

## 4

### ESTUDOS REALIZADOS E METODOLOGIAS ADOTADAS

Neste capítulo serão evidenciados os estudos realizados, abrangendo as respectivas metodologias para o desenvolvimento dessa dissertação.

O estudo foi realizado em duas etapas. A primeira refere-se à visita ao local do Corte 1, onde foram realizadas coletas de amostras de solo, com as respectivas descrições morfológicas. A segunda refere-se aos trabalhos desenvolvidos nos laboratórios de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio, EMBRAPA SOLOS e Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ, abrangendo ensaios de caracterização; ensaios mineralógicos; análises químicas; obtenção das curvas características; ensaios de erodibilidade; ensaios especiais para a determinação de parâmetros de resistência e de compressibilidade.

#### 4.1.

##### Coleta de Amostras

Em 20 de março de 2004 foi realizada uma visita ao campo, afim de que fossem realizados trabalhos para coleta e descrição do maciço de solo no seu ambiente natural.

Inicialmente foi feita uma avaliação do maciço terroso do Corte 1, nos locais onde ocorreram escorregamentos, com o intuito de se escolher pontos para coleta de amostras que representassem as várias camadas do talude. Para tanto foi feita uma avaliação tátil-visual quanto à estrutura do maciço, que aliada às informações advindas de dados de sondagens fornecidos pela empresa responsável pela obra, foram indispensáveis para se determinar os pontos de abertura de poços para retirada de amostras indeformadas.

Observou-se que o maciço de solo do Corte 1 é composto, em sua maior parte, por solos provenientes de alteração de basalto, cuja textura varia de basaltos afaníticos vesículo-amigdaloidais até diabásios de granulação média. Observou-se também a presença de fraturas sub-horizontais, sub-verticais e inclinadas no solo residual, possivelmente herdadas da rocha mãe, como pode ser visto nas figuras 8 e 9.

Por vezes, no topo do maciço notava-se a presença de uma camada de solo coluvionar ou vestígio de um capeamento antigo, apresentando uma espessura máxima de aproximadamente 5 m (Figura 10). A presença de blocos de arenito (Figura 11) com espessura máxima de 2 m, exibindo fraturas sub-horizontais e sub-verticais, também fazia parte da paisagem local.



Figura 8 – Fratura inclinada apresentando estrias de fricção no talude de solo residual.



Figura 9– Compartilhamentos de fraturas sub-horizontais e sub-verticais no solo residual jovem.



Figura 10– Solo coluvionar ou vestígio de capeamento antigo.



Figura 11- Arenito apresentando descontinuidades sub-horizontais e sub-verticais.

Após esta etapa, com base na avaliação tátil-visual mencionada, foram escolhidos quatro pontos denominados de PIC (Poço de Inspeção e Coleta) para a retirada de amostras de solo, como mostra a figura 12. As coordenadas destes poços foram marcadas através de um GPS de bolso, MAP 76S da marca Garmin, de maneira que se surgisse à necessidade de coleta de outros blocos, estes seriam de locais circunvizinhos aos da primeira amostragem, tentando então garantir a similaridade entre amostras.

A tabela 8 mostra o estaqueamento em relação ao traçado da ferrovia dos quatro poços de coleta, bem como suas respectivas cotas e denominações atribuídas a estes solos. O Levantamento altimétrico foi obtido através de levantamento topográfico realizada pela equipe de topografia da empresa responsável pela obra.

O procedimento para a amostragem de solos consistiu na escavação de poços de 2,0 x 2,0 m de área tendo-se o cuidado de proceder uma escarificação dos locais antes da amostragem.

Feito isso, eram retiradas amostras indeformadas na forma de blocos cúbicos de dimensão de 15 x 15 x 15 cm, os quais eram embalados seguindo a metodologia do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio. Os blocos embalados foram etiquetados, com numeração e orientação destes em relação ao eixo da Ferrovia, da Rodovia Belém-Brasília e de uma cortina atirantada existente no local.

O transporte para o laboratório da PUC-Rio foi feito com as amostras acondicionadas em caixas com serragem para evitar perturbações. No laboratório, as amostras foram armazenadas em câmara úmida até a sua utilização.



Figura 12- Corte 1, Emboque Sul, LD – Locais de onde foram retirado amostras.

Tabela 8 - Localização dos poços de coleta e inspeção.

PIC	Poço 1	Poço 2	Poço 3	Poço 4
<b>Denominação Atribuída</b>	SC	SR1	SR2	SR3
<b>Estaca Ferrovia (km + m)</b>	229 + 225 LD	229 + 113 LD	229 + 112 LD	229 + 75 LD
<b>Cota (m)</b>	192	183	178	172
<b>Coordenada GPS</b>	N 0226893 9273906	N 0226954 9273976	N 0227002 9273974	N 0227002 927390

As características morfológicas dos solos para cada poço de inspeção são:

- Poço 1, possivelmente um capeamento antigo ou material coluvionar. Apresenta uma coloração marrom avermelhada de textura arenosa, por vezes, surgiam pequenas raízes - Solo coluvionar (SC);
- Poço 2, corresponde a uma transição de solo coluvionar com solo residual de basalto com textura vesículo-amigdaloidal. O solo assemelha-se a uma argila rija fraturada, de coloração roxa com pigmentos esbranquiçados (amígdalas intemperizadas). Por vezes, apareciam amígdalas de tamanho maior que os pigmentos esbranquiçados, mas com preenchimento de coloração creme que nem sempre preenchiam as vesículas integralmente. As fraturas verificadas nesta camada apresentavam-se sub-horizontais, inclinadas e sub-verticais, macroscopicamente lisas, além de estarem preenchidas com material ferruginoso de coloração avermelhada a preta - Solo residual 1 (SR1);
- Poço 3, corresponde a um solo residual de basalto de textura amigdaloidal argiloso de coloração avermelhada, com amígdalas esbranquiçados e/ou amareladas. Esta camada também apresentava fraturas preenchidas por material de coloração preta; Notava-se também a presença de material esverdeado, na forma de veios e/ou amígdalas - Solo residual 2 (SR2);

O material preenchimento de coloração preta já havia sido percebido por Tanaka (1976) em solos residuais de basalto provenientes da fundação da Barragem de São Simão, e foram apontados como sendo óxidos de manganês.

