

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.

MATERIAIS

O solo utilizado neste trabalho foi coletado em uma jazida, pertencente ao município de Rorainópolis, localizado na região Sul do Estado de Roraima. A Figura 38 apresenta a localização do Estado de Roraima no contexto amazônico e a localização do município de Rorainópolis na região sul do Estado de Roraima.



Figura 39: Localização do Estado de Roraima e do município de Rorainópolis. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA.

A referida jazida encontra-se a aproximadamente 12,0 Km do centro da cidade de Rorainópolis e atualmente fornece matéria prima para a indústria cerâmica do município. Esta é a única jazida de material fino que possui licenciamento aprovado pelos órgãos ambientais no município. A Figura 39 apresenta as coordenadas geográficas do ponto de coleta e mostra a distância deste até a sede do município.



Figura 40: Localização do ponto de coleta da amostra. Fonte: Google Earth.

esquerda do Rio Anauá. A Figura 40 apresenta um panorama da área, que é coberta por floresta nativa densa, que é retirada para que se inicie a exploração da argila.



Figura 41: Foto do local de amostragem.

Observando o perfil do solo exposto verifica-se uma homogeneidade do solo apresentando uma camada de cobertura mais escura, devido à presença da matéria orgânica, e a partir daí apresenta mesma coloração nos três primeiros metros de profundidade, aproximadamente. Vale lembrar que no período das chuvas esta área fica submersa, com uma lâmina d'água de cerca de 4 (quatro) metros, por um período de 3 a 4 meses, a depender da intensidade das chuvas de inverno. A Figura 41 mostra o perfil do solo desta jazida.



Figura 42: Perfil do solo da jazida.

A amostra foi coletada com o auxílio de enxada e pá e acondicionada em sacos plásticos como mostrado na Figura 42a e posteriormente transportada até o Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, via aérea em embalagens de papelão ou pelo Correios como mostra a Figura 42b.



Figura 43: Acondicionamento da amostra para o transporte.

Contexto geológico do local de amostragem

O Estado de Roraima está localizado no extremo norte do Brasil, fazendo fronteira com os estados do Amazonas e Pará, e com a República Bolivariana da Venezuela e a República Cooperativa da Guiana.

Do ponto de vista geológico o estado de Roraima está localizado na porção centro-sul do Escudo das Guianas.

De acordo com a organização Conservação Internacional (www.conservation.org), o Escudo das Guianas é uma região situada ao norte do continente sul americano e se distribui entre Brasil, Guiana Francesa, Suriname, Guiana e parte da Venezuela. Em território brasileiro o Escudo das Guianas abrange parte do estado do Amazonas (norte), parte do Pará (Calha Norte) e os estados de Roraima e Amapá.

A Figura 43 mostra a localização do Escudo das Guianas no contexto da região norte da América do Sul, assim como a posição do Estado de Roraima na região centro-sul do Escudo das Guianas, destacando a geologia da região. Além disso, pode-se observar a posição do Município de Rorainópolis no contexto dos grandes domínios lito estruturais de Roraima.

De acordo com Almeida (2006), somente a partir da década de 70, é que foram iniciados levantamentos geológicos sistemáticos no Estado de Roraima, conduzidos principalmente pelo convênio DNPM/CPRM (Departamento Nacional de Produção Mineral e Serviço Geológico do Brasil) e pelo projeto RADAMBRASIL culminando assim com o estabelecimento das primeiras grandes unidades geológicas.

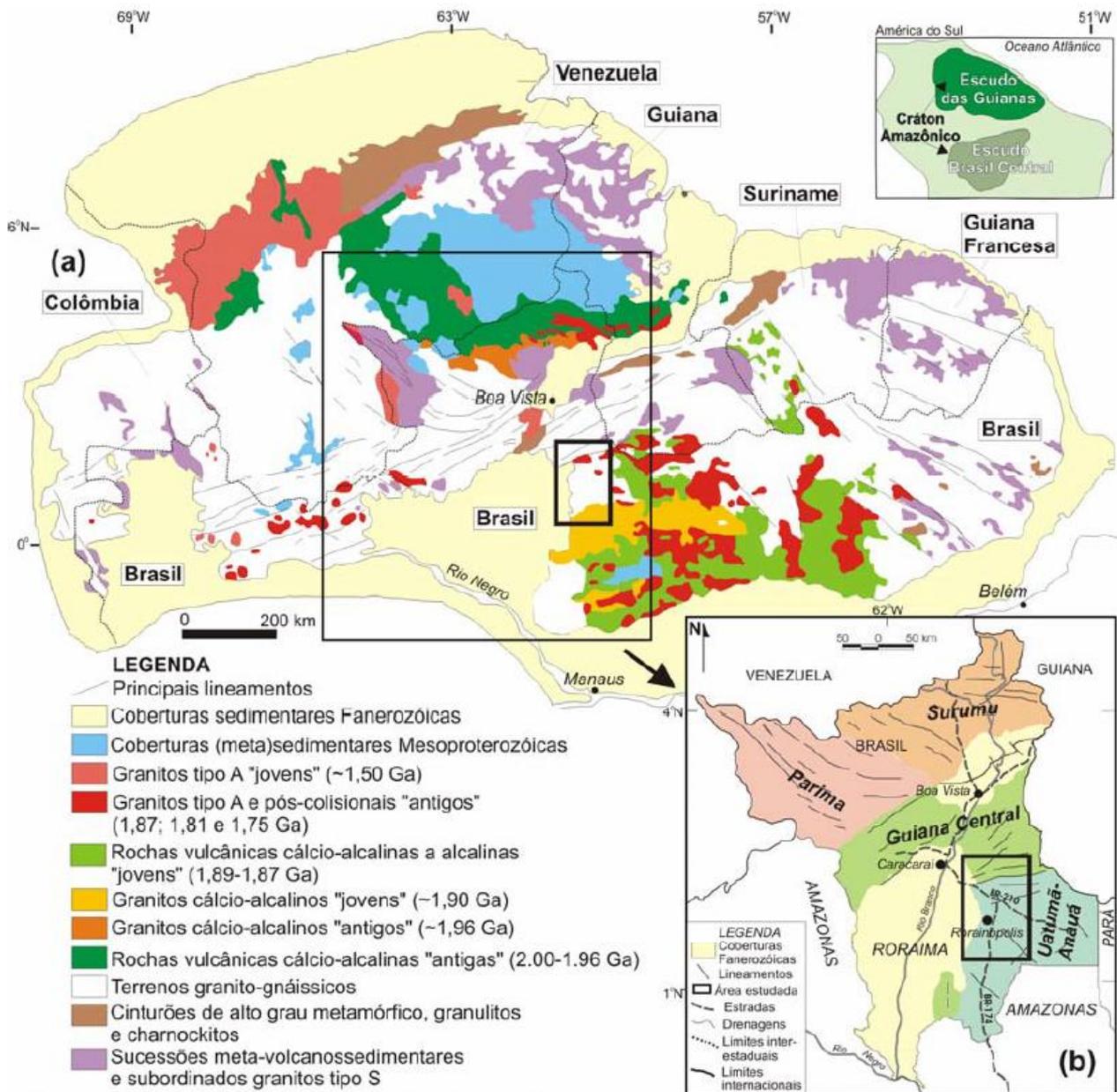


Figura 44: Mapa de localização do município de Rorainópolis dentro do contexto do (a) Escudo das Guianas e dos (b) domínios tectono-estratigráficos de Roraima (apud ALMEIDA, 2006).

O Estado de Roraima possui cinco principais domínios lito estruturais, a saber: Rio Branco – Rio Negro, Parima, Urariquera, Guiana Central e Anauá – Jatapú, como mostrado na Figura 44.

O município de Rorainópolis possui grande parte de sua área territorial sob o domínio Rio Branco – Rio Negro e parte pertencente ao domínio Anauá – Jatapú.

