

## 4 Investigações de laboratório

A composição químico-mineralógica e a micromorfologia dos solos tropicais impõem a eles condições diferenciadas de comportamento. Assim, visando contribuir para o entendimento de aspectos geotécnicos do comportamento do solo residual de granito-gnaiss da região de Campo Magro, um amplo programa de ensaios de laboratório foi implementado no decorrer do presente estudo. Os trabalhos de escavação, coleta de amostras e sondagem estão descritos no Capítulo 3.

A Tabela 4.1 traz um resumo dos ensaios realizados. As amostras de solo foram agrupadas em cinco camadas conforme descrito no Capítulo 3. Todas as amostras foram estudadas dentro de um programa que envolveu ensaios de caracterização física, porosimetria de mercúrio, análises químicas, difratometria de raios-X, microscopia óptica, análises microbiológicas, cisalhamento direto e erodibilidade. Os ensaios foram escolhidos focando-se obter parâmetros que pudessem ser correlacionados entre si e com o grau de intemperismo. A quantidade de ensaios foi definida a partir de observações de campo nas quais pôde se constatar visualmente a divisão do perfil em cinco camadas de solo distintas. Foram ensaiadas amostras de rocha de quatro diferentes profundidades.

Tabela 4.1 – Ensaios realizados

Solo Marrom																
Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou muflo	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade	
2.4101.05	1,5	I	sim		sim											
2.4102.05	1,3	I		sim	sim											
2.4115.05	1,1	I	sim	sim	sim											
2.4118.05	1,6	I	sim	sim	sim											
2.4105.05	1,5	I	sim	sim												
2.4117.05	1,5	I			sim											
2.4116.05	1,5	I					parcial	sim	Embrapa					sim		
2.4495.05	2,0	I		sim	sim				muflo					sim		
2.4240.05	2,2	I												sim		
2.4438.05	2,6	I				sim										
2.4113.05	1,1	I					total					sim				
2.4108.05	1,3	I									sim					
2.4518.05	1,7												sim			
2.4112.05	1,8	I														sim

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

continuação

Solo Vermelho															
Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalramento direto	Desagregabilidade
2.4523.05	2,0	D	sim		sim		ambas	sim	ambas	sim	sim				
2.4522.05	2,5	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim					
2.4353.05	2,8	I	sim	sim											
2.4237.05	2,5	I	sim	sim	sim										
2.4239.05	2,5	I	sim	sim	sim										
2.4355.05	3,1	I			sim										
2.4241.05	3,2	I				sim								sim	
2.4400.05	3,5	I												sim	
2.4234.05	2,2	I												sim	
2.4233.05	2,2	I												sim	
2.4517.05	2,5	I											sim		

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

continuação

Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade	
																Solo Laranja
2.4528.05	6,8	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim	sim					
2.4043.05	7,3	I		sim											sim	
2.4017.05	6,9	I	sim	sim												
2.4069.05	6,8	I	sim													
2.4090.05	6,7	I	sim	sim	sim											
2.4040.05	7,3	I	sim	sim	sim											
2.4093.05	6,8	I		sim												
2.4094.05	7,2	I		sim	sim									sim		
2.4005.05	6,8	I														
2.4018.05	7,0	I												sim		
2.4516.05	6,8	I											sim			
2.4352.05	6,2	I				sim										
2.4042.05	7,2	I										sim				

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

continuação

Solo Amarelo															
Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade
2.4527.05	7,2	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim					
2.4526.05	7,5	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim					
2.4521.05	9,0	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim	sim				
2.4072.05	8,7	I	sim	sim	sim										
2.4049.05	9,2	I	sim	sim								sim			
2.4077.05	6,9	I	sim	sim											
2.4097.05	7,0	I	sim	sim											
2.4021.05	8,9	I	sim	sim	sim										
2.4025.05	9,1	I													
2.4342.05	6,4	I												sim	
2.4211.05	7,5	I				sim								sim	
2.4343.05	6,9	I												sim	
2.4024.05	9,0	I												sim	sim
2.4095.05	7,2	I													
2.4515.05	7,8	I											sim		

