. De acordo com Fredlund et al (1994), as funções de permeabilidade são determinadas pelo conhecimento do coeficiente de permeabilidade saturado e pela curva de retenção de água ou curva característica do material, resultando numa função não linear entre o coeficiente de permeabilidade e a sucção.

A curva característica de sucção, ou também chamada de curva de retenção de água, expressa graficamente a relação do teor de umidade, ou pelo grau de saturação, de um solo com a sucção. A relação da sucção é inversamente proporcional ao teor de umidade, ou seja, quando o teor de umidade se aproxima da saturação, o valor da sucção tende a zero.

O programa SEEP/W faz uma estimativa da permeabilidade através da curva característica e dos coeficientes de permeabilidade por meio da seguinte equação proposta por Fredlund et. al. (1994):

$$k(\Psi) = k_s \frac{\int_{\ln(\Psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\Psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\Psi_{aev}}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (3)$$

Em que:

k = Permeabilidade não saturada (cm/s);

k_s = Permeabilidade saturada (cm/s);

Ψ_{aev} = Sucção de entrada de ar (kPa);

Ψ = Sucção (kPa);

$b = \ln(10^6)$;

θ = Teor de umidade volumétrico;

θ_s = Teor de umidade volumétrico saturado;

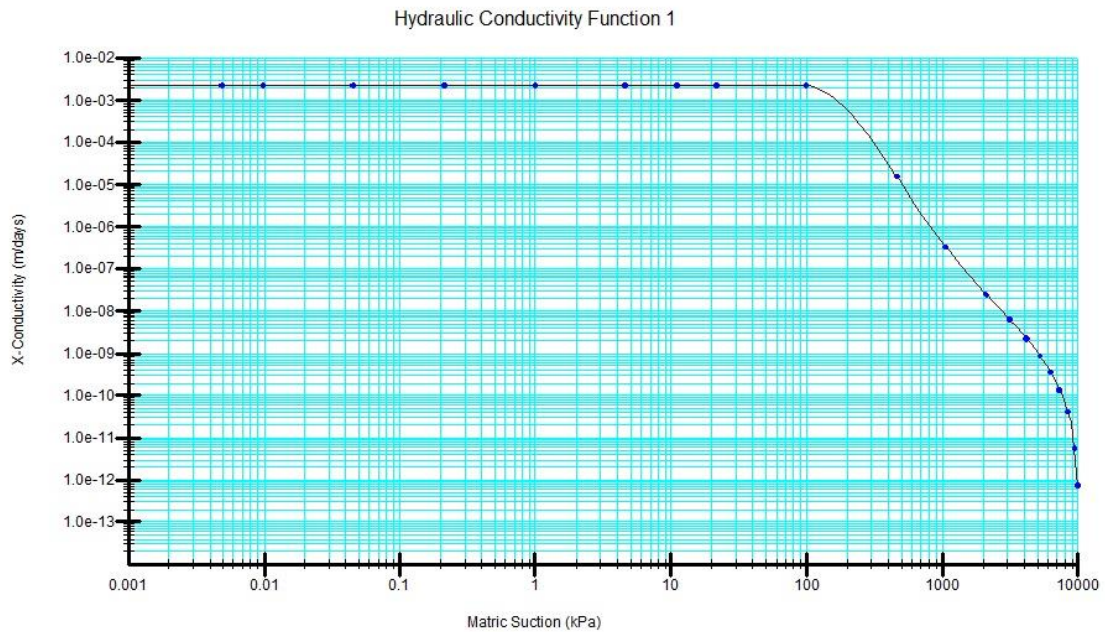
$e = 2,171828$;

y = Variável de integração que representa o logaritmo da sucção;

θ' = A primeira derivada da equação de Fredlund e Xing (1994) para a curva característica.

Desta forma, tem-se a seguir no Gráfico 10 a função de permeabilidade, que relaciona a permeabilidade com a sucção, para o solo compactado. A função de permeabilidade foi estimada por meio da curva característica e pelo coeficiente $k = 2,16 \text{ E-4 m/d}$, adotando-se um intervalo de sucção de 0 a 10000 kPa.

Gráfico 10 - Função da permeabilidade pela sucção para o solo compactado.



Pela função apresentada no Gráfico 10, como se deve esperar para altos valores de sucção o coeficiente de permeabilidade reduz significativamente por conta da presença de ar entre os vazios do solo. Esses parâmetros adotados foram utilizados em função do tipo de material.

5.1.3 Condições de contorno

As condições de contorno adotadas nas análises de fluxo transiente são referentes às variações de carga hidráulica no reservatório que ocorrem durante o enchimento e esvaziamento do reservatório.

a) Enchimento do reservatório

O enchimento da Barragem foi considerado com bases em estimativas de três anos de operação.

Figura 33 - Enchimento da Barragem com 7 dias.

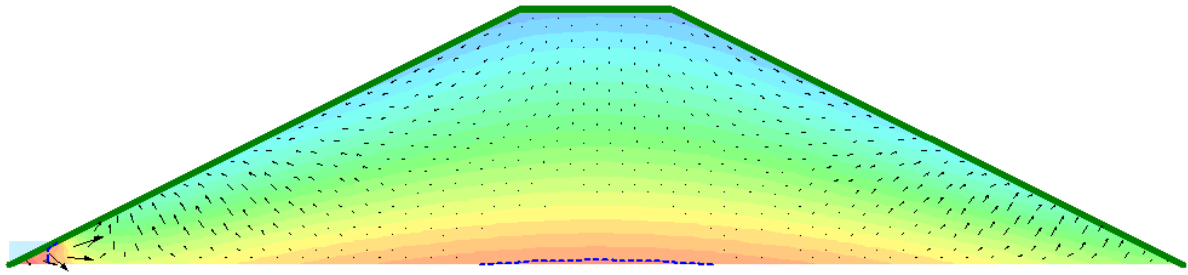


Figura 34 - Enchimento da Barragem com 35 dias.