A sede do município de Rorainópolis e os possíveis locais de instalação do futuro aterro sanitário estão localizados no domínio lito estrutural denominado

Anauá – Jatapú, já o local de amostragem do solo pertence ao domínio Rio Branco – Rio Negro, caracterizado, principalmente, por extensas áreas com cobertura sedimentar fanerozóica, como pode ser visto na Figura 43, denominados de sedimentos recentes no encarte tectônico da Figura 45.

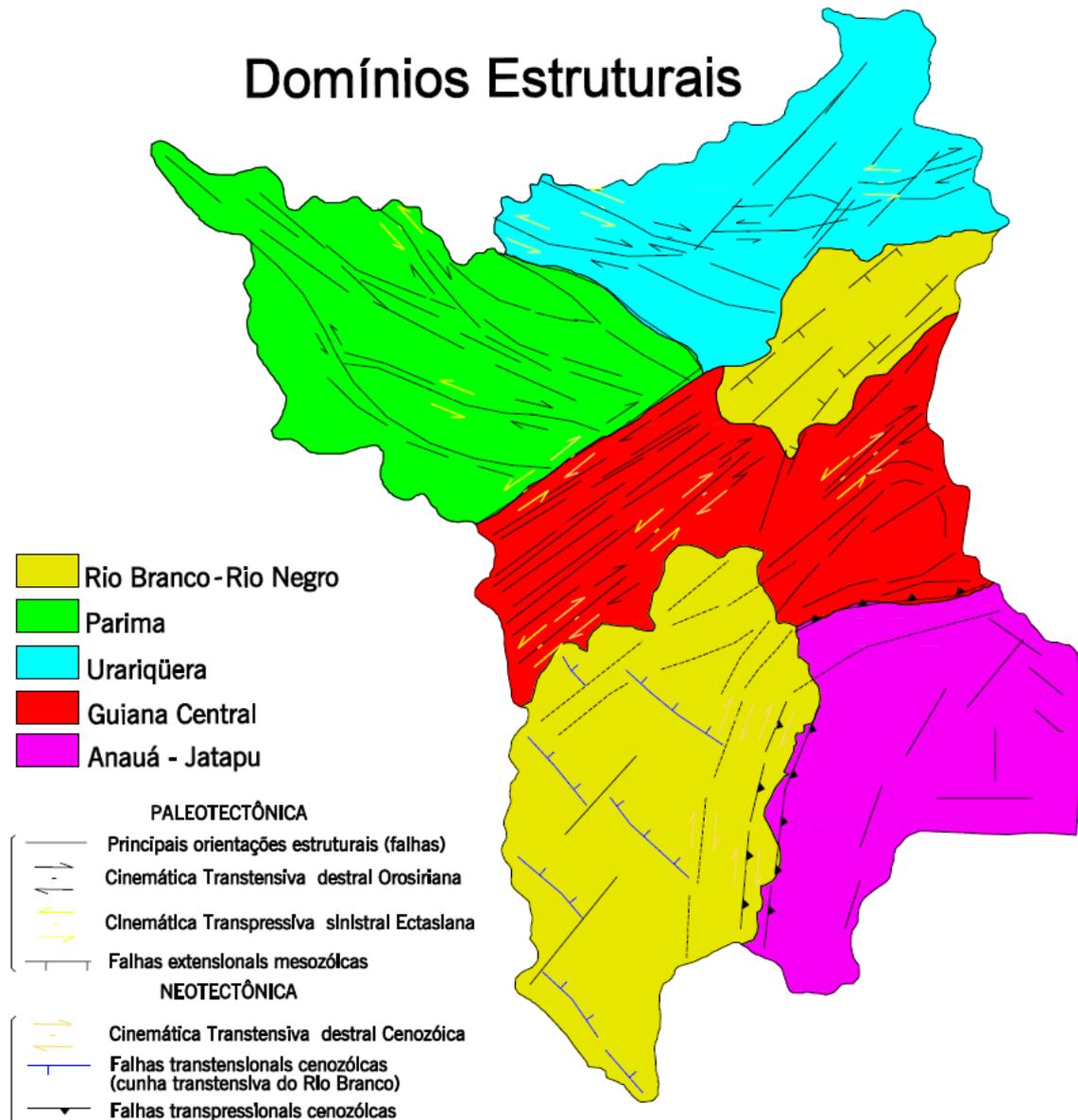
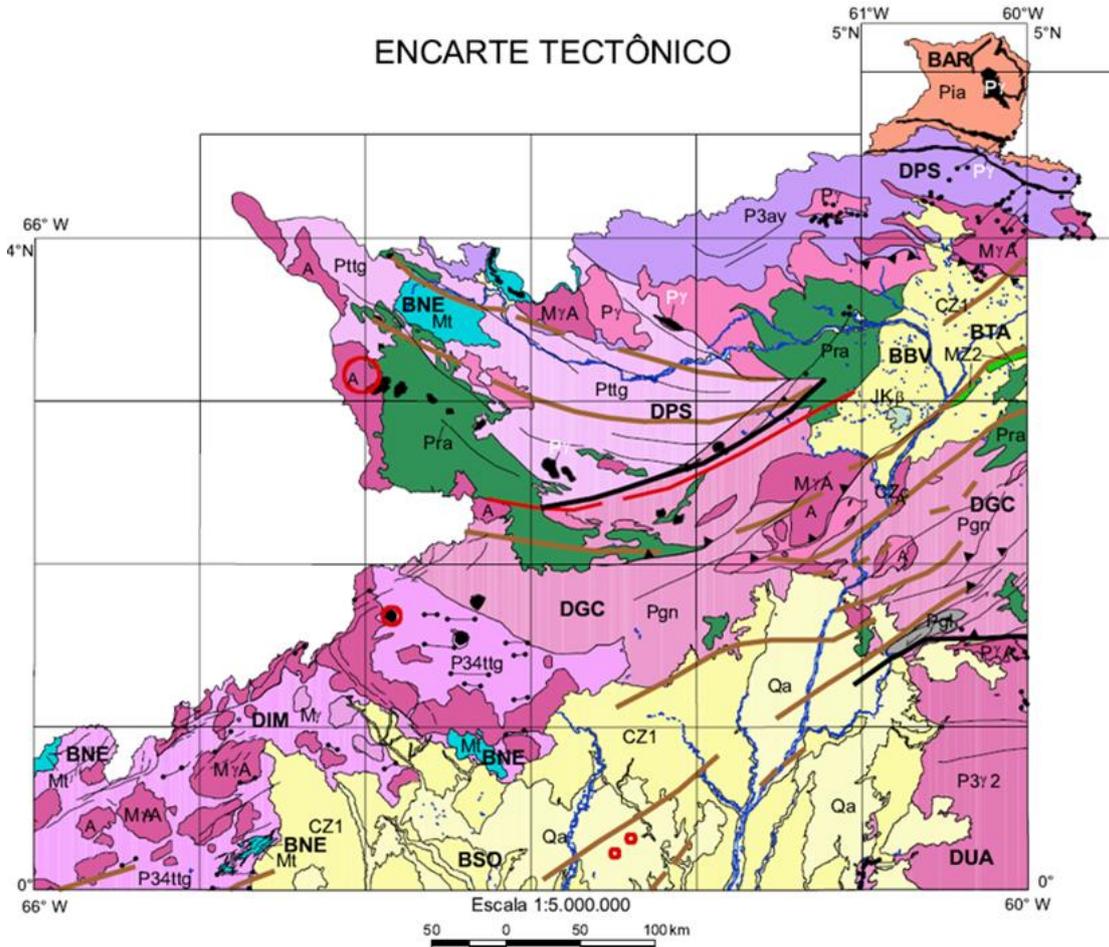


Figura 45: Domínios lito estruturais de Roraima (IBGE, 2005).