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

continuação

Solo Branco

Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade
2.4525.05	9,5	D	sim	sim	sim		ambas	sim	ambas	sim					
2.4520.05	10,0	D	sim	sim			ambas	sim	ambas	sim					
2.4524.05	11,0	D	sim				ambas	sim	ambas	sim	sim				
2.4002.05	8,9	I	sim	sim											
2.4011.05	11,1	I	sim	sim											
2.4016.05	11,1	I	sim	sim											
2.4055.05	11,2	I	sim												
2.4006.05	11,0	I	sim	sim	sim										
2.4030.05	11,1	I	sim	sim	sim										
2.4033.05	10,9	I	sim	sim	sim										
2.4035.05	11,1	I		sim											
2.4338.05	10,7	I				sim									
2.4038.05	7,0	I												sim	
2.4088.05	10,8	I												sim	
2.4037.05	8,9	I												sim	
2.4013.05	11,2	I												sim	sim
2.4026.05	11,3	I										sim			
2.4514.05	10,1	I											sim		

D – Deformada; I – Indeformada

continua

Tabela 4.1 - Ensaios realizados

Registro da amostra	Prof. (m)	Tipo	Curva granulométrica	Massa Específica ABNT e/ou DNER	LL e LP	Porosimetria de mercúrio	Análise Química total e/ou parcial	pH	Matéria orgânica Embrapa e/ou mufla	Lupa	Difração de raios-X	Microscopia óptica/Petrografia	Microbiologia	Cisalhamento direto	Desagregabilidade	conclusão
R 01	19,9					sim	total	sim			sim	sim				
R 02	24,4					sim	total	sim			sim	sim				
R 03	25,5					sim	total	sim			sim	sim				
R 04	25,8					sim	total	sim			sim	sim				

O trabalho de coleta das amostras foi realizado pelo LAME/LACTEC – Laboratório de Materiais e Estruturas, Centro Politécnico da UFPR. Os blocos indeformados, devidamente protegidos com parafina, bem como as amostras deformadas envoltas em sacos plásticos foram armazenados em câmara úmida.

A numeração das amostras de solo relacionadas na Tabela 4.1 refere-se ao cadastro utilizado no sistema de qualidade do LAME/LACTEC. À exceção dos dois últimos algarismos, que indicam o ano em que a amostra foi registrada, os demais códigos não acrescentam informações específicas. No presente trabalho optou-se por manter o registro original de modo a facilitar o cruzamento futuro de dados, na continuidade das pesquisas.

Os testemunhos obtidos na sondagem rotativa foram numerados em ordem crescente com a profundidade e precedidos pela letra “R”, indicando tratar-se de rocha.

Nos itens a seguir o estudo desenvolvido em laboratório será apresentado, descrevendo-se as amostras, equipamentos e procedimentos utilizados.

Desta forma optou-se pela avaliação de sete parâmetros para a caracterização do perfil em grupos de ensaios: físicos, químicos, mineralógicos, micromorfológicos, microbiológicos, de resistência e de erodibilidade.

Visando um melhor conhecimento das propriedades físicas do perfil estudado determinou-se:

- Propriedades índice (limites de Atterberg, granulometria e peso específico dos grãos);
- Porosimetria de mercúrio.

Para determinar as propriedades químicas do perfil optou-se pela realização dos seguintes ensaios:

- Análise química total;
- Análise química parcial;
- Determinação de pH e matéria orgânica.

Estes ensaios foram realizados no LAMIR - Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da UFPR, na EMBRAPA-Solos e no LAME/LACTEC.