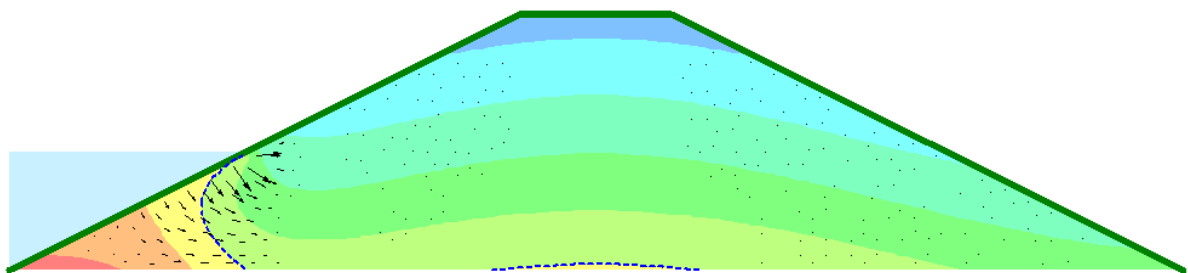


Figura 35 - Enchimento da Barragem com 63 dias.

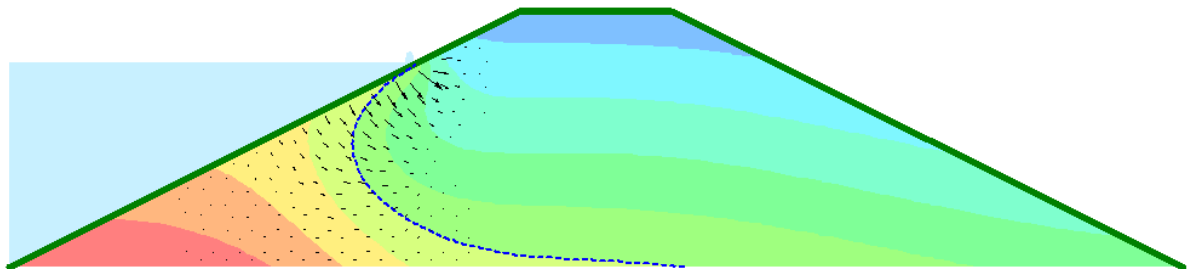


Figura 36 - Enchimento da Barragem com 210 dias

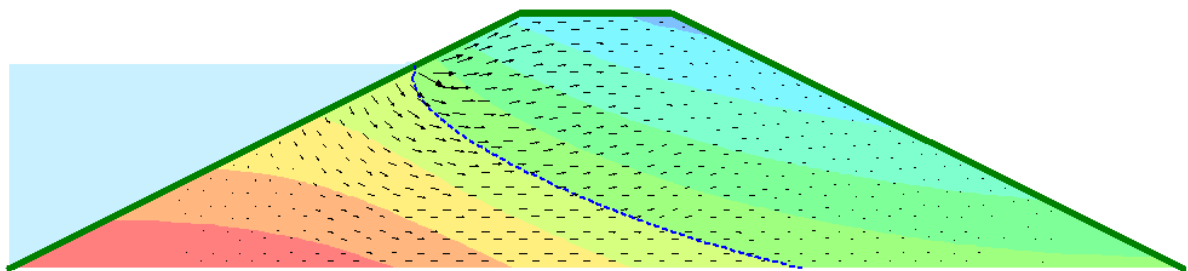


Figura 37 - Enchimento da Barragem com 360 dias.

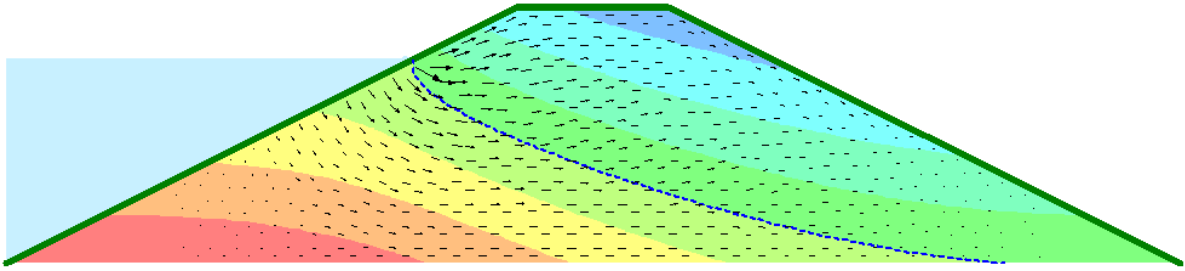


Figura 38 - Enchimento da Barragem com 480 dias.

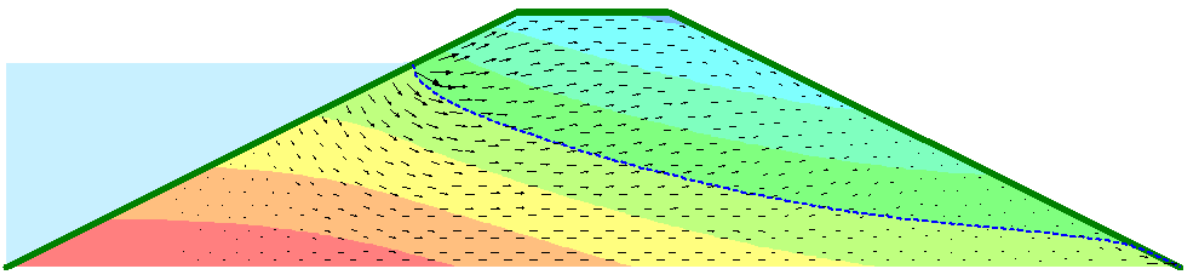


Figura 39 - Enchimento da Barragem com 600 dias.