Deve-se acrescentar, que as fraturas horizontais presentes nesta camada se apresentavam ligeiramente inclinadas para o eixo do corte da ferrovia, sendo que o espaçamento entre fraturas variava; chegando a possuir no mínimo 1 cm.

Existiam também fraturas sub-verticais e inclinadas, porém o espaçamento entre estas se mostrava maior do que os das fraturas sub-horizontais.

- Poço 4 , corresponde a um solo proveniente de um diabásio de granulação média, predominantemente siltoso com coloração marrom acinzentada mostrando fenocristais de feldspatos alterados de coloração amarelada. Foi verificado que o solo apresentava um sistema de fraturamento similar aos encontrados no poço 2, em que as fraturas se mostravam preenchidas com um material de coloração preta - Solo residual 3 (SR3).

Com base nas características morfológicas das amostras coletadas, observações de campo e sondagens disponíveis; se propõe um perfil esquemático da distribuição dos solos para o “Corte 1”, como mostra a figura 13.

A figura 14 apresenta um croquis do perfil longitudinal do eixo da Ferrovia no “Corte 1”, com a distribuição dos solos em estudo, bem como com os níveis d’água coletados através de dados de sondagens da área, cedidos pela empresa responsável pela obra. É importante ressaltar que a área do presente estudo está localizada a partir do encontro da Rodovia Belém-Brasília (BR – 010), ou seja, à direita do encontro da BR-010 com o corte em estudo (Sentido crescente de quilometragem).

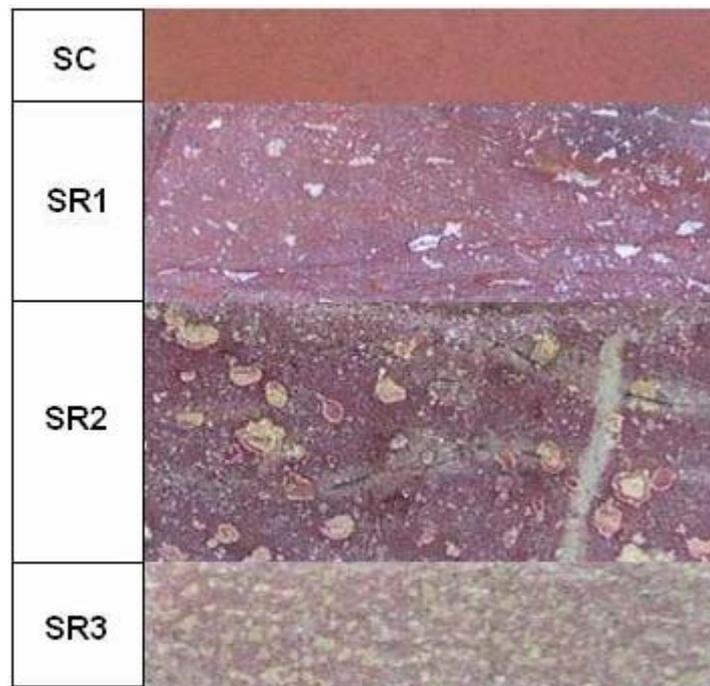


Figura 13 – Perfil esquemático da distribuição dos solos

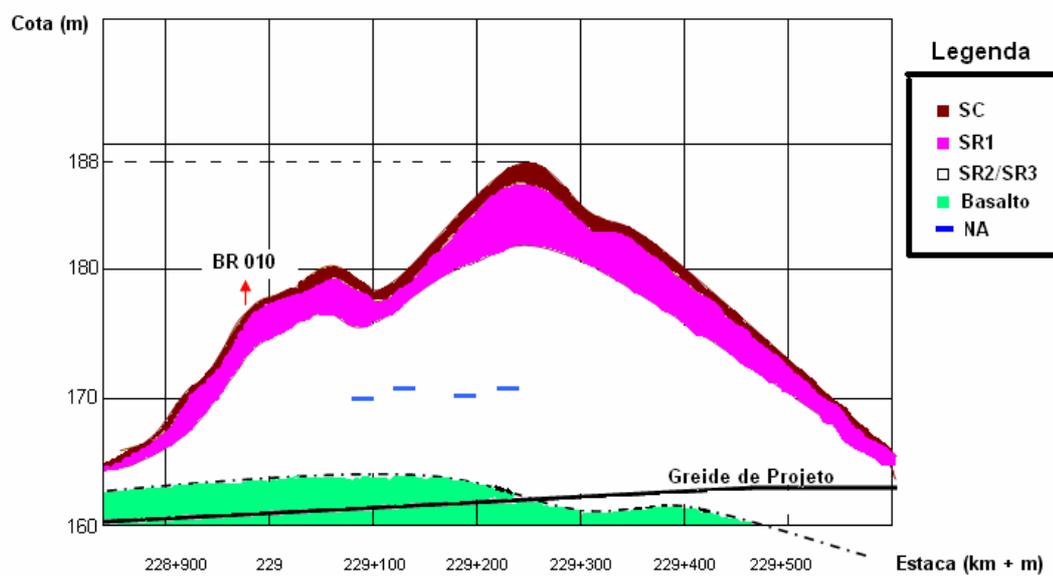


Figura 14 – Croquis do perfil longitudinal do eixo da Ferrovia no “Corte 1”, com a distribuição dos solos em estudo, bem como com as cotas dos níveis d’água.

## **4.2. Ensaio de Laboratório**

### **4.2.1. Determinação de Índices Físicos**

Durante a etapa inicial do estudo, foram determinadas em laboratório as curvas granulométricas, os limites de Atterberg, assim como a massa específica real dos grãos dos tipos de solo estudados.