ENCARTE TECTÔNICO



ENTIDADES TECTÔNICAS
COBERTURAS CENOZÓICAS

- Qa** Sedimentos recentes
- CZc** Cobertura clástica
- BACIAS SEDIMENTARES FANEROZÓICAS**
- CZ1** Bacia Intracratônica
- MZ2** Rife Intracontinental
- BACIAS SEDIMENTARES PROTEROZÓICAS**
BACIA INTRACRATÔNICA (E/OU DE ANTEPAÍS)
- Pia** Arenito dominante

- BACIAS DE AMBIENTE CONVERGENTE (E/OU TRANSCORRENTE)**
- Mt** Associação clástica, turbidítica ou não; vulcanismo subordinado

SUÍTES MAGMÁTICAS INTRAPLACA

- P₁** Suíte máfico-ultramáfica
- P₂** **JK₁** Vulcanismo félsico intracontinental (α) e basalto continental (β)
- P₃** **M₁** Suítes graníticas pós-orogênicas a anorogênicas

ORÓGENOS PROTEROZÓICOS/ARCOS MAGMÁTICOS E BACIAS RELACIONADAS

- P₃ 2** **M₂** Suítes graníticas orogênicas (γ) e tardi a pós-orogênicas (δ)
- P₇** Suítes tonalíticas a graníticas, calcalcalinas, com rochas máficas e relíquias de rochas supracrustais associadas
- Pttg** **P34ttg**
- P3av** Vulcanismo félsico calcalcalino/ Arcos vulcânicos e bacias relacionadas
- Pra** Bacia retroarco e/ou relacionada a arco
- TERRENOS DE SIGNIFICADO TECTÔNICO INCERTO**
- Pgl** Associação gnáissico-granulítica
- Pgn** Associação granítico-gnáissica, migmatítica

NOTAÇÕES DE ÉON, ERAS E PERÍODOS: P - Paleoproterozóico (P3 - Orosiriano, P34 - Orosiriano-Estateriano); M - Mesoproterozóico; PZ - Paleozóico; MZ - Mesozóico (JK - Jurocretáceo); CZ - Cenozóico (Q - Quaternário).

Fonte: Mapa Tectônico do Brasil, escala 1:5.000.000, versão 2003 (Delgado et al, 2003)

DOMÍNIOS TECTONO-ESTRUTURAIS

- BACIAS SEDIMENTARES FANEROZÓICAS**
- BBV** Bacia Boa Vista
- BSO** Bacia do Solimões
- BTA** Bacia do Tacutu
- BACIAS SEDIMENTARES PALEO A MESOPROTEROZÓICAS**
- TRANSTRACIONAIS**
- BNE** Bacia Neblina e correlatas
- E/OU INTRACRATÔNICA**
- ORÓGENOS PALEO A MESOPROTEROZÓICO**
- Provincia Rio Negro (1.81 - 1.55 Ga)**
- DIM** Domínio Imeri
- ORÓGENO PALEOPROTEROZÓICO**
- Provincia Tapajós-Parima (2.03 - 1.88 Ga)**
- SISTEMAS DE ARCOS MAGMÁTICOS ACRESCIONÁRIOS E COLISIONAIS E BACIAS RELACIONADAS**
- DUA** Domínio Uaimiri - Anauá
- DGC** Domínio Guiana Central ou K'Mudku
- DPS** Domínio Parima-Surumu

CONVENÇÕES

- GEOFÍSICAS**
- Feições Aeromagnéticas Lineares
- Anomalia aeromagnética (residual) de fonte rasa a profunda
- LIMITES ENTRE DOMÍNIOS E/OU PROVÍNCIAS TECTONO-ESTRUTURAIS (EXCETUANDO AS BACIAS)**
- Limites com Assinatura Estrutural
- Limites com Assinatura Geofísica
- Limites com Assinatura Isotópica

Figura 46: Encarte tectônico de parte de Roraima (adaptado de CPRM, 2004).

De acordo com o mapa geológico do CPRM (2004), a jazida (denominada '73 arg', destacada pelo círculo vermelho na Figura 46), de onde se obteve as amostras, está localizada na Formação Iça caracterizada pela presença de arenito ferruginoso, siltito e argilito. Na Figura 46 apresenta-se um recorte com destaque para a área de estudo.

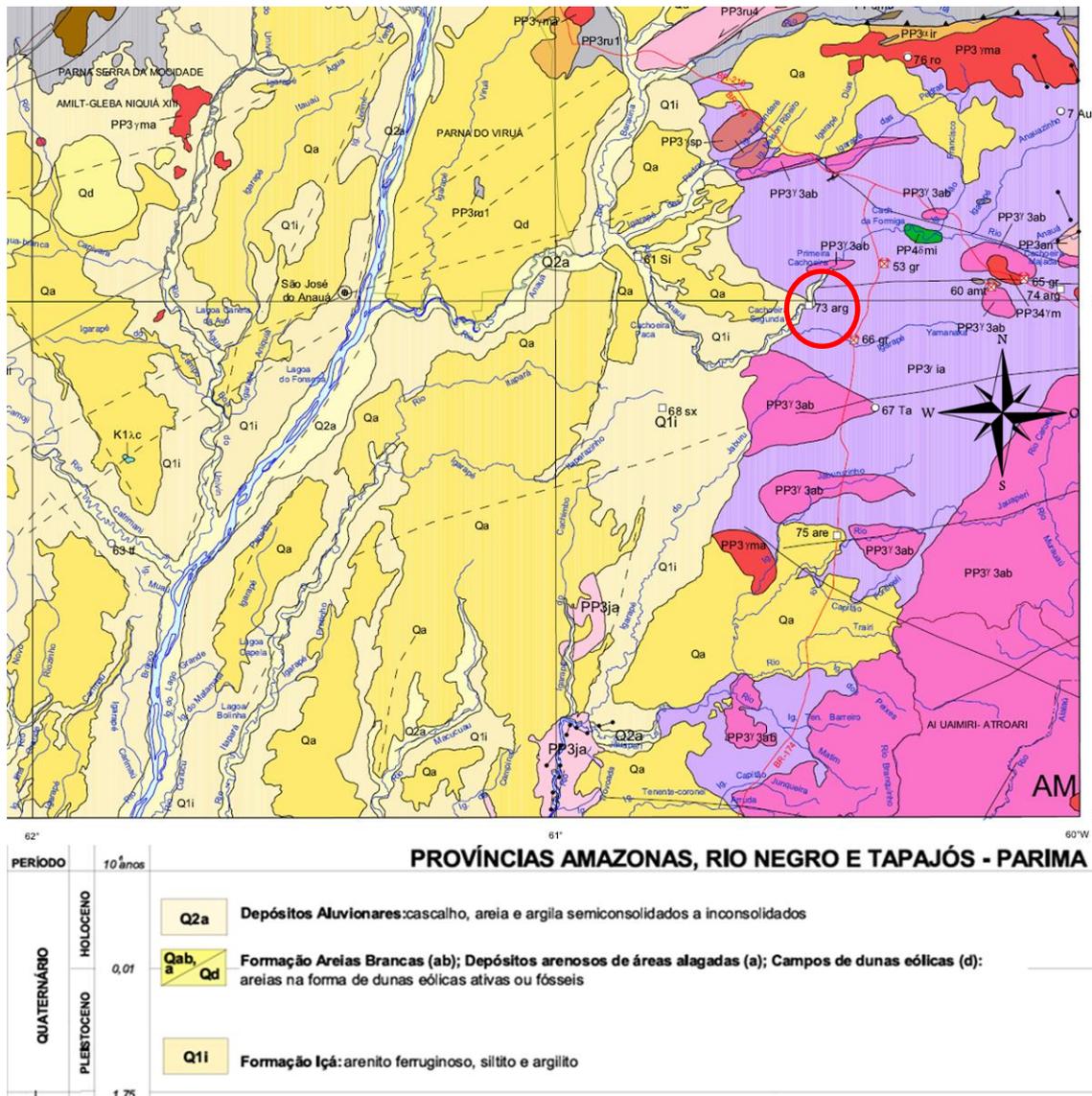


Figura 47: Recorte do mapa geológico do Estado de Roraima com destaque para a região de coleta da amostra e legenda de interesse (CPRM, 2004).