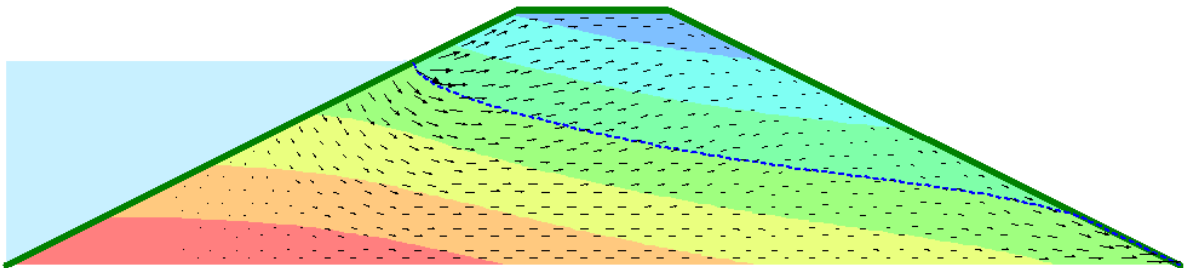
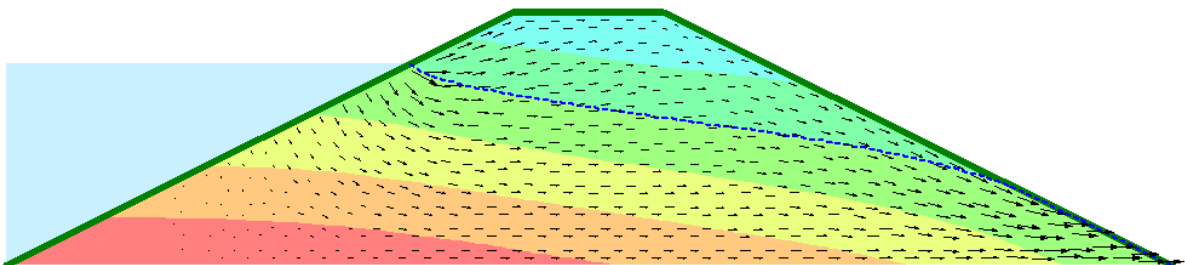


Figura 40 - Enchimento da Barragem com 1080 dias



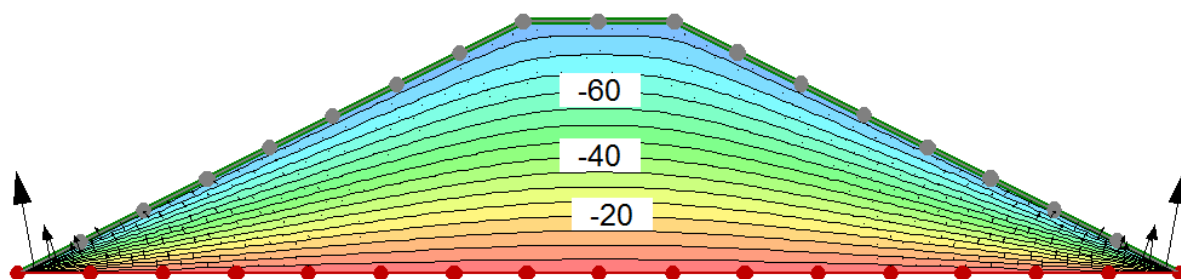
5.1.4 *Condição inicial das poro pressões*

Para a realização das análises de fluxo sob o regime transiente foi necessário se determinar a condição inicial do problema. A condição inicial é importante porque pode ter

influência significativa na solução, principalmente no início da simulação da análise transiente.

A condição inicial foi modelada ao final da construção da barragem com o reservatório vazio. Na Figura 41 é apresentada a distribuição da poro pressão na seção da barragem.

Figura 41 - Condição inicial de poropressões



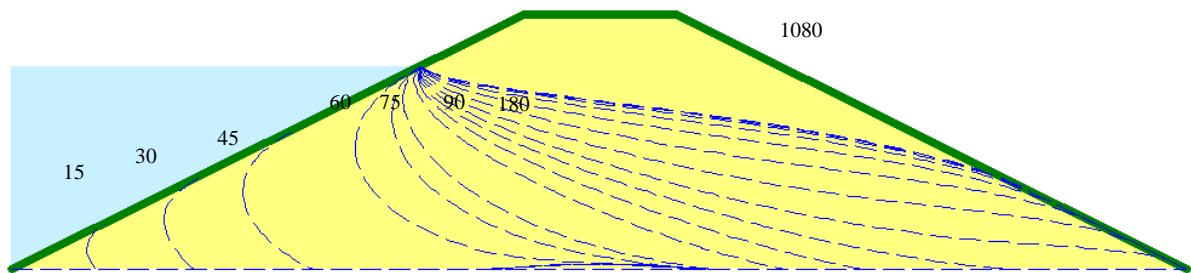
A condição inicial apresentada na Figura 41 mostra que o maciço apresenta apenas um campo de pressões negativas de poro-pressão que são distribuídos de forma linear. É importantes destacar que a condição inicial não representa de fato a verdadeira distribuição de poro-pressões no final de construção, contudo a alternativa foi adotada devido as dificuldades de se determinar a distribuição das poro pressões e também por recomendações apresentadas por Krahn (2004).

5.1.5 Simulações Transientes durante o enchimento do reservatório

As simulações transientes bidimensionais foram realizadas para um período de tempo de 1080 dias (aproximadamente três anos) de operação da Barragem. Para uma melhor observação dos resultados, a modelagem foi feita em 2 estágios, iniciando, com análises de períodos curtos de tempo (15 dias para os três primeiros meses), e o segundo, com análises mais longas de tempo (90 dias para cada análise) a modelagem foi feita com 1080 estágios que representam os 1080 dias de simulação. Desta maneira, verificaram-se as alterações de poro-pressão dia a dia e a melhor visualização no avanço da saturação presente no maciço.