Tanaka (1976), Futai (2002) e muitos outros autores afirmam que a utilização de índices físicos para a caracterização de solos sedimentares dá boas indicações do comportamento de engenharia, tanto para massa deformada, como indeformada.

Para solos residuais indeformados, muitos autores têm mencionado o valor limitado dos ensaios de caracterização (granulometria e limites), principalmente quando conservam características da rocha de origem. Características como o espaçamento, a orientação e o grau de fraturamento de solos residuais devem ser consideradas para a definição de novos índices.

Para os solos residuais deformados Cruz (1969), Jimenez-Quinones e Deere (1967) apud Tanaka (1976), têm demonstrado que a determinação de propriedades físicas usuais tem sido úteis para dar indicação do comportamento mecânico.

Segundo Sowers (1967), Souza Neto & Lacerda (2001), entre outros, os limites de consistência e os das análises granulométricas usuais estariam mais bem relacionados com a mineralogia, bem como ao ambiente de intemperismo. Solos provenientes de rochas ácidas, tal como os gnaisses, tendem a ser menos argilosos do que os provenientes de rochas básicas, tal como os basaltos. Já os índices de vazios estariam mais bem relacionados com a estrutura do solo.

A seguir descreve-se a metodologia utilizada para os ensaios de caracterização.

#### 4.2.1.1. Ensaio de Caracterização

Foram realizados ensaios para os 4 tipos de amostras de solo em estudo Análise Granulométrica, Limites de Liquidez, Limites de Plasticidade e Massa Específica Real dos Grãos.

Os procedimentos para a execução de tais ensaios foram desenvolvidos de acordo com as seguintes recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade
- NBR 6508/1984 – Massa Específica Real dos Grãos

É importante ressaltar, que o procedimento adotado referente à análise granulométrica foi adaptado, tendo em vista que o contido na ABNT recomenda a realização de ensaios de sedimentação e massa específica real dos grãos com material passante na peneira de 2 mm (#10); e o realizado se deu através do material passante na peneira de 0,42 mm (#40).

O procedimento de lavagem, tanto para o material retido na peneira de 0,42 mm (#40), como para o material proveniente do ensaio de sedimentação foi realizado com água potável a baixa pressão com o auxílio da mão do operador, em que se realizavam movimentos suaves e circulares contra a peneira.

A determinação dos pesos específico ( $\gamma_t$ ) do estado natural foi realizada através de ensaios que utilizaram amostras indeformadas, onde era possível aferir o volume das amostras. A umidade inicial das amostras ( $\omega_i$ ) foi determinada através de cápsulas com material deformado proveniente do processo de moldagem. O índice de vazios ( $e$ ), o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), bem como o grau de saturação ( $S$ ) foram obtidos a partir de correlações encontradas na literatura clássica de Mecânica dos Solos.



Os autores ainda mencionam que, “Apesar da importância da mineralogia, o maior problema em se estabelecer correlações, que levam em conta os aspectos mineralógicos, é a pouca quantidade de dados existentes na literatura, uma vez que não se trata de ensaios rotineiros nos laboratórios de mecânica dos solos”.

Mitchell (1993) considera que o tipo de argilomineral se constitui como um parâmetro controlador do tamanho, forma e características superficiais das partículas de um solo. O mesmo ainda considera estes fatores determinantes na expansibilidade, na plasticidade e na resistência do solo.

Assim sendo, neste trabalho se procedeu à análise das diversas frações dos solos.

#### Análise Mineralógica das areias

Teve como objetivo identificar os principais componentes mineralógicos da fração areia, abrangendo minerais primários e secundários (óxidos e hidróxidos de ferro), além da descrição dos seus hábitos.

Assim, foi coletada a fração passante na peneira 0,84 mm (#20) e retido na peneira 0,42 mm (#40), este material então era lavado utilizando o mesmo procedimento de lavagem mencionado no ensaio de granulometria. A seguir, as amostras foram analisadas utilizando-se lupa binocular, disponível no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio.

#### Difratogrametria de Raios-X

Teve como objetivo identificar os principais componentes mineralógicos das frações argila e silte. As frações silte e argila foram obtidas através do método de sedimentação.

O material argiloso coletado foi inicialmente seco em estufa a uma temperatura inferior a 60°C. Quando este se apresentava com aspecto pastoso, era então colocado em lâminas de vidro, e orientado através de uma lâmina auxiliar, e então seco ao ar.

O silte foi coletado através do método de sedimentação, com amostra de solo contendo apenas a fração passante na peneira 0,074 mm (#200). A metodologia na confecção da lâmina de silte foi à mesma utilizada para a de argila.

Parte das lâminas de silte e argila do solo SR3 foram saturadas com etilenoglicol. Para tanto as amostras foram colocadas em dessecador de vidro contendo etilenoglicol. Este ensaio é utilizado na identificação de argilomineral expansivo.

Para as análises utilizou-se o equipamento de difração raios-X modelo D5000, marca Siemens pertencente ao Laboratório de Difração de Raios-X do DCMM da PUC-Rio.

#### Lâminas Delgadas de Solo e rocha

Foram confeccionadas lâminas delgadas dos 4 solos estudados, além de lâminas da rocha básica pertencente ao perfil e do arenito que por vezes surgia no corte.

As lâminas foram preparadas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ.

O procedimento consistiu basicamente no desbaste mecânico de amostras indeformadas previamente secas e lentamente impregnadas com araldite e corante azul, resultando numa espessura final da ordem de 30µm. O corante azul foi utilizado com o intuito de se visualizar o espaço poral das lâminas.

Deve-se acrescentar que eventuais irregularidades nas lâminas podem ocorrer no período de confecção; como a presença de vazios (bolhas) provocada pela perda de algum mineral no momento de desbaste mecânico, fissuras que podem ser decorrentes devido ao processo de secagem das amostras, bem como problemas referentes à impregnação do corante. Tais irregularidades podem contribuir para erros na interpretação.