3.2.

MÉTODOS

A seguir são apresentados os métodos de ensaio e procedimentos empregados durante o programa experimental. Os ensaios foram realizados baseando-se em normas técnicas, sendo feita a referência das mesmas. Quando houve alguma modificação ou adequação, ou ainda na ausência de norma específica será especificado no texto.

As amostras coletadas foram submetidas a uma série de ensaios laboratoriais com o objetivo de caracterizá-las física, química e mineralogicamente.

Para alcançar os objetivos propostos nesta dissertação realizaram-se também os ensaios de condutividade hidráulica, de contração, de resistência à compressão simples e de resistência ao cisalhamento. Foram realizados também alguns ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura com a finalidade de facilitar o entendimento do comportamento do solo, em especial, com relação à condutividade hidráulica. Somando-se a estes, realizou-se um estudo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo por meio de ensaios de cisalhamento direto.

Os ensaios foram realizados nos laboratórios de Geotecnia e Meio Ambiente, de Química e Laboratório de Difração de Raios X da PUC-Rio, e o ensaio de Fluorescência de Raios X foi realizado pela empresa Nanobusiness.

3.2.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física compreendeu a determinação da densidade das partículas, da curva de distribuição granulométrica dos materiais e a determinação dos limites de consistência (limites de Atterberg), observando as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresentadas a seguir:

- Análise Granulométrica (NBR 7181/84);
- Limite de Liquidez (NBR 6459/84);
- Limites de Plasticidade (NBR 7180/84),
- Massa Específica Real dos Grãos (NBR 6508/84).

É importante destacar, que o procedimento adotado referente à determinação da massa específica foi adaptado, pois segundo a ABNT recomenda-se a utilização de picnômetros de 500,0 ou 1000,0 cm³, mas seguindo o procedimento consagrado no laboratório de geotecnia da PUC-Rio utilizou-se picnômetros de 250,0 cm³, adequando-se a quantidade de material utilizado.

A partir dos ensaios de limites e distribuição granulométrica foram determinados os seguintes índices:

- Índice de plasticidade (IP, %), obtido pela diferença entre o limite de liquidez (LL, %) e o limite de plasticidade (LP, %);
- Índice de atividade das argilas (IA), determinado segundo proposta por Skempton, como:
-

$$I_a = \frac{IP}{\% < 2\mu m} \quad (3.1)$$

Em que, % < 2,0 μm representa a fração argila.

3.2.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A amostra do solo siltoso foi submetida aos ensaios listados a seguir:

- Azul de Metileno (Capacidade de Troca Catiônica e Superfície Específica);
- pH;
- Matéria Orgânica;
- Composição química por Fluorescência de Raios X.

Azul de Metileno

Para obtenção dos parâmetros de Capacidade de Troca Catiônica e Superfície Específica foi realizado o ensaio de Azul de Metileno.

O método utilizado neste trabalho seguiu o seguinte procedimento:

- pesa-se 1,0 g de solo passante na peneira #40 (solo seco em estufa a 110 °C, por 24 horas);
- coloca-se 50,0 mL de solução tampão para manter o pH neutro;
- mantem-se a solução em agitação constante por 15 minutos, com o auxílio de um agitador mecânico (Figura 47);
- acrescenta-se a solução de Azul de Metileno (1,0 g/L) com uma pipeta graduada com acréscimos de 1,0 mL por vez, deixando agitar por 1 (um) minuto, a cada acréscimo;
- com o auxílio de uma pipeta plástica retira-se uma gota da solução, da parte mais superficial da solução;
- pinga-se uma gota da suspensão (corante + água + solo) sobre o papel filtro (Whatman n° 40);
- observa-se se ocorre à formação de uma auréola azul clara ou esverdeada, se não for constatada o aparecimento da auréola acrescenta-se mais 1 mL de corante até que haja a formação da auréola. Ao aparecer a auréola seguem-se mais alguns acréscimos apenas para confirmação.

Este procedimento está baseado na norma ASTM C 837 (ASTM, 1984). Na Figura 47 apresentam-se os materiais utilizados para o ensaio e na Figura 48 ilustra-se resumidamente o procedimento e apresenta-se o resultado.



Figura 48: Agitador mecânico e materiais para o Ensaio de Azul de Metileno.

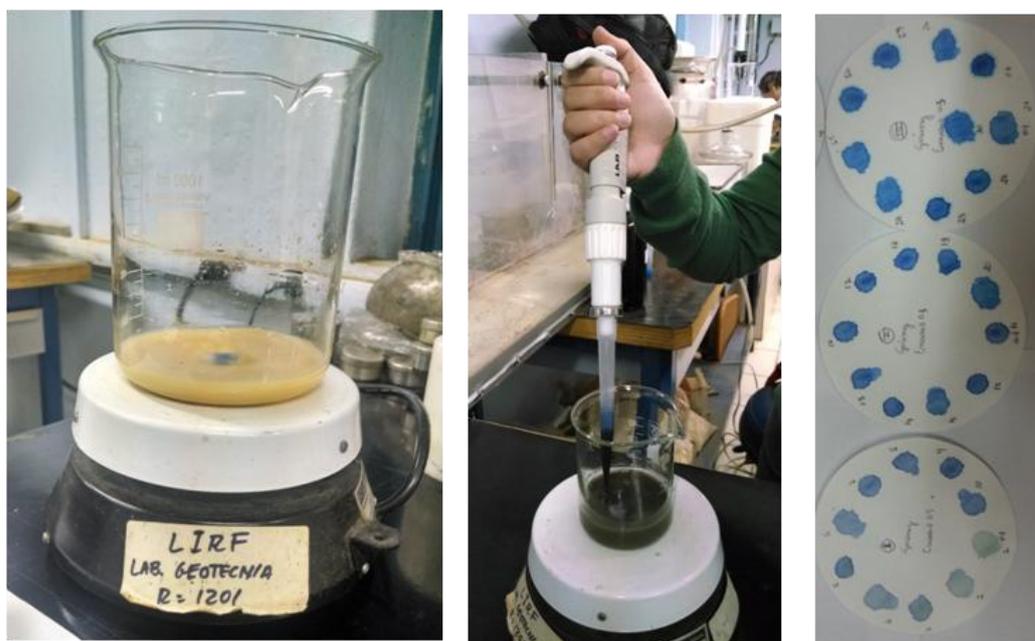


Figura 49: Execução e resultado do Ensaio de Azul de Metileno.

O ensaio fornece o valor total em mL de Azul de Metileno acrescentado a solução com o solo, com este resultado pode-se então calcular os parâmetros de Capacidade de Troca Catiônica e Superfície Específica, com o auxílio das equações a seguir:

Capacidade de Troca Catiônica

$$CTC(\text{meq}/100\text{g}) = \frac{CN \text{ AM } (\text{meq}/\text{mL}) \times V \text{ AM } (\text{mL}) \times 100}{W \text{ SOLO } (\text{g})} \quad (3.2)$$

Em que:

CTC é a capacidade de troca catiônica;

CN é a Concentração normal do azul de metileno utilizado;

$$CN = \frac{C (\text{g}/\text{L})}{\text{Equivalente grama}} \quad (3.3)$$

$$CN = \frac{(C (\text{g}/\text{L})) / (\text{Equivalente grama})}{PM / \text{valência}} \quad (3.4)$$

V é o volume da solução de azul de metileno utilizada (mL);

C é a concentração da solução de azul de metileno (normalidade);

M é a massa de solo seca (g).