A seguir, são apresentados os resultados das análises de fluxo transientes para cada dia analisado, conforme figura 42, mostrando o comportamento da linha freática.

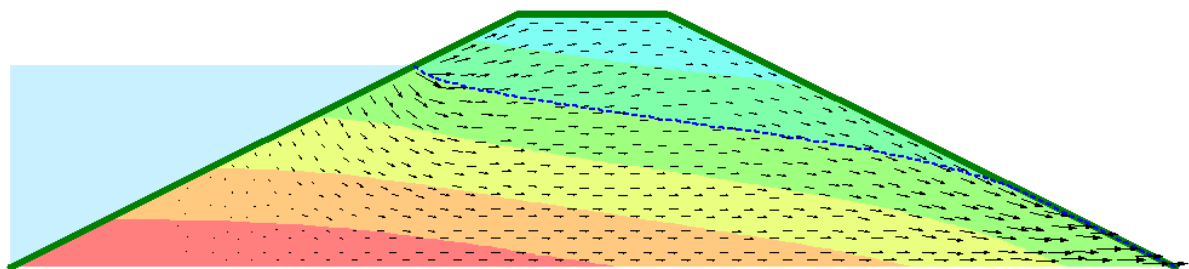
Figura 42 - Análises de fluxo transientes.



Pelas simulações realizadas, é possível observar o avanço da linha freática e da região de saturação. Os resultados mostram certo atraso do avanço da linha freática em relação ao nível do açude, sendo isto explicado devido à ocorrência da baixa permeabilidade do maciço. É importante destacar que o avanço da linha freática influenciará na estabilidade da barragem, no qual será mostrado nos estudos de estabilidades de taludes.

Também se pode observar nas simulações transientes que o avanço da linha de freática reflete a propagação da região de saturação à medida que o fluxo pela barragem preenche os vazios dos solos. Por meio da Figura 43, pode ser verificado os vetores de velocidade do fluxo pela barragem.

Figura 43 - Detalhe dos vetores de velocidades do fluxo pelo maciço.



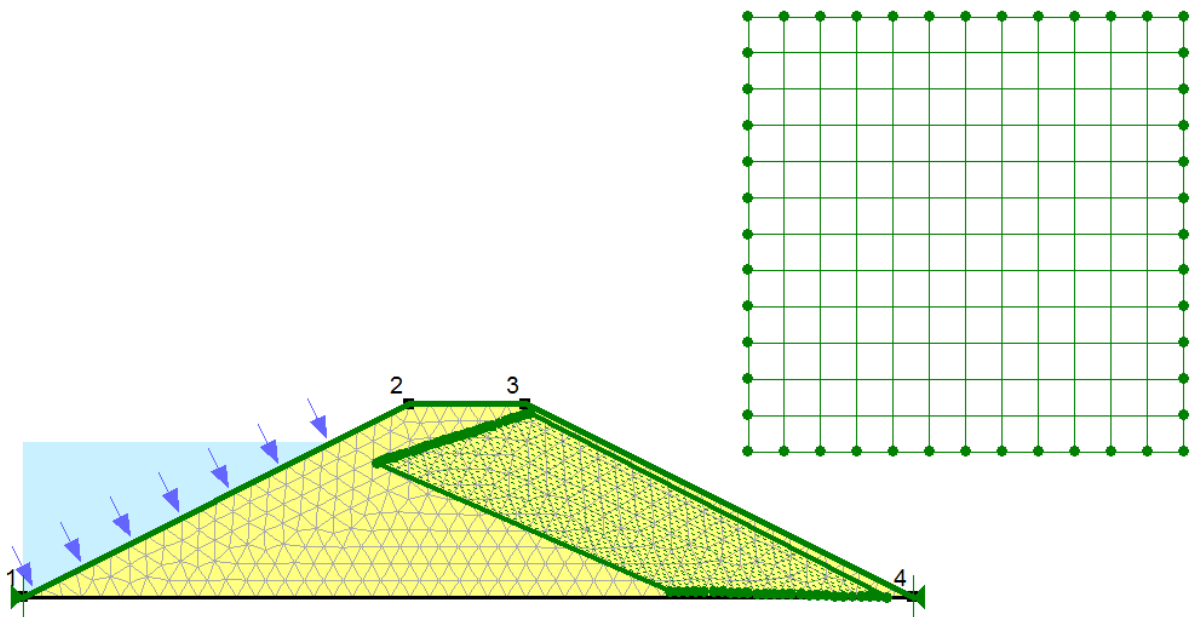
Após o enchimento por completo do reservatório ($t = 25$ meses), é verificado que a região de saturação já se estabelece quase que por completo no talude de montante. Após o período de 28 meses, a rede de fluxo se estabiliza, finalizando o avanço da linha freática.

5.2 Análise de estabilidade de taludes

5.2.1 Descrição das análises

Para a análise de estabilidade do talude de jusante, adotou-se o Método de Morgenstern Price, 1965 (superfície de ruptura circular). A malha dos possíveis centros e raios dos círculos de ruptura, necessários para o cálculo do fator de segurança está ilustrada na Figura 44. Na mesma figura, é apresentada a malha de poro-pressão de água obtida pelo programa SEEP/W e usada como parâmetro de entrada no SLOPE/W para o cálculo da estabilidade.

Figura 44 - Malha dos possíveis centros e raios dos círculos de ruptura.



Para verificar se os efeitos da sucção na estabilidade da barragem, as simulações foram realizadas pelo método tradicional em que se considera apenas poro pressões positivas na região abaixo da linha freática.

5.2.2 *Parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade de taludes*

Os parâmetros pertinentes ao estudo de estabilidade são basicamente o peso específico do material e os parâmetros de resistência (coesão e ϕ). Os parâmetros para o solo compactado foram determinados com base nos resultados de laboratório apresentados no Capítulo 4.