Para determinar as propriedades mineralógicas e micromorfológicas de todo o perfil optou-se pela realização de:

- Microscopia óptica (lupa binocular) na fração areia;
- Difração por raios-X em amostras de solo e amostras de rocha;
- Microscopia óptica em lâminas de rocha (petrografia) e solo (micromorfologia).

Os ensaios acima foram realizados em parte no LAME/LACTEC e em parte no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Para avaliação das propriedades microbiológicas do solo do perfil, foram utilizados dois parâmetros:

- Contagem de microrganismos viáveis e cultiváveis;
- Atividade microbiana degradadora total.

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Como ensaio de resistência foi realizado o ensaio de cisalhamento direto e para caracterizar a variação no grau de erodibilidade dos solos do perfil, foi realizado o ensaio de desagregabilidade. Estes ensaios também foram conduzidos no LAME/LACTEC.

#### **4.1. Caracterização física**

##### **4.1.1. Propriedades índice**

Para avaliar as propriedades índice básicas do solo residual estudado, um programa de ensaios de caracterização contemplou boa parte do material coletado nas diferentes profundidades. As amostras utilizadas nesses ensaios estão relacionadas na Tabela 4.1. Além de se ter estudado amostras de solo deformadas provenientes das cinco diferentes profundidades do perfil, procedeu-se também à análise de material restante dos blocos indeformados que foram utilizados em outros ensaios.

O trabalho foi desenvolvido no LAME/LACTEC. Esta instituição possui um sistema de qualidade e ensaios geotécnicos credenciados pelo INMETRO, bem como a certificação ISO 9002/94. A maioria dos equipamentos (extensômetros, transdutores, vidraria, balanças e outros dispositivos) conta com certificados de calibração que são renovados periodicamente. As instalações do laboratório incluem sistemas de controle de temperatura e umidade.

Os procedimentos para os ensaios de caracterização foram desenvolvidos segundo as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 6457/1986 – Amostra de Solos – Preparação para Ensaio de Compactação e Caracterização;

- NBR 6457/1986 – Teor de Umidade Natural;
- NBR 6508/1984 – Massa Específica Real dos Grãos;
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica.

A partir dos ensaios de limite e distribuição granulométrica, foram também determinados por fórmulas, os seguintes índices físicos:

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

$$I_a = \frac{IP}{\% < 2\mu m}$$

$\% < 2 \mu m$  = fração argila

Classificação segundo a fração argila presente no solo:

- $I_a < 0,75$                       inativas
- $1,25 > I_a > 0,75$               atividade normal
- $I_a > 1,25$                         ativa

Com as amostras indeformadas, obteve-se:

- Peso específico real dos grãos  $\gamma_s = \rho_s \times g$ , sendo  $\rho_s$  a massa específica real dos grãos e  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,81\text{m/s}^2$ );
- Peso específico natural  $\gamma_{nat} = \rho_{nat} \times g$ , sendo  $\rho_{nat}$  a massa específica natural e  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,81\text{m/s}^2$ );
- Peso específico seco  $\gamma_d = \gamma_{nat}/(1+w_{nat})$  sendo  $w_{nat}$  a umidade natural do solo;
- Índice de vazios ( $e$ ), determinado pela equação:  $e = (\gamma_s/\gamma_d) - 1$ ;
- Porosidade ( $n$ , %), determinada a partir da equação:  $n = e/(1 + e)$ ;
- Grau da saturação ( $S$ ,%), obtida através da equação:  $S = (\rho_s \cdot w_{nat})/(e \cdot \rho_w)$ , sendo  $w_{nat}$  a umidade natural do solo e  $\rho_w$  a massa específica da água a  $4^\circ\text{C}$  ( $1 \text{ g/cm}^3$ ).

#### 4.1.2. Porosimetria de mercúrio

O uso da técnica de injeção de mercúrio constitui uma importante ferramenta no estudo da microestrutura do solo e tem sido utilizada como uma

técnica experimental para se caracterizar vários aspectos dos materiais porosos e dos pós. Estes ensaios fornecem a distribuição dos diversos tamanhos de poros e suas porcentagens relativas ao volume de vazios do solo.