Superfície Específica

$$SE = \text{Fator Azul de Metileno} \cdot CTC \quad (3.5)$$

Onde:

SE é a superfície específica (m²/g);

Fator Azul de Metileno equivale a 7,8043;

CTC é a capacidade de troca catiônica.

pH DO SOLO

O potencial de hidrogênio iônico do solo foi determinado seguindo a metodologia descrita no manual da EMBRAPA (1997). A medição foi realizada em água destilada e seguiu o seguinte procedimento:

- pesa-se 5,0 gramas de solo;
- mistura-se com uma quantidade de água 2,5 vezes à massa do solo;
- homogeneíza-se bem;
- deixa-se ocorrer a sedimentação;
- mede-se o pH.

Neste trabalho o pH foi medido com o auxílio de phmetro da marca TECNOPON modelo mPA210P, mostrado na Figura 49.



Figura 50: Equipamento de medição do pH (Fonte: www.tecnopon.com.br).

FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

O ensaio de Fluorescência de Raios X foi o único realizado fora da PUC-Rio, sendo realizado pela empresa Nanobusiness.

De acordo com as informações recebidas da empresa para o ensaio foi realizado utilizando-se um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva com detector X-Flash Bruker S2 Ranger com o programa S2 GUI Client. E as análises qualitativa e semiquantitativa foram feitas com o programa Espectra^{edx}.

3.2.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Além das características física e química, a caracterização mineralógica também de grande importância para se conhecer as propriedades dos solos. Assim, para se caracterizar mineralogicamente o solo realizaram-se os seguintes ensaios:

- Difração de Raios X;
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.

O objetivo principal da realização dos ensaios de Difração de Raios X foi a determinação, de forma qualitativa, da composição mineralógica das frações do solo.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Difractometria de Raios-X do DEQM da PUC-Rio, em um difratômetro modelo TM - 1000 de marca Hitachi, conforme a Figura 50.

As amostras para o ensaio de Difração de Raios X foram preparadas pelo método do gotejamento de acordo com as orientações presentes em Mitchell (1993).

Para o solo utilizado nesta dissertação, não foi necessário realizar nenhum tipo de tratamento com o intuito de diferenciar os argilominerais presentes.

Foram preparadas três lâminas de material, como pode se ver na Figura 51. A primeira lâmina foi preparada com o material passante na peneira # 40 (amostra total), as outras duas lâminas foram preparadas com o material passante nas peneiras #200 (fração silte) e #400 (fração argila), respectivamente.



Figura 51: Equipamento Hitachi TM – 1000, utilizado nas análises de MEV.

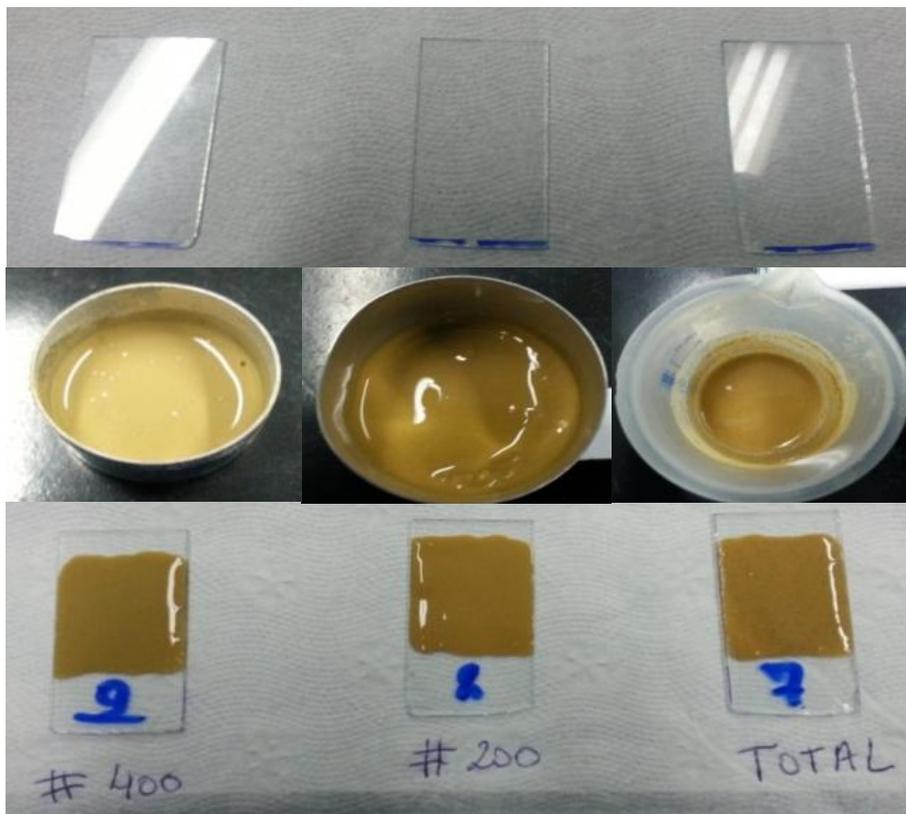


Figura 52: Preparação das lâminas pelo método do gotejamento.

Além do ensaio de Difração de Raios X, também foram realizados alguns ensaios de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) para observação da macro e microestrutura do solo, a fim de auxiliar no entendimento do comportamento do solo quando submetido à variação de umidade de compactação e da variação da energia de compactação.

As amostras utilizadas nos ensaios de MEV foram obtidas a partir de cada corpo de prova obtido nos ensaios de compactação.



Figura 53: Obtenção de amostras para as análises de MEV.

As amostras foram retiradas dos corpos de prova de forma que preservassem a estrutura do solo compactado (vide Figura 52), assim foram preparadas 15 amostras com estrutura horizontal preservada, 15 amostras com estrutura vertical preservada.

Para obtenção da amostra preservando a orientação seguiu-se o seguinte procedimento básico:

- secou-se a amostra ao ar (esta é uma necessidade imposta pelo equipamento);
- reduz-se o seu tamanho (até o tamanho próximo ao desejado);
- quebra-se sem auxílio de equipamento, apenas com os dedos, para não amolgar a amostra, preservando a estrutura original do solo compactado;
- procede-se o ensaio.

O ensaio foi realizado em apenas 05 (cinco) amostras com orientação horizontal preservada. Para cada amostra ensaiada foram obtidas imagens com aumento de 100, 1000, 2000 e 4000 vezes. As imagens com menor aumento auxiliaram na observação da macroestrutura do solo já as de maior aumento para a microestrutura. A Figura 53 apresenta o resultado de uma análise realizada.

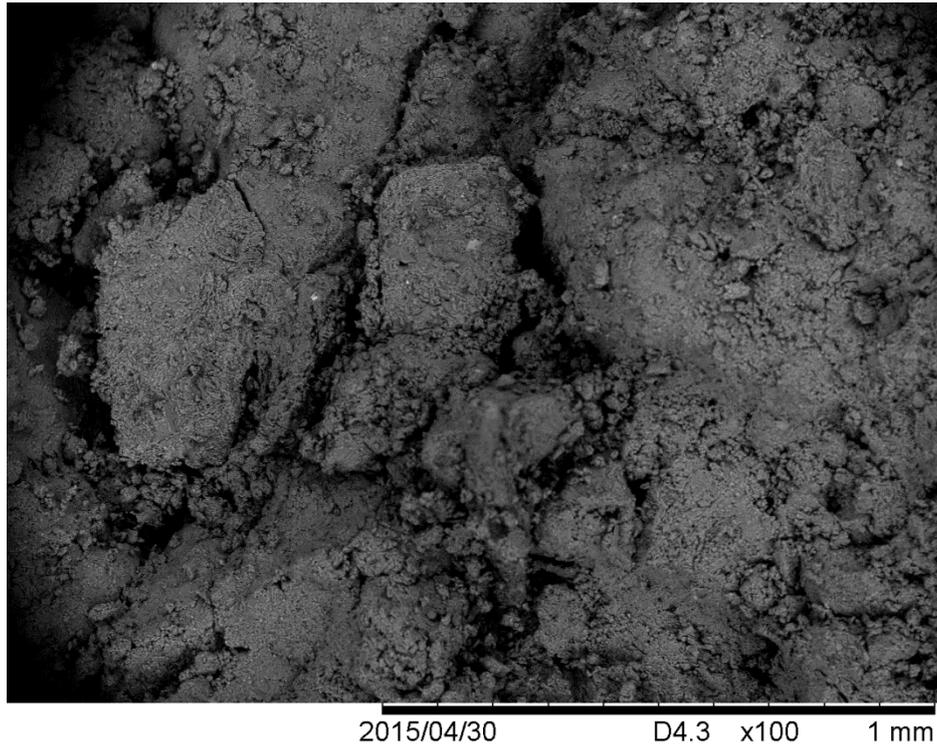


Figura 54: Resultado de uma das análises de MEV.