O ϕ^b é um parâmetro de resistência para solos não saturados que promove o acréscimo de resistência do solo conforme aumenta o campo de sucção no mesmo.

Segundo (KRAHN, J. 2004), o valor do ϕ^b pode ser estimado como a metade do valor de ϕ . Portanto, como não foi calculado o valor de ϕ^b neste trabalho, estimou-se esse valor de acordo com o ensaio de resistência ao cisalhamento ao direto realizado.

Tabela 15 - Parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade de taludes.

Material	Peso Específico (kN/m ³)	Coesão (KPa)	Ângulo de Atrito (°)	ϕ^b estimado (°)
Amostra 01	1,81	10	36	18

Fonte: Autor, 2014

5.2.3 Resultados das Análises de estabilidade durante o enchimento do reservatório

- Análises de estabilidade sem considerar a influência da sucção

As análises de estabilidades foram feitas a partir dos resultados das análises transientes de enchimento para três anos de operação. As análises durante o enchimento foram realizadas no talude de jusante, por ser o talude de maior probabilidade de deslizamento.

Nas Figuras 45 e 46, apresentam os fatores de segurança no início do enchimento e a ultima simulação (t = 36 meses), no final do enchimento.

Figura 45 - Fator de segurança no início do enchimento.

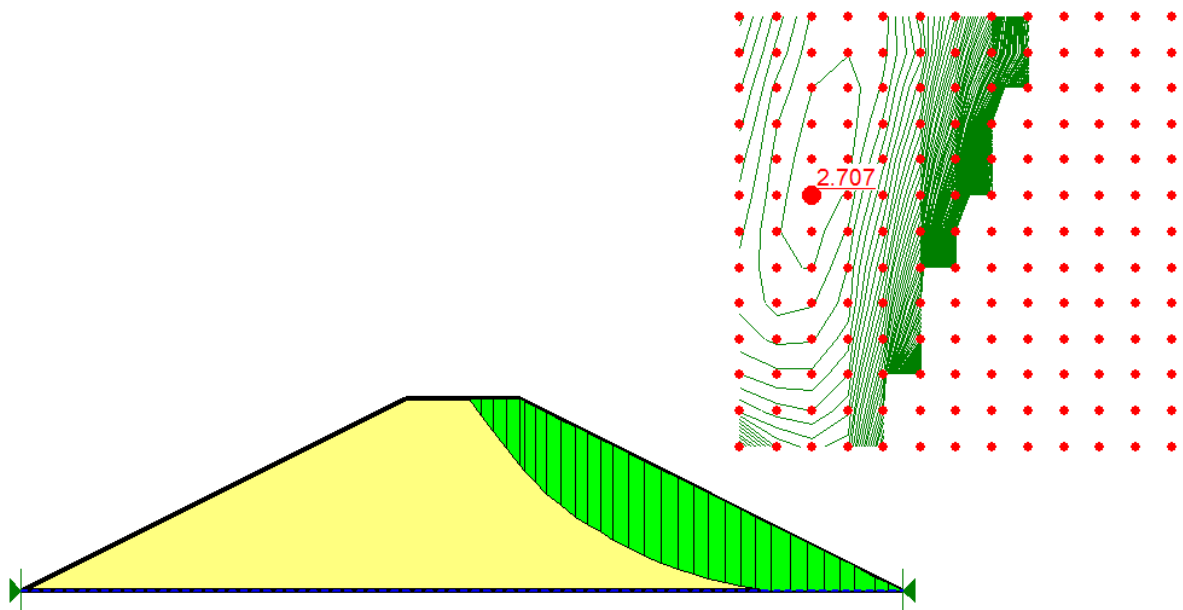
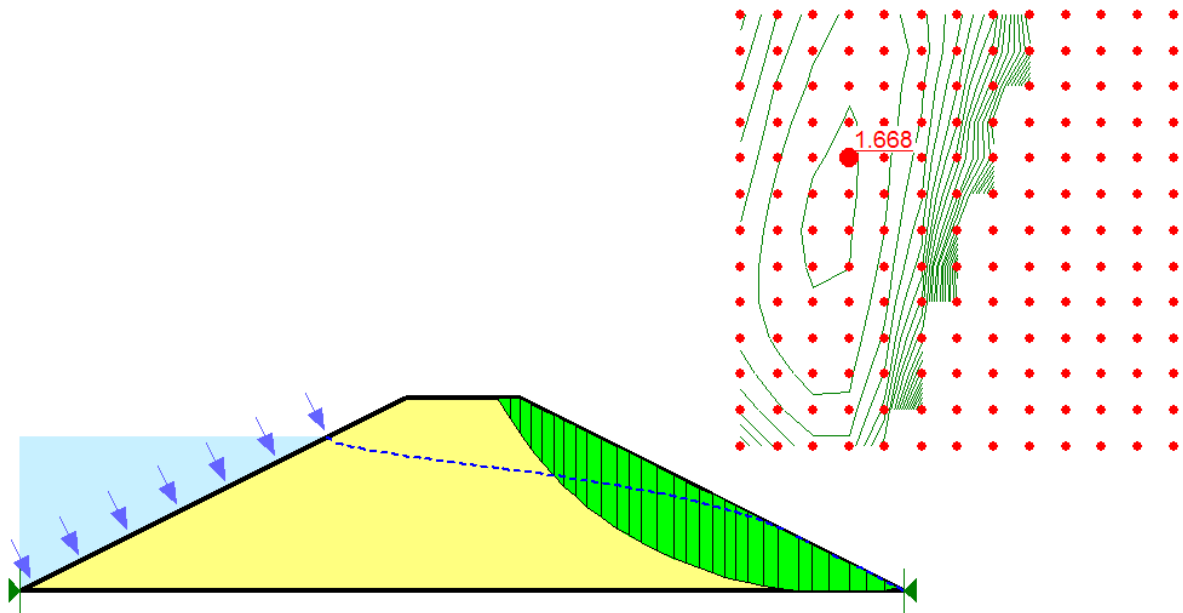


Figura 46 - Fator de segurança na última simulação de enchimento.