As amostras foram analisadas em conjunto com especialistas na área de petrografia nos Laboratório de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ e Laboratório do DCMM da PUC-Rio. As fotomicrografias, que serão apresentadas nesta dissertação foram obtidas fazendo-se atravessar luz natural e polarizada nas lâminas de solo e rocha em estudo utilizando um microscópio pertencente ao Laboratório do DCMM da PUC-Rio. Os aumentos utilizados foram de 25 vezes, 50 vezes e 100 vezes.

#### **4.2.3. Caracterização Química**

As análises químicas em amostras de solos pertencentes a perfis de alteração vêm sendo rotineiramente utilizadas quando se deseja conhecer o grau de alteração de cada camada que compõe o perfil, além dos reflexos dessas alterações no comportamento de certos parâmetros mecânicos.

No caso da presente dissertação a caracterização dos solos se torna mais significativa por tratar-se de um perfil desenvolvido de rocha básica, pouco estudado no país. Assim, as amostras de solo foram submetidas a dois métodos de análise química, os quais estão descritos abaixo.

#### Análise Semiquantitativa

Essas análises foram feitas no Laboratório de Fluorescência e Difração de raios X do Depto. de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro em amostras dos solos residuais SR1, SR2, SR3 e amostra de rocha de diabásio retirada do perfil em estudo.

Foram realizados ensaios de fluorescência e difração de raios x, com o intuito de se verificar a composição química dos materiais por análise semiquantitativa, através de Espectrômetro de Fluorescência de raios X Philips PW2400, com tubo de Rh. O software utilizado para as análises semiquantitativas foi o Squant14, desenvolvido pela Philips e que acompanha o equipamento.

A perda ao fogo foi determinada através da obtenção do peso da amostra, antes e depois da mesma ser levada a 950°C por meia hora. Os elementos foram detectados a partir da fusão de pó do material misturados com fundente tetraborato de lítio. As condições analíticas para a dosagem dos elementos presentes nas amostras foram: detectores selado e de fluxo, cristais analisadores PET, Ge, PX1, PX3 e LIF200 e potência do tubo 24 Kv e 90 mA ou 50 Kv e 50 mA, dependendo do elemento químico detectado. Os erros analíticos para os elementos maiores (> 0,1% em peso) não é superior a 1% e para os elementos traços (< 0,1% em peso) não ultrapassa 10%.

#### Análise por Ataque Sulfúrico e Complexo Sortivo

Nessas análises apenas os minerais secundários como argilominerais, óxidos cristalinos de ferro e de alumínio e amorfos são decompostos. Esses minerais são os representantes principais das frações finas dos solos e principais responsáveis pela sua atividade. Pelo ataque sulfúrico determinam-se os teores de óxidos de sílica, alumínio, ferro e titânio expressos em g/kg; enquanto que o complexo sortivo se refere à presença de cátions trocáveis existentes nos solos, sendo os resultados expressos em cmol/kg.

Os ensaios referentes às análises químicas foram realizados no Centro Nacional de Pesquisa de Solos CNPS/EMBRAPA. As análises realizadas na CNPS/EMBRAPA seguiram as metodologias apresentadas no Manual de Métodos de Análise de Solo (CNPS/EMBRAPA, 1997), e foram realizadas em amostras do solo coluvionar (SC), solo residual 1 (SR1), solo residual 2 (SR2) e solo residual 3 (SR3).

Também foram determinados o pH, objetivando determinar a acidez dos solos em estudo.

#### 4.2.4. Curva Característica

Para uma análise mais realista das condições de fluxo e infiltração de águas em taludes não saturados, é de fundamental importância um conhecimento prévio da sucção, bem como a sua variação com o teor de umidade.

Segundo Marinho (1997), a sucção pode ser definida como a pressão isotrópica da água intersticial, fruto das condições físico-químicas, que faz com que o sistema água – solo absorva ou perca água dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação.

Marshall (1959), apud de Campos et al. (1992), sugere que só duas componentes devem ser consideradas para definir a sucção total de um solo não saturado, ou seja:

$$St = S_m + S_{om}$$

onde,  $St$  = sucção total

$S_m$  = sucção mátrica

$S_{om}$  = sucção osmótica

A sucção osmótica está associada à ocorrência de diferença de solutos no solo.

A sucção mátrica engloba a sucção capilar, que está relacionada com o nível macro-estrutural do solo; e a sucção de adsorção, associada ao nível micro-estrutural, ou seja, de hidratação dos minerais argílicos.

A curva característica de sucção define a relação entre o conteúdo de umidade gravimétrica,  $w$ , ou conteúdo de umidade volumétrico,  $\theta$ , ou o grau de saturação,  $S$ , e a sucção.

de Campos et al. (2002), Marinho (1994, 1997), Hernandez (2004), apresentam diversas técnicas para se obter a curva característica, bem como os procedimentos utilizados, além de suas respectivas vantagens e desvantagens.

Segundo de Campos et al.(2002), para se obter a curva característica de sucção é importante que se parta de uma condição de umidade natural do solo.

O mesmo autor conclui que procedimentos, os que utilizam a saturação ou a secagem prévia do solo podem induzir a respostas não representativas, já que tais técnicas modificariam a estrutura dos solos.

Para se obter uma avaliação dos solos em estudo quanto à curva característica optou-se pela realização do ensaio aplicando a metodologia do papel filtro, o qual, segundo Hernandez (2004) e Marinho (1994), tem se mostrado bastante eficiente.

Segundo Fredlund (1979), Edil e Motan (1984), Hernandez (2004), o comportamento de solos não saturados em condições naturais depende basicamente da sucção mátrica.

#### **4.2.4.1. Metodologia Utilizada**

Segundo Marinho (1997), o método do papel filtro baseia-se no princípio de que quando um solo é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de absorver água, a mesma irá passar do solo para o material poroso, até que o equilíbrio seja alcançado. O estado de equilíbrio do sistema (papel filtro + solo) fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém com umidades diferentes. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção da correta sucção.