Todas as imagens das 05 (cinco) amostras analisadas encontram-se no Anexo A.

3.2.4.

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para a caracterização mecânica do solo em estudo foram realizados ensaios de compactação, com e sem reuso de material, ensaios de cisalhamento direto, para obtenção dos parâmetros de resistência do solo e ainda ensaios de compressão simples (não confinada).

Ensaio de Compactação

Neste trabalho os ensaios de compactação foram realizados seguindo a NBR 7182/86 para diferentes teores de umidade e também para diferentes energias de compactação.

As energias de compactação usualmente utilizadas no Brasil seguem as especificações da ABNT na referida norma, que estabelece as energias de compactação do Proctor Normal, Intermediária e Modificada para se determinar a correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente do solo seco.

A princípio foram realizados ensaios de compactação com reuso do material para determinar os valores de umidade ótima para cada energia de compactação utilizada, a fim de reduzir o gasto de material (vide Figura 54).

Com a definição dos valores de umidade ótima para cada energia procedeu-se a compactação sem reuso para obtenção das amostras para os ensaios de

condutividade hidráulica, contração, compressão simples e para as análises de MEV.

Para cada energia foram moldados de 5 (cinco) a 6 (seis) corpos de prova, 2 (dois) ou 3 (três) corpos de prova com teor de umidade acima da umidade ótima, 01 (um) na umidade ótima e outros 02 (dois) ou 3 (três) com teor de umidade abaixo do valor da umidade ótima.

Para os ensaios de cisalhamento direto também foram compactados corpos de prova, mas com cilindro grande (vide Figura 56).

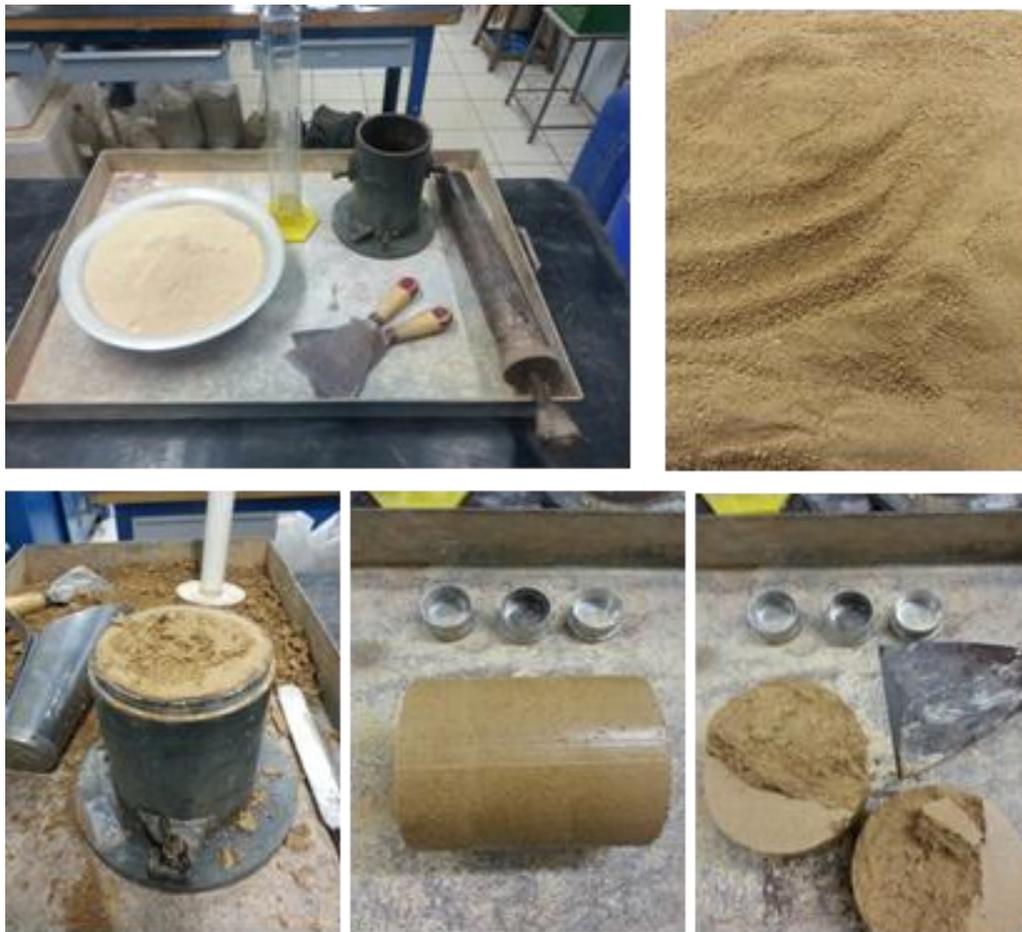


Figura 55: Ensaio de compactação.

Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados utilizando uma prensa fabricada pela empresa Wykeham-Farrance pertencentes ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio, vista na Figura 55.

Estes ensaios foram realizados seguindo procedimentos descritos em Head (1994).

As amostras ensaiadas foram moldadas a partir de blocos compactados de acordo com as energias e teores de umidade especificados previamente, o processo de obtenção das amostras é ilustrado na Figura 56.

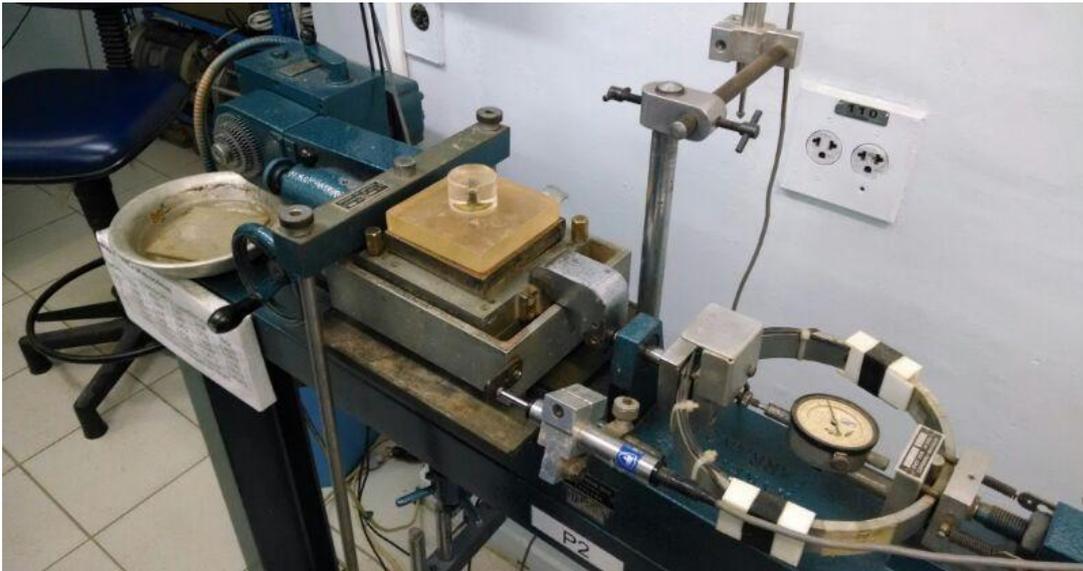


Figura 56: Prensa de Cisalhamento Direto pertencente ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio.