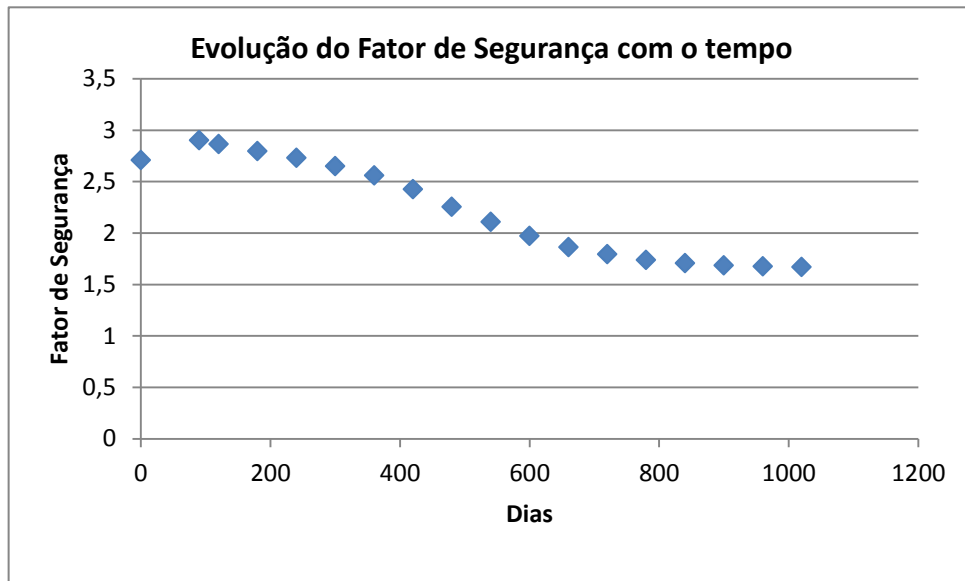
As simulações mostram que para todo o período analisado, o fator de segurança foi diminuindo gradativamente sendo influenciado pelas alterações de poro-pressão no interior do maciço.

É importante destacar que a metodologia tradicional se distancia muito do real, pois conforme ocorre à elevação do nível do açude, percebe-se de forma intuitiva que a estabilidade deveria sofrer uma redução. A variação do fator de segurança é real por causa da alteração das tensões de poro-pressão que altera o estado de tensões do maciço como um todo, influenciando inclusive nas tensões cisalhantes. Outro fator que tem influência direta na estabilidade é a variação do nível d'água no talude de montante que faz com que o talude fique submetido a diferentes solicitações, implicando também na constante alteração do estado de tensões no maciço.

Outro fato que deve ser destacado é com relação à variação do fator de segurança na estabilidade do talude de jusante para período analisado, pois ao contrário dos resultados da metodologia tradicional, é observado que ocorre uma redução significativa da estabilidade da barragem.

Para uma melhor visualização das análises de estabilidades da Barragem durante os seus três anos de operação, o Gráfico 11 mostra a evolução do fator de segurança com o tempo.

Gráfico 11 – Evolução do fator de segurança com o tempo.



Fonte: Autor, 2014.

Pelo que foi apresentado no gráfico 12, à medida que ocorre o enchimento da barragem, ocorrem alterações no campo de poro pressões internas no maciço provocadas pelo avanço da região de saturação. Como o maciço está sendo saturado, a tendência é de que ocorra o aumento de umidade no material e conseqüentemente a redução do campo de sucção. E se reduz a sucção diminui a resistência do material de acordo com a equação já mostrada anteriormente.

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a) r \tan\phi' + (u_a - u_w) r \tan\phi^b$$

Pressão da água
Pressão do ar
Sucção

Conseqüentemente se reduz a resistência do material reduz o fator de segurança como é mostrado no gráfico 12. No entanto, como a rede de fluxo também tende a se estabilizar no final, não ocorre mais variação de poro pressão no maciço, logo o fator de segurança tende também a permanecer estável.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Nesta pesquisa foi apresentado um estudo envolvendo uma série de ensaios de laboratório, como caracterização, parâmetros hidráulicos e os parâmetros de resistência dos solos, com o intuito de serem utilizados como base para a realização de simulações de fluxo e estabilidade. As principais conclusões, a partir dos resultados avaliados neste trabalho, são abordadas a seguir:

- Pela classificação SUCS, o solo é um SM, ou uma areia siltosa. As amostras apresentam a mesma classificação, porém, a amostra 02 não apresentou plasticidade. Isso se deve pela ausência de argila na amostra.

- A análise microscópica das amostras de saprolito constatou a presença de grande quantidade de minerais de quartzo, zircão (em uma das amostras) e apatita, esta, associada ao mineral de quartzo.

- O ensaio de Proctor normal obteve para amostra 01 a média dos pesos específico aparente seco máximo no valor de $1,81 \text{ kN/m}^3$ e teor de umidade ótima de 13%. Para a amostra 02, a média dos pesos específico aparente seco máximo foi no valor de $1,90 \text{ kN/m}^3$ para um valor médio de umidade ótima de 10%.

- Os ensaios de resistência ao cisalhamento sob as condições saturadas apresentaram resultados distintos. A amostra 01 apresentou valor de ângulo de atrito dentro dos valores estabelecido por Das, 2007. Já a amostra 02 apresentou um valor muito alto fora do esperado para sua classificação. Provavelmente devido às limitações do ensaio de cisalhamento direto.

- Pelas simulações de fluxo realizadas durante o período de enchimento da Barragem, foi possível determinar o avanço da região de saturação, bem como o desenvolvimento das poro pressões ao longo do período simulado.