Assim, este trabalho abrangeu também ensaios de injeção de mercúrio tanto em amostras de solo quanto de rocha com o objetivo de se obter a distribuição das dimensões dos poros nos diversos horizontes estudados. Tal estudo envolveu amostras moldadas de blocos indeformados coletados ao longo do perfil bem como amostras moldadas a partir dos testemunhos de sondagem obtidos da perfuração da rocha matriz. As amostras utilizadas nesses ensaios estão relacionadas na Tabela 4.1. Todos os ensaios de injeção de mercúrio foram realizados no Laboratório da Fundação de Apoio à Física e à Química da Universidade de São Carlos.

A técnica se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias. Por conseqüência, não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele.

Se uma amostra de um sólido poroso é encerrada num recipiente dotado de um capilar, sendo feito o vácuo sobre a mesma e sendo preenchido o recipiente e o capilar com mercúrio, ao se aumentar a pressão sobre o líquido este penetrará nos poros da amostra reduzindo seu nível no capilar (Figura 4.1).

Registrando-se a redução do nível de mercúrio no capilar ( $h$ ) juntamente com a pressão aplicada ( $p_2$ ), uma curva de porosimetria é obtida informando qual volume de poros do material foi penetrado pelo mercúrio a uma dada pressão. Os ensaios de porosimetria fornecem basicamente duas curvas, a curva de volume acumulado e um histograma de freqüência contínuo dos diversos diâmetros de poros constituintes da estrutura do solo. Com a primeira é possível obter-se, para um determinado diâmetro de poro, as porcentagens, em relação ao volume de vazios total da amostra, dos poros de diâmetro maior ou menor do que o considerado. Já a segunda curva, curva de  $dv/d(\log d)$ , uma espécie de derivada da curva anterior, fornece os intervalos de diâmetros de poros por classe.

Em equipamentos comerciais, como o porosímetro *Micromeritics PoreSizer 9320* disponível no Laboratório da Fundação de Apoio à Física e à Química da Universidade de São Carlos, poros de diâmetro a partir de 0,7 mm podem ser investigados, a uma pressão de aproximadamente 0,0017 MPa (0,17 atm) até poros de 0,000006 mm ou 60 ângstrons de diâmetro, que correspondem a uma pressão de 212 MPa (2000 atm).