Para os ensaios de sucção pelo método do papel filtro realizados nesta dissertação, foram utilizados papéis da marca Whatman N°42 cortados no mesmo diâmetro das amostras de solo retiradas de blocos indeformados.

Estas foram moldadas em anéis bizelados de metal com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, os quais permaneciam com a amostra durante todo o ensaio.

O procedimento de moldagem, bem como a coleta de dados referentes a cada amostra, seguiu a mesma rotina apresentada em ensaios de cisalhamento direto drenado. Para a obtenção da curva característica, foram moldados em média 8 anéis para cada tipo de solo em estudo. Ressalta-se que grande parte das amostras dos solos residuais SR1, SR2 e SR3 apresentavam fraturas subhorizontais conforme mostra a figura 15.

De acordo com a umidade natural de cada amostra, estas eram secas ou umedecidas dependendo do ponto da curva que a amostra em questão iria representar.

É importante ressaltar que, durante o processo de secagem em amostras de SR2 e SR3, a partir de aproximadamente 20 horas notava-se a redução de volume de tais amostras (Figura 16), bem como o aparecimento de trincas na superfície (figura 17). O volume modificado foi quantificado através de paquímetro.

Bastos et al. (1998) na secagem de amostras em solo argilo siltoso cinza com presença acentuada de argilominerais expansivos do Município de Paulista-PE, verificou que, com cerca de 24 horas de secagem, os corpos de prova apresentavam fissuras, além da redução de volume.

O processo de secagem se deu através de secagem natural ao ar, enquanto que o processo de umedecimento foi através de inserção de água destilada por meio de pipeta graduada, fazendo-se percolar água nas duas faces das amostras de maneira igualitária.

Quando as amostras eram submetidas ao processo de umedecimento, estas eram então envolvidas com plástico tipo PVC, e isoladas em caixa de isopor de 10 cm de espessura durante 2 dias de maneira que se pudesse garantir a equalização de umidade nessas amostras.

O papel filtro com o auxílio de pinça e luvas cirúrgicas era então posto em contato com as superfícies planas de solo em cada amostra. Tal procedimento é utilizado para a obtenção de sucção mátrica.

As amostras foram embrulhadas em plástico tipo PVC e papel alumínio, e então colocadas em uma caixa de isopor, que era lacrada durante 15 dias, tempo este considerado suficiente para que as amostras atingissem o equilíbrio de sucção.

Decorrido o tempo de equilíbrio, os papéis filtros foram retirados do embrulho e pesados em balança com capacidade de leitura de 0,0005g durante intervalos de 10 segundos até 2 minutos, e a partir disso, em intervalos de 15 segundos até 3 minutos.

Os papéis então eram secos em estufa a 105°C durante 24 horas.

Os papéis secos em estufa passaram pelo mesmo procedimento de pesagem mencionado acima.

É importante ressaltar que cuidou-se para que o tempo de transferência do papel retirado do embrulho ou da estufa para as pesagens não ultrapassasse 5 segundos.

A umidade do papel foi obtida e, com uso das curvas de calibração de Chandler et al. (1992) a sucção foi determinada.

A umidade final do solo também foi calculada, a fim de obter a curva característica para os 4 tipos de solo em estudo.



Figura 15 – Amostras com fraturas sub-horizontais dispostas aleatoriamente.



Figura 16 - Amostras de SR2 apresentando redução de volume após secagem.



Figura 17 – SR2 apresentando trincas, após secagem ao ar.

#### 4.2.5. Erodibilidade

Em virtude da ocorrência de uma série de sulcamentos ao longo do corte em estudo, houve o interesse em avaliar o grau de erodibilidade dos horizontes ou camadas de solo presentes no talude, na tentativa de correlacionar tais resultados com observações feitas em campo.

Segundo Bastos et al. (1998), a erodibilidade é entendida como a propriedade que retrata a facilidade com que partículas do solo são destacadas e transportadas. O mesmo autor alega que ainda são insuficientes os esforços para o entendimento e quantificação do potencial a erosão através de propriedades do comportamento estabelecidas pela Mecânica dos Solos. Tal afirmação é atribuída a fatores como a complexidade dos mecanismos envolvidos no processo de erosão hídrica (mobilização, destacamento, transporte e deposição de partículas e / ou agregados), bem como a vários fatores externos que condicionam a intensidade da ação erosiva (erosividade da chuva, geometria da encosta, cobertura vegetal...); além de um grande número de fatores intrínsecos do solo que condicionam sua erodibilidade (textura, mineralogia, cimentação, estrutura, sucção).

Santos (1997) realizou ensaios de erodibilidade em amostras representativas dos perfis de alteração presentes na região de Goiânia.

Os ensaios realizados pelo autor compreenderam em ensaios de pinhole, ensaios de Inderbitzen e ensaios de desagregação, para todos os ensaios foram utilizadas amostras indeformadas. O procedimento do ensaio de pinhole adotado por Santos (1997) pode ser encontrado no Projeto 02:004.02-022 (1996) da ABNT, já no ensaio de Interbidzen adotou o procedimento descrito por Fácio (1991).

Segundo Fonseca & Ferreira (1981) e Santos (1997), ensaios de desagregação representam um bom índice qualitativo na previsão do comportamento dos solos frente aos esforços erosivos.

de Araújo (2000) e Ramidan (2003) estudaram o comportamento erosivo de perfis de solo. O primeiro estudou um perfil de solo localizado na Formação Macacu, considerada como representante do Grupo Barreiras, já o segundo estudou um perfil localizado a jusante da ombreira direita da UHE de Itumbiara-GO. Ambos autores descrevem alguns métodos de avaliação da erodibilidade em solos.

Foram realizados ensaios de desagregação em amostras indeformadas dos solos em estudo, visto que diversos autores o descrevem como um ensaio simples e com resultados qualitativos coerentes com outros ensaios de erodibilidade como o de Inderbitzen.