O procedimento de obtenção das amostras se deu através de anéis metálicos bízelos de 101,6 x 101,6 x 20 mm 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; e então cuidadosamente cravava-se o molde alguns milímetros no solo. O solo em volta era então removido com estilete. O procedimento alternado de cravação do anel e desbaste com estilete era repetido até o preenchimento completo do interior do anel, com solo. A amostra era separada do bloco e rasada com uma espátula.

No presente estudo, para cada amostra utilizaram-se tensões normais nominais de adensamento de 200, 300 e 400 KPa aplicadas em uma única etapa e os ensaios foram realizados com as amostras inundadas.

A velocidade de ensaio foi calculada seguindo os procedimentos recomendados por Gibson e Henkel (*apud* Head, 1994) com o intuito de garantir a condição de cisalhamento drenado. Utilizou-se a velocidade de 0,0250 mm/min, abaixo das velocidades calculadas para todos os corpos de prova.

Existem diferentes teorias e critérios de ruptura em solos, para este trabalho foi utilizado o critério de Mohr-Coulomb, que define que a ruptura ocorre quando no plano de ruptura as tensões normais e cisalhantes é tal que a tensão de cisalhamento é máxima. Esta combinação de tensões, para diferentes ensaios, resulta em diferentes círculos de Mohr que são envoltos por uma envoltória de tensões que circunscreve os círculos correspondentes à ruptura.



Figura 57: Preparação das amostras para o ensaio de cisalhamento direto.

O critério de Mohr-Coulomb assume que a Envoltória de Mohr é definida por uma linha reta, definida como:

$$\tau = c' + \sigma' \times \tan \varphi' \quad (3.6)$$

Em que:

c' é o intercepto coesivo;

φ' é o ângulo de resistência ao cisalhamento.

Ensaio de Compressão Simples (ou Não Confinada)

As amostras para este ensaio foram obtidas a partir dos corpos de prova obtidos nos ensaios de compactação. A partir de um único bloco podem-se obter três amostras para compressão simples e três para o ensaio de condutividade hidráulica (Figura 57). Nos ensaios foram utilizados corpos de prova cilíndricos, cujas dimensões médias foram 3,8 cm de diâmetro e 7,6 cm de altura, com o objetivo de evitar acúmulo de tensões.

O ensaio de compressão simples pode ser interpretado como um caso especial do ensaio de compressão triaxial, no qual a tensão confinante é nula, ou seja, igual à pressão atmosférica. Dessa forma, o valor da tensão principal na ruptura é denominado de resistência à compressão simples.

Para os ensaios de resistência à compressão simples foi usada prensa triaxial (modelo TRISCAN-50) adaptada, na qual foi imposta a taxa de deslocamento arbitrada, comandado pelo software *Clip Studio*, ao longo de duas superfícies rígidas paralelas, uma oposta à outra, até que ocorra sua ruptura. O equipamento pode ser visualizado na Figura 58.

Os corpos de prova foram comprimidos axialmente mantendo uma taxa de deslocamento de 0.4 mm/min, o que para um corpo de prova triaxial corresponde a 0,53 %/min, sendo a taxa recomendada entre 0,5 a 2,0 % por minuto. Os dados foram registrados a cada 10 segundos.



Figura 58: Preparação das amostras.



Figura 59: Equipamento utilizado nos ensaios de compressão simples.

A Figura 59 apresenta os planos de ruptura que surgiram em alguns corpos de prova após o processo de ruptura.



Figura 60: Corpo de prova antes e após o ensaio de compressão simples.

3.2.5.

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

Para caracterizar o comportamento hidráulico do solo foram realizados 15 ensaios de condutividade hidráulica, sendo 5 (cinco) ensaios para cada energia de compactação utilizada.

Para os ensaios de condutividade hidráulica foram utilizados corpos de prova cilíndricos, cujas dimensões médias são 3,8 cm de diâmetro e 3,6 cm de altura. Estes cilindros foram obtidos a partir dos corpos de prova provenientes dos ensaios de compactação (vide Figura 57).

Os ensaios foram realizados em um permeâmetro de parede flexível, no LGMA (Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente), da PUC-Rio, segundo as especificações e procedimentos apresentados na norma ASTM D 5084 (ASTM, 1990). O equipamento utilizado nos ensaios é mostrado na Figura 60.

Depois de obtidas a amostra procede-se a montagem do equipamento e a acomodação da amostra. A primeira ação é a saturação de todas as linhas de aplicação de pressão a fim de evitar a presença de bolhas de ar (Figura 61).

Em seguida, verifica-se a membrana de látex. Colocando-a em uma haste com dois discos de acrílico (um em cada extremidade), fixando a membrana nos discos com o auxílio de anéis de borracha. Essa haste possui furos em seu comprimento e uma válvula em uma das extremidades que permitem inflar a membrana. Com a membrana inflada, mergulha-se em um recipiente cheio de água a fim de perceber bolhas de ar, o que indicaria algum furo na membrana, este processo é mostrado na Figura 62.



Figura 61: Equipamento utilizado.



Figura 62: Saturação das linhas de fluxo.



Figura 63: Teste da membrana.

Após esta verificação, segue a acomodação da amostra (como mostrado na Figura 63) e em seguida da membrana no equipamento. Sobre o pedestal coloca-se uma pedra porosa grossa saturada. Sobre essa, um papel filtro Whatman n° 40 úmido. Depois o corpo de prova, outro papel filtro úmido e outra pedra porosa.

O papel filtro tem a função de impedir que grãos de solo passem para a pedra porosa, entupindo-a, impedindo, assim, dessa última, exercer sua função de distribuir a pressão aplicada no topo e na base uniformemente pela área do corpo de prova. Após colocar última pedra porosa, coloca-se um quepe de acrílico, por onde se aplica a pressão de água no topo da amostra.

Então, passa-se a membrana para o encamisador (consiste em um cilindro bipartido) com quatro anéis de borracha, que auxiliaram na vedação da membrana no topo e na base da câmara triaxial. Aplica-se uma sucção para que a membrana fique aderida ao encamisador e essa possa ser colocada no corpo de prova cilíndrico sem perturbá-lo. Empurram-se dois anéis de borracha para baixo, fixando-os no pedestal inferior e, posteriormente, os outros dois anéis para cima, fixando-os no quepe superior. Assim, o encamisador fica solto da amostra que está pronta para ser ensaiada. A Figura 64 apresenta todas as etapas de colocação da membrana.



Figura 64: Montagem e acomodação da amostra.

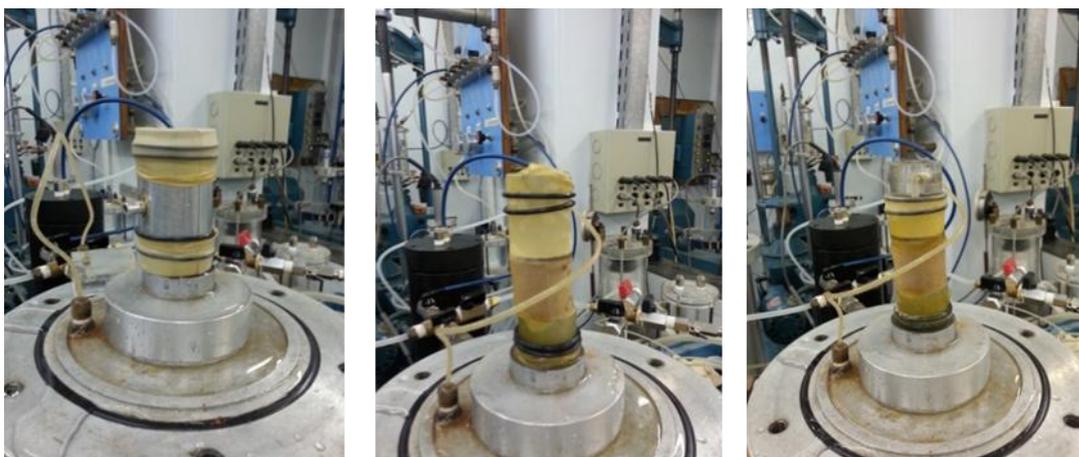


Figura 65: Colocação da membrana.