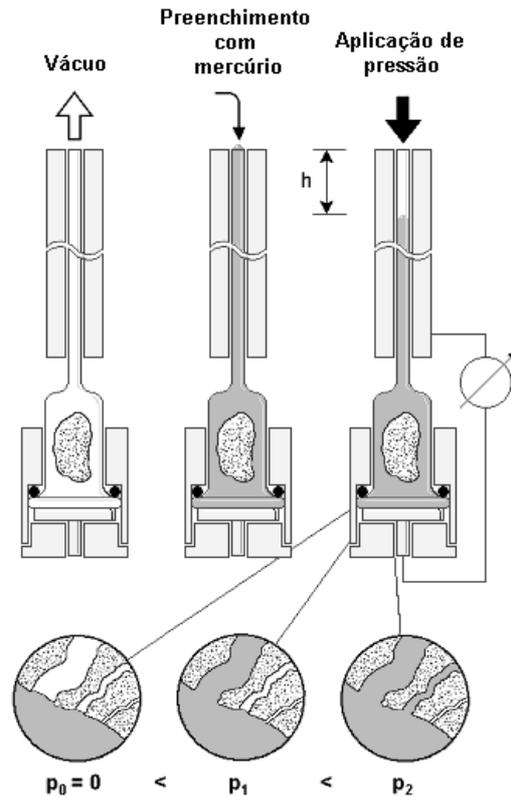


Figura 4.1 – Princípio da porosimetria por intrusão de mercúrio

A preparação das amostras foi realizada de forma que sua microestrutura não fosse alterada. As de solo foram cortadas em formato cilíndrico com serra de aço em dimensões de aproximadamente 15 milímetros de diâmetro e 24 milímetros de comprimento. Os corpos cilíndricos foram colocados para secar em fornos tipo mufla, a 40°C, por 24 horas para se eliminar o excesso de água. Após a secagem as amostras foram ensaiadas no equipamento *Porosizer 9320 Micromeritics* (Figura 4.2). Para as amostras de rocha, corpos cilíndricos cortados com serra de diamante de dimensões similares foram ensaiados. Não foi preciso nestes casos fazer a etapa de secagem.



Figura 4.2 – Porosizer 9320 Micromeritics

Após sua preparação e pesagem, cada amostra foi colocada em um porta-amostra e o conjunto foi pesado (porta-amostra + amostra). O porta-amostra foi levado para a câmara de baixa pressão, onde foi aplicado vácuo para que o mercúrio ocupasse todo o espaço vazio do porta amostra. Após esta etapa, aplicaram-se manualmente pressões pneumáticas de 0,5 psi a 25 psi.

O porta-amostra foi novamente pesado (porta-amostra + amostra + mercúrio) e levado para a câmara hidráulica e automática de alta pressão onde foram aplicadas pressões de 25 psi a 30.000 psi. Esta etapa é chamada de intrusão. Depois, o equipamento reduziu, também de forma automática, a pressão para 25 psi, etapa esta denominada extrusão.

## **4.2. Caracterização química**

Das formas de intemperismo que propiciam a formação e evolução dos solos, o químico assume papel de destaque em regiões intertropicais, dadas as condições climáticas favoráveis. Por esta razão, foram realizadas neste trabalho análises químicas totais e determinação de pH em amostras de solos e de rochas de todo o perfil, bem como análises químicas parciais e determinação de matéria orgânica apenas em amostras de solo.

### **4.2.1. Análise química total**

Com o objetivo de quantificar a evolução do intemperismo químico e assim estabelecer correlações entre ele e as demais propriedades investigadas, foram realizadas análises químicas totais em amostras de solo e de rocha. As amostras de solo e de rocha utilizadas nesses ensaios estão relacionadas na Tabela 4.1. As análises químicas totais foram realizadas no LAMIR. Nas amostras de solo os elementos foram determinados por fluorescência de raios-X a partir da confecção de pastilhas prensadas de material pulverizado. Já nas amostras de rocha foi utilizada a técnica de fluorescência de raios-X em amostras fundidas com tetraborato de lítio. Através destas análises foi possível determinar os teores de Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Titânio ( $\text{TiO}_2$ ), Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Cálcio ( $\text{CaO}$ ), Magnésio ( $\text{MgO}$ ), Sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e Potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) nas amostras de solo inicialmente propostas e também nas amostras de rocha. Estes resultados foram utilizados para o cálculo dos seguintes índices químicos de intemperismo que são calculados em porcentagem de óxidos:

$$ba = \frac{K_2O + Na_2O + CaO}{Al_2O_3}$$

$$ba_1 = \frac{K_2O + Na_2O}{Al_2O_3}$$

$$ba_2 = \frac{CaO + MgO}{Al_2O_3}$$

Para efeitos de correlações o índice utilizado foi o **ba<sub>1</sub>**. Isto porque o perfil de solo em questão provém de rochas ácidas e, portanto, suas quantidades de potássio e sódio são mais representativas que os teores de cálcio e magnésio.

Na análise química total foi também determinado o índice de perda ao fogo (P.F.). Para análise de perda ao fogo uma pequena quantidade de material (solo ou rocha pulverizada) foi seca a 100°C por 12 horas. Depois, foi levada ao dessecador por cerca de 45 minutos para esfriar. Na seqüência, aproximadamente 2 g do material foi levado à mufla e submetido a uma temperatura de 1000 °C, por 3