#### **4.2.5.1. Metodologia do Ensaio de Desagregabilidade**

Para a realização dos ensaios de desagregação foram moldados para cada tipo de solo corpos de prova cúbicos indeformados com 6 cm de aresta. De cada amostra foram retiradas às respectivas umidades, através de cápsulas com sobras das moldagens.

Os corpos de prova foram colocados sobre papel filtro com pedra porosa em uma bandeja de alumínio nivelada com capacidade volumétrica de aproximadamente 20 litros. Em seguida colocou-se água até o nível da altura das bases das amostras por um período de 30 minutos.

A seguir, o NA foi aumentado sucessivamente para 1/3, 2/3, até a submersão total das amostras, mantendo-se entre cada uma destas fases um intervalo de 15 minutos. Após a submersão total, o ensaio prosseguiu por um período de 24 horas.

A partir de observações realizadas durante o ensaio, espera-se avaliar o grau de erodibilidade das amostras de maneira qualitativa e comparativa entre os corpos de prova.

#### 4.2.6. Compressibilidade

Os parâmetros de compressibilidade são obtidos corriqueiramente por ensaios edométricos. Ensaios triaxiais também são utilizados, mesmo que de forma menos usual.

Em solos tropicais, os parâmetros de compressibilidade são obtidos similarmente aos de solos sedimentares. A tensão de pré-adensamento para o caso dos depósitos sedimentares tem uma representação física, que é a máxima tensão a que o solo esteve submetido.

Segundo Vargas (1953), contrariamente aos solos sedimentares, os solos tropicais não apresentam correlações entre a pressão de sobre-adensamento e a pressão de pré-consolidação. O mesmo autor chamou a suposta tensão de sobre-adensamento como “tensão de pré-adensamento virtual” para o caso de solos tropicais.

Esta tensão de escoamento sob condições edométricas depende, segundo Barksdale & Blight (1997), da resistência entre as partículas do solo ou da interligação dos minerais que permanecem após o intemperismo do material.

Maccarini e Mello (1994), Maccarini et al. (1989), através de ensaios edométricos verificaram a influência das cimentações entre as partículas nas propriedades de compressibilidade em solos residuais de gnaisse e diabásio respectivamente.

Maccarini e Mello (1994), em solos residuais de gnaisse constataram que os valores de pressão de pré-adensamento são significativamente superiores à pressão da terra para a profundidade correspondente.

Maccarini et al. (1989), em solos residuais de diabásio, detectaram a existência de cimentação, comparando a compressibilidade de duas amostras, uma indeformada e uma remoldada com o mesmo índice.

Os mesmos concluíram que as amostras remoldadas apresentaram um aumento significativo na compressibilidade. Os autores sugerem que a presença de argilominerais expansivos pode quebrar significativamente a cimentação presente nas amostras, quando submersas.

Objetivando a determinação de parâmetros de compressibilidade de amostras indeformadas dos solos em estudo, foram realizados ensaios edométricos convencionais, utilizando 4 prensas do tipo Bishop pertencentes ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC–Rio.

#### **4.2.6.1.**

##### **Procedimento utilizado – Ensaio Edométrico**

As amostras foram moldadas de blocos indeformados através de anéis de metal com 71,5 mm de diâmetro e 20 mm de altura, os quais permaneciam com a amostra durante todo o ensaio.

O procedimento de moldagem, bem como a coleta de dados referentes a cada amostra, seguiu a rotina apresentada nos ensaios de cisalhamento direto.

Os ensaios edométricos foram realizados através da aplicação de tensões verticais nominais de carregamento e descarregamento; através de um sistema de alavanca com uma relação de 1:10, ou seja, a cada 1 kg de incremento de carga, este correspondia a uma carga de 10kg atuando sobre as amostras.

As tensões verticais eram mantidas constantes durante 24 h nos carregamentos e até a estabilização das leituras nos descarregamentos.

As tensões utilizadas foram as seguintes: 10, 20, 40, 80, 110, 200, 300, 400, 640, 1280, 840, 540, 300, 200 e 80 kPa.

Depois da aplicação do primeiro carregamento, as bacias dos edômetros foram preenchidas com água destilada, e mantidas cheias até o final do último descarregamento.

Após a retirada da água sobrenadante desmontou-se os edômetros e os corpos de prova integrais foram levados à estufa para determinação dos teores de umidade finais.

As leituras de variação de altura das amostras foram efetuadas utilizando-se extensômetros, com resolução de 2 $\mu$ m.

#### 4.2.7.

#### **Avaliação de Expansibilidade**

Jucá et. al (1997), Negro & Gonçalves (1997) atribuem grande parte dos problemas geotécnicos relacionados com o movimento e desempenho de obras e de escorregamentos de taludes à presença de solos expansivos em maciços terrosos.

Em solos expansivos as expressivas variações de volume comprometem a segurança e funcionamento das obras provocando perdas econômicas e atrasos de cronograma.

Segundo Ferreira et. al (1998), o mecanismo de expansão dos solos argilosos é complexo devido ao grande número de fatores intervenientes no processo. Esses fatores podem ser classificados em três grupos, que se interagem:

Os relacionados com as propriedades do solo, em seu estado natural, incluindo a físico-química e mineralogia; os fatores ambientais, que influenciam nas variações das forças internas do sistema solo-água e finalmente, os fatores relacionados com o estado tensional do solo. Segundo os mesmos autores, o processo de expansão do solo está associado ao estado tensional em que se encontra (tensão vertical de consolidação, sucção e estrutura) e ao carregamento a que está submetido.

Na tentativa de se avaliar a expansibilidade dos solos residuais em estudo, foram realizados ensaios de expansibilidade de caráter qualitativo.

#### 4.2.7.1. Inserção de Etilenoglicol

Tendo em vista o elevado grau de saturação apresentado em amostras de SR1, SR2, SR3, houve a necessidade de avaliar qualitativamente os solos através da inserção de etilenoglicol, um composto de caráter bipolar. Tal composto é rotineiramente utilizado na identificação de minerais expansivos na mineralogia das argilas.