- As análises de estabilidade referentes ao período de enchimento mostraram que ocorre a diminuição do fator de segurança de 2,71 para 1,67, conforme o enchimento do reservatório, de acordo com a metodologia tradicional, apresenta mudanças significativas à

medida que ocorre as alterações das poro pressões provocadas pelo regime transiente de fluxo.

- Um fator importante que deve ser destacado é que, se há um aumento na saturação do maciço, há uma redução na sucção e conseqüentemente ocorre o decréscimo de resistência do solo. Entretanto, o valor permanece superior ao mínimo aceitável.

6.2 Recomendações

Verificar a estabilidade durante o período de enchimento de uma barragem com base em resultados de cisalhamento direto com sucção controlada.

Determinar a influência da sucção nas tensões e deformações do maciço, por meio do emprego de métodos numéricos baseados em resultados de adensamento com sucção controlada.

Realizar estudos sobre a influência dos solos não saturados em outras obras geotécnicas (aterros, contenções, fundações, etc.) com o objetivo de se determinar metodologias menos conservadoras para o dimensionamento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SÁBER, A. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R. 1977. **Províncias Estruturais Brasileiras**. In: SBml,; **a e Enrocamento**. São Paulo, 1980.

ARTHAUD, M.H., VASCONCELOS, A.M., NOGUEIRA NETO, J.A., OLIVEIRA, F.V.C., PARENTE, C.V., MONIÉ, J.P., CABY, R., FETTER, A.H. 1998. **Main Structural Features of Precambrian Domains from Ceará (NE Brazil)**. International Conference on Precambrian and Cratons Tectonics, Ouro Preto, Abstracts, 84-85.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7181: **Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR – 06502 – **Rochas E Solos – Terminologia**/ 1995. Disponível: <<http://followscience.com/content/499552/nbr-06502-1995-rochas-e-solos>>. Acesso em: Agosto 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6508: **Determinação de massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6459 – **Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR-7180: **Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR-7182: **Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 14545 – **Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR MB 3336 – **Ensaio de Adensamento Unidimensional**. Rio de Janeiro, 1990.

BACELLAR, L.A.P. **Condicionantes Geológicas, Geomorfológicas e geotécnicas dos mecanismos de voçorocamento na bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG.** 225 p. Tese de Doutorado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

BARROSO, S.H.A. **Estudo dos solos da região Metropolitana de Fortaleza para aplicação na Engenharia Rodoviária.** Universidade de São Paulo, 2002. 253p.

BOURDEAUX, G. H. R.M. (1980). **Projeto e Construção de Barragens de Terra e Enrocamento.** São Paulo.

BOURDEAUX, G. H. R.M., Graeff, L. O. Celeri, R. O. **Saprolitos Basálticos: Uma alternativa consagrada de materiais para construção de barragens de terra e enrocamento.** In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XV, 1983, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: CBGB. p. 123-148.

BRITO NEVES. B. B. **Regionalização geotectônica do Pré-Cambriano Nordeste.** Tese de Doutorado. São Paulo, Instituto de Geociências/USP, 1975.

CAMPOS, N. B. **Dimensionamento de reservatórios.** Fortaleza: UFC, 1996. 56 p.

CAMPOS, Iberê M. **Conheça Os Três Tipos Principais De Solo: Areia, Silte E Argila.** Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura IBDA, 2009. Disponível: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=9&Cod=59>>. Acesso em: maio 2013.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações.** Vol. II. LTC Editora. SP, 1976.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica Dos Solos E Suas Aplicações – Fundamentos,** vol. 1/ 6º Edição. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1988.

CAPRONI JÚNIOR, N., ARMELIN, J. L., LIRA, E. N. S., SHIMABUKURO, M., RIBAS, J. B. M., MORI, R. T. **Fundações em solos residuais – Barragem de Corumbá I.** In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XXI, 1994, Recife. Anais... Recife: CBGB, p. 75-83.

CAPRONI JÚNIOR, N., PALOCCI, A., SHIMABUKURO, M., RIBAS, J. B. M., MORI, R. T. **Propriedades Geotécnicas dos Solos Coluvionares e Residuais do AHE Corumbá I.** In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XXI, 1994, Recife. Anais... Recife: CBGB, p. 57-64.

CARVALHO, D. **Barragens uma introdução para graduandos**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 473p, 2011.

CHOUDHURI, A. **Geoquímica para graduação**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 92p, 1997.

CRUZ, P.T. (1987). **Solos residuais: algumas hipóteses de formulações teóricas de comportamento**. Seminário em geotecnia de solos tropicais. Brasília, 33p.

CRUZ, P. T. (1996). **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto**. São Paulo, Oficina de Textos, 647p.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica / Braja M. Das / Tradução All Tasks / revisão técnica Pérsio Leister de Almeida Barros**. – São Paulo: Thomson Learning, 561p, 2007.

DE MELLO, V. F. B. **Apreciações Sobre a Engenharia de Solos Aplicável a Solos Residuais**. Tradução nº 9 - ABGE, São Paulo, 59 p, 1972.

DEERE, D. U. PATTON, F. D. **Slope Stability in Residual Soils. State of the Art Report**. In: IV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1971, Puerto Rico, Proceedings. Puerto Rico, vol. I.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / 2º Edição**. Brasília, DF: Embrapa, 2006.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**, 2001.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York, John Wiley, 1993. 517p.

FREDLUND, D. G., XING A, & HUANG, S. **Prediction the permeability funtions for unsaturated soil using the soil water characteristics curve**, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No 4, pp. 533-546, 1994.

GAIOTO, N. **Barragens de terra e enrocamento**. São Carlos: Gráfica EESC/USP, 1999.

GOLDER ASSOCIATES BRASIL. **Barragem de Rejeitos da Mineração Serra do Sossego**. Documentos de Projeto Detalhado. Belo Horizonte. (Não Publicado), 2002.

ICOLD. **Benefits and Concerns About Dams**. Julho, 1999.