Por fim fecha-se a câmara triaxial e enchendo-a completamente de água destilada procede-se o ensaio. Observando a Figura 65, pode-se ver a câmara em processo de enchimento.

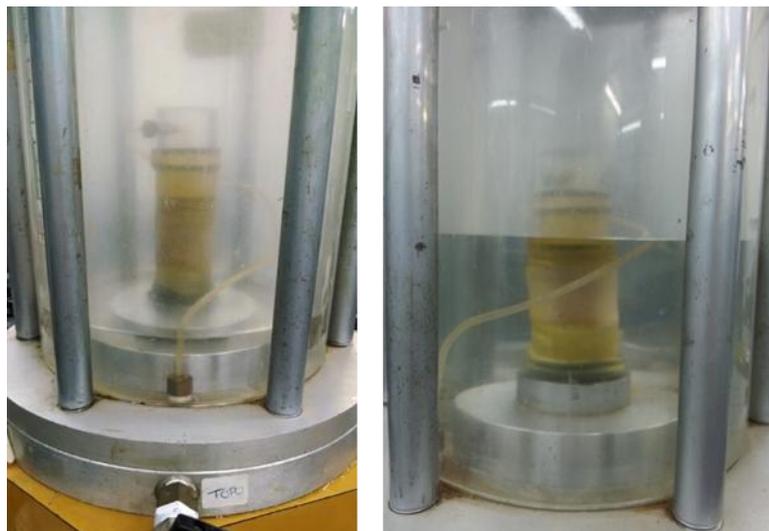


Figura 66: Enchimento da Câmara

Com a montagem do ensaio completa, seguem-se as etapas de saturação do corpo de prova e percolação.

Existem diferentes técnicas de saturação do corpo de prova. Neste estudo utilizou-se a técnica de saturação por contrapressão e percolação, onde se aplica uma tensão confinante e em seguida poro pressões iguais no topo e na base (contrapressão). Segundo Dourado (2003) este procedimento em que se aumenta concomitantemente a pressão confinante e a contrapressão tem como objetivo a saturação do corpo de prova, pois o ar presente nos poros da amostra dissolve-se na fase líquida, em um processo que pode demorar poucas horas ou vários dias, dependendo do solo.

A saturação é alcançada por incrementos de pressão confinante e de contrapressão como é proposto por Head (1994). Em cada incremento pode-se verificar o valor do parâmetro B de poropressão proposto por Skempton (1954):

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_c \quad (3.5)$$

Em que:

Δu é a variação da poropressão (KPa);

$\Delta \sigma_c$ é a variação da pressão confinante (KPa).

A saturação é atingida quando para um acréscimo de pressão na câmara (tensão confinante) registra-se acréscimo de poropressão de forma que o parâmetro B se aproxime do valor 1,0. Segundo a norma americana ASTM D 5084 (ASTM, 1990), o corpo de prova pode ser considerado adequadamente saturado se B for maior ou igual a 0,95.

Uma vez comprovada à saturação da amostra, realiza-se a fase de percolação do teste de condutividade hidráulica impondo-se uma diferença de pressão entre o topo e a base da amostra, proporcionando assim um fluxo vertical ascendente através do corpo de prova.

O valor da condutividade hidráulica é obtido pela expressão dada a seguir:

$$k = \frac{q}{iA} \quad (3.6)$$

Em que:

k é a condutividade hidráulica (m/s);

q é a vazão que passa pela amostra (m³/s);

i é o gradiente hidráulico ($i = \Delta p/L$);

A é área da seção da amostra (m^2).

A vazão é obtida fazendo-se pelo quociente entre o volume lixiviado e o tempo decorrido, já o gradiente hidráulico é obtido pela razão da variação de pressão e a altura do corpo de prova, assim tem-se:

$$q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.7)$$

Em que:

q é a vazão que passa pela amostra (m^3/s);

ΔV é a variação de volume (m^3);

Δt é a variação do tempo (s).

$$\Delta p = \frac{P1 - P2}{L} \quad (3.8)$$

Em que:

Δp é a variação da pressão (KPa);

P1 é a pressão na base da amostra (KPa);

P2 é a pressão no topo da amostra (KPa);

L é o comprimento do corpo de prova (m).

A partir das equações 3.6, 3.7 e 3.8, a condutividade hidráulica é obtida diretamente pela expressão resultante:

$$k = \frac{\Delta V}{\Delta t \Delta p A} \quad (3.9)$$

Em que:

ΔV é a variação de volume (m^3);

Δt é a variação do tempo (s);

Δp é a variação da pressão (KPa);

A é área da seção da amostra (m^2).

3.2.6.

ENSAIOS DE CONTRAÇÃO

O ensaio de contração foi realizado seguindo a mesma metodologia adotada por Macanbira (2005) e Piedade JR (2002) também utilizada pela Prefeitura do Município de Recife (2003). Este método prescreve como se determina a contração axial por perda de umidade por secagem ao ar de solos compactados. O equipamento de medição da contração em função do tempo de secagem é visto na Figura 68. Esse equipamento foi construído no laboratório de geotecnia da PUC-Rio, seguindo as especificações da norma citada (Figura 66).

O conhecimento do comportamento contráctil do solo é de grande importância, por seu intermédio é possível prever a formação de trincas de contração, que podem comprometer a eficiência do *liner*.



Figura 67: Equipamento do Ensaio de Contração.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram os mesmos utilizados nos ensaios de condutividade hidráulica com o objetivo de garantir as mesmas condições de compactação em ambos os ensaios.

Após o ensaio de condutividade hidráulica cada corpo de prova foi determinado o diâmetro e a altura em três posições distintas com o auxílio de um paquímetro.

Em seguida cada corpo de prova foi transferido para o equipamento de ensaio de contração, onde se colocam duas pedras porosas, uma na face superior e outra na face inferior do corpo de prova e centrando-se cuidadosamente o mesmo. Então se ajusta o relógio comparador, marcando-se a leitura inicial e efetuam-se leituras diariamente.

É importante anotar eventual aparecimento de trincas, registrando o tipo observado, de preferência mediante um croqui e também realizar a pesagem do corpo-de-prova.

Por fim calcula-se a contração axial, diametral ou volumétrica através de uma das equações a seguir:

Contração Axial

$$CA = \frac{100 \cdot (L_i - L_f)}{A_i} \quad (3.10)$$

Em que:

CA é a contração axial;

L_i é o valor leitura inicial do relógio comparador;

L_f é o valor leitura final do relógio comparador;

A_i é o valor altura inicial do corpo-de-prova.

A contração é expressa em porcentagem, com aproximação de 0,1.

Contração Diametral

$$CD = \frac{100 \cdot (d_i - d_f)}{d_i} \quad (3.11)$$

Em que:

CD é a contração diametral;

d_i é o valor médio inicial do diâmetro da amostra;

d_f é o valor médio final do diâmetro da amostra;

d_i é o valor médio inicial do diâmetro da amostra;

A contração é expressa em porcentagem, com aproximação de 0,1.

Contração Volumétrica

$$CV = \frac{100 \cdot (V_i - V_f)}{V_i} \quad (3.12)$$

Em que:

CV é a contração volumétrica;

V_i é o valor médio inicial do volume da amostra;

V_f é o valor médio final do volume da amostra;

V_i é o valor médio inicial do volume da amostra;

A contração é expressa em porcentagem, com aproximação de 0,1.