- Metodologia

Foram preparadas amostras dos SR1, SR2 e SR3 na umidade natural e em forma de torrões de 6 a 10 mm, e então colocadas em tampas de acrílico, conforme figura 18. O etilenoglicol então era adicionado a uma Placa Petri, e após cerca de 2 horas, foram avaliadas as possíveis modificações no volume dos torrões.

Aliado ao alto grau de saturação, a heterogeneidade dos tipos de solo avaliado constitui-se como um dos principais fatores para realizar tal estudo, tendo em vista que era possível selecionar torrões com materiais em que havia suspeita de serem expansíveis.



Figura 18 – Amostras de SR1, SR2 e SR3, que seriam imersas em etilenoglicol.

#### **4.2.7.2.**

#### **Ensaio de Expansão Axial com Confinamento Lateral e sem Sobrecarga Axial**

Este ensaio tem a finalidade de medir a expansão de uma amostra indeformada, confinada lateralmente, na ausência de sobrecarga, devido à adsorção de água pelos argilominerais expansivos.

Utilizou-se a bacia do ensaio edométrico e um LVDT.

A preparação da amostra, bem como a montagem da bacia é similar ao do ensaio edométrico convencional.

Foram então medidas as alturas iniciais dos corpos de prova.

A seguir procedeu-se à inserção de água destilada na bacia. Com o auxílio de um medidor de deslocamento LVDT media-se a variação de altura ocorrida em função do tempo decorrido, até 48 horas.

#### **4.2.8.**

#### **Resistência ao Cisalhamento**

##### **4.2.8.1.**

##### **Cisalhamento Direto**

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados utilizando-se duas prensas fabricadas pela empresa Wykeham-Farrance (Figura 19) pertencentes ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio.

Neste ensaio, o corpo de prova é colocado no centro de uma caixa bipartida e sobre sua face superior se aplica a tensão normal desejada mantida por um sistema de pesos.

Através da imposição de um deslocamento horizontal de uma das partes da caixa em relação à outra (com velocidade constante) são medidos: a tensão tangencial até a ruptura no plano cisalhante imposto ao corpo de prova pela divisão da caixa, o deslocamento horizontal entre as partes superior e inferior da caixa e o deslocamento vertical do corpo de prova durante o ensaio (devido à variação volumétrica no cisalhamento).

É importante ressaltar que tais medições foram realizadas automaticamente utilizando anel de carga instrumental, desenvolvidas na PUC-Rio, e transdutores de deslocamento resistivos de alta precisão (LVDT).

Estes ensaios foram realizados seguindo procedimentos de Head (1982), pela norma inglesa BS-1377 (BSI, 1990) e pela norma americana ASTM D 3089-9 (ASTM, 1990).



Figura 19 – Prensa de Cisalhamento Direto pertencente ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-RIO.

#### 4.2.8.1.1. Preparação das Amostras

As amostras ensaiadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-RIO foram moldadas de bloco indeformados de (15 x 15 x 15) cm extraídos no campo.

O procedimento de amostragem se deu através de anéis metálicos bizelados de (101,6 x 101,6 x 20) mm; tais anéis eram untados com vaselina em pasta, com o objetivo de minimizar o atrito solo/molde.

O anel era então posicionado sobre a superfície plana do bloco na mesma direção em que se encontrava no campo; e então cuidadosamente cravava-se o molde alguns milímetros no solo. O solo em volta era então removido com uma faca. O procedimento alternado de cravação do anel e desbaste com faca era repetido até o preenchimento completo do interior do anel, com solo. A amostra era separada do bloco e rasada com uma espátula.

Para cada corpo de prova foram medidos o peso, o volume e o teor de umidade, visando à determinação de índices físicos.

A presença de descontinuidades sub-horizontais com espaçamento mínimo de até 1 cm nos solos residuais SR1, SR2 e SR3 foi facilmente verificada; tendo em vista que estas se encontravam preenchidas com óxidos de ferro e / ou óxidos de manganês.

As amostras eram então transladadas para a caixa de cisalhamento direto.

As amostras do solo residual 1 (SR1) se mostraram mais problemáticas tanto na fase de moldagem como no traslado destas para a caixa de cisalhamento.

Essas amostras apresentavam um comportamento frágil durante a fase de moldagem comparada com as outras, tendo em vista que qualquer movimento atípico durante este procedimento fazia com que estas rompessem ao longo de fraturas existentes. A dificuldade de transferir as amostras do solo residual 1 (SR1) para a caixa de cisalhamento também foi verificada, já que houve a necessidade de aplicar um carregamento sobre a amostra para conseguir move-las de dentro dos anéis.

Tendo em vista que o solo residual 1 (SR1) não indicava a presença argilomineral expansivo, acredita-se que a expansão lateral deve-se ao estado tensional do solo; haja visto que o solo encontrava-se bastante cimentado.

#### **4.2.8.1.2.**

##### **Metodologia Utilizada**

Os ensaios de cisalhamento direto foram iniciados em amostras do SR2.

Na primeira rotina, os corpos de prova eram instalados na caixa bipartida, a tensão normal era aplicada e posteriormente o interior da caixa era inundado.

Com o intuito de se verificar o comportamento dos solos em estudo quando submersos em água e sem sobrecarga axial modificou-se o procedimento.

Os corpos de prova passaram então a ser submersas em água, e após 24 horas procedeu-se à aplicação da pressão de adensamento durante 24 horas.

Deve-se destacar que este procedimento também foi utilizado por Ferreira (1997), porém com um tempo maior de submersão sem carregamento axial. O mesmo autor realizou ensaios de cisalhamento direto convencional em argilas expansivas não saturadas coletadas do Município de Paulista – Pe na condição natural e submersa. Na condição submersa as amostras foram inundadas por um período de 48 horas, sendo observada a expansão para cada amostra. Posteriormente foram adensadas para o carregamento desejado durante 24 horas. O autor atribui a variação da resistência observada nos dois procedimentos (natural e submersa), ao fato das amostras durante a fase de saturação expandirem, ocasionando uma redução de tensão total e, conseqüentemente, em sua resistência.