IPLANCE. (1997) **Atlas do Ceará**. CD ROM. Fundação Instituto de Planejamento do Ceará, Governo do Estado.

KRAHN, J. **Stability Modeling with Slope/w 2004**, GEO-SLOPE International Ltd, 2004.

LEBERT, M. & HORN, T. **A method to predict the mechanical strength of agricultural soils**. *Soil Till. Res.*, 19:275-286, 1991.

LEME, C. R. M. **Fundação de Barragens**. In: II Encontro de Solos Tropicais. Comitê Brasileiro de Solos Tropicais – ABMS/ABGE, São Paulo, 36p, 1984.

LEME, C. R. M., **Sobre Saprolitos de Basalto**. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XIV, 1981, Recife. Anais...Recife: CBGB. p.147-161, 1981. LEMOS & SANTOS. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 53 edição revista e ampliada. Viçosa, 2005.

LIMA, S. G. **Ação do intemperismo como agente modificador de relevo**. Disponível em: <http://www.komedi.com.br/escrita/leitura.asp?Texto_ID=7774>. Acesso: Setembro de 2013.

MAFRA, J. M. Q. **Saprolitos compactados na construção de Barragens de terra e enrocamento: o caso da Barragem do Sossego**. Comitê Brasileiro de Barragens. XXV Seminário nacional de Grandes Barragens. Salvador, 2003. T92 – A25. 18p.

MASSAD, F. (2003). **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo, Oficina de Textos.

MARSAL, R. **Report on the Contributions to Session IV: Properties of Compacted Soils**. In: VI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1979, Lima. Proceedings.....Lima, Vol. III, p.318-347, 1979.

McKYES, E.; NYAMUGAFATA, P. & NYAMAPFENE, K.W. **Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe**. *Soil Till. Res.*, 29:357-366, 1994.

MORGENSTERN, N. R., PRICE, V. E., 1965, “**The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces**”. Géotechnique, v.15, n 1.

MORI, R. T. **Engineering Properties of Compacted basalt saprolites**. In: VI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1979, Lima. Proceedings.....Lima, Vol. II, (1979a).

MORI, R. T. **Properties of some typical compacted saprolites**. In: VI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1979, Lima. Proceedings.....Lima, Vol. II, (1979b).

MORI, R. T. **Propriedades de Engenharia de Solos Saprolíticos**. In: Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, 1983, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, p.125-139, 1983.

MORI, R. T., LEME, C. R. M. ABREU, F. L. R., PAN, Y. F. **Saprolitos de basalto – Um estudo de seu comportamento geotécnico em maciços compactados**. In: VI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro....Anais...Rio de Janeiro, Vol. II,1978.

MULLINS, C.E.; MacLEOD, D.A.; NORTHCOTE, K.H.; TISDALL, J.M. & YOUNG, I.M. **Hardsetting soils: Behavior, occurrence and management**. Adv. Soil Sci., 11:37-108, 1990.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F., Beligni, M. e Cincerre, J. R.,. “**Pavimentos com Solos Lateríticos e gestão de manutenção de Vias Urbanas**”. São Paulo, 2000.

ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1995. 378p.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução À Mecânica Dos Solos Dos Estados Críticos/ 3º edição**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ: Terratek, 2007.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo, Oficina de Textos, 2000. 247p.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 ed. São Paulo:Oficina de Textos, 2006.

REICHERT, José Miguel; REINERT, Dalvan José. **Propriedades Físicas do Solo**. Universidade Federal de Santa Maria, junho de 2007.

RIGO, M. L. **Mineralogia, intemperismo e comportamento geotécnico de solos saprolíticos de rochas vulcânicas da formação Serra Geral**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2005. 348p.

SANDRONI, S. S. COC739 **Barragens de Terra e Enrocamento**. Mestrado em Geotecnia. COPPE/UFRJ, 1989.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C.; **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 5a ed. Revista e ampliada Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.il

SIBCS, **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 306 p. il.

SOARES, V.. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros**. 112p. Dissertação de mestrado - Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, 2011.

STEPHENS, T. 1991. **Handbook on small earth dams and weirs – A guide to siting, design and construction**. Bedfordshire, UK, Cranfield Press.

TEIXEIRA, W.; MOTA, C.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo, SP: editora USP, 2000.

TERZAGHI, K. and PECK, R. B. **Soil Mechanics in Engineering Practice**, 2nd edn.. John Wiley, New York, London, Sydney, 1967.

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS, **Engineering And Design - Earth And Rock-Fill Dams - General Design And Construction Considerations**. . Washington, 1994.

VARGAS, M. **Some Engineering Properties of residual clays soils occurring in southern Brazil**, In: III International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Zurich, Proceedings. Zurich, 1953. Vol I.

VARGAS, M. **Prolegômenos para uma futura Mecânica das Rochas Decompostas**. In: III Seminário Nacional de Grandes Barragens, São Paulo ...Anais....São Paulo, 1964.

VARGAS, M. **Residual Soil Sampling**. In: VII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering – Specialty Session nº 1 on Soil Sampling. Proceedings. Melbourne, 1969.

VARGAS, M. (1977). **Introdução à Mecânica dos Solos: Segunda parte, Hidráulica dos solos**. McGraw Hill.

VARGAS, M. **“Introdução à Mecânica dos Solos”**. Editora McGRAW-HILL do Brasil LTDA, 1978.

VAUGHAN, P. R. Design and construction with wet fills. Publicação da ABMS, Núcleo Regional de São Paulo, 1982.

VIEIRA, V. P. P. B. et al. **Roteiro para projeto de pequenos açudes**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1996. 160 p.

Disponível em < Fonte: <http://rodoviasverdes.ufsc.br> >. Acessado em: 15/01/2014 as 14:42.56 .

Disponível em < Fonte: <http://edafologia.ugr.es> >. Acessado em: 20/01/2014 as 15:36.43.