No presente estudo, para cada tipo de solo utilizaram-se pressões normais nominais de adensamento de 40, 65, 110, 210 e 300kPa aplicadas em uma única etapa.

As duas partes da caixa bipartida foram separadas de 0,5 mm através de um dispositivo implementado na PUC-Rio.

A velocidade de ensaio foi calculada baseado em Gibson e Henkel (1954), nos ensaios para o solo residual 2 (SR2), com velocidades calculadas variando de 1 mm/min a 0,0975 mm/min, com o intuito de garantir a condição de cisalhamento drenado. No entanto para garantirmos que estar-se-ia utilizando uma velocidade, que de fato atendesse aos 4 tipos de solo em estudo utilizou-se a velocidade de 0,00975 mm/min encontrada na especificação do equipamento utilizado, a qual encontrava-se bem abaixo das velocidades calculadas.

Tanaka (1976) em ensaios de cisalhamento direto drenado realizados em solos residuais de basalto denso e amigdaloidal da barragem de São Simão utilizou também a velocidade de 0,00975 mm/min para todos os ensaios.

Maccarini (1980), em estudos de solo residual gnáissico jovem do campo Experimental da PUC-Rio verificou a influência da abertura das duas partes da caixa, bem como a variação da velocidade de cisalhamento em parâmetros de resistência de pico.

É importante ressaltar que não fazem parte do escopo desta dissertação, detalhes como a influência da abertura entre as duas partes da caixa, bem como a influência da variação da velocidade de cisalhamento em parâmetros de resistência de pico.

#### **4.2.8.2. Ensaio Triaxial Drenado**

O ensaio triaxial axi-simétrico é o mais conhecido e utilizado. Este é executado através de amostras cilíndricas sólidas, que são colocadas no interior de uma câmara, dentro do qual ficam sujeitos a um estado de tensão axi-simétrico. A tensão principal na direção perpendicular ao topo e base da amostra é aplicada através de uma haste rígida e as tensões principais perpendiculares à superfície lateral do cilindro são aplicadas através de um fluido que preenche a câmara pressurizada.

Os ensaios triaxiais, dos tipos  $CD_{\text{sat}}$ , foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio . Nestes ensaios foram utilizadas prensas fabricadas pela empresa Wykeham-Farrance (Figura 20), de velocidade de deslocamento controlada e instrumentação eletrônica para monitorar força, deslocamento, pressão confinante, poro-pressão e variação de volume.

No monitoramento da carga axial utilizou-se células de carga internas à câmara, com capacidade máxima de 5 kN, propiciando uma resolução da ordem de 1,5 kPa na medida de tensão desviadora tomando-se como base a área inicial das amostras. Medidas de deslocamento foram efetuadas externamente à câmara, com transdutores do tipo LSCDT com resolução da ordem de  $10\mu\text{m}$ .

Pressões na câmara e poropressões foram medidas com uma resolução de 1kPa, utilizando-se transdutores com capacidade máxima de 10Bar (1000kPa). Variações de volume foram medidas utilizando-se medidores automáticos desenvolvidos na PUC-Rio com resolução de  $0,01\text{ cm}^3$ .



Figura 20 - Prensa de Ensaio Triaxial pertencente ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-RIO.

#### 4.2.8.2.1. Preparação das Amostras

Com o intuito de se verificar a influência na resistência ao cisalhamento de fraturas presentes nos solos residuais de basalto submetidas, foram moldadas amostras, a partir de blocos que eram inclinados com o auxílio de maderites, de maneira que essas descontinuidades fizessem uma inclinação de 45°, aproximadamente (Figura 21).



Figura 21 – Moldagem de amostras do SR2, com fraturas com inclinação de 45°.

A presença de fraturas reliquias interligadas observadas nos blocos de solo residual de basalto fez com que a operação de moldagem se tornasse difícil. Em virtude disso, só foi possível moldar 4 corpos de prova, dos quais três advindos de bloco do solo residual 2 (SR2), e um do bloco de solo residual 3 (SR3). Os corpos de prova foram moldados com dimensões de 38,1 mm de diâmetro e 78,2 mm de altura.

#### 4.2.8.2.2.

##### Metodologia Utilizada

Nos ensaios triaxiais CD os corpos de prova foram saturados utilizando-se a técnica de aumento de contra-pressão.

No início do processo foi aplicada uma pressão confinante em torno de 50 kPa, onde as poro-pressões no topo e na base de igual valor eram conhecidas; a partir disso mediu-se quanto entrou de água (pela variação de volume), então sob condições não drenadas, aumentava-se a tensão confinante para 100 kPa medindo-se de novo o valor das poro-pressões. Para saber se a amostra estava saturada, calculava-se o valor do parâmetro B de Skempton, isto é,  $B = \Delta U / \Delta \sigma$ . Este valor teria que estar próximo de 1. Caso não estivesse próximo de 1, tal procedimento era repetido aumentando as pressões cerca de 50kPa até que se obtivesse uma medida do parâmetro B igual ou superior a 0,98.

Em seguida procedeu-se ao adensamento das amostras, mantendo-se o valor da pressão confinante aplicada e variando-se o valor da contra-pressão. Nesta fase foram utilizadas as pressões nominais de 50, 100 e 200 kPa.

Após o adensamento, procedeu-se ao cisalhamento sob uma velocidade constante de deslocamento axial. Tal velocidade foi estabelecida de acordo com Gibson & Henkel (1954) de forma a garantir uma variação de poropressão nula durante o cisalhamento drenado. Para o ensaio realizado no corpo de prova de solo residual 3, utilizou-se a velocidade de 0,008 mm/min, enquanto que para as do solo residual 2 utilizou-se a velocidade de 0,004 mm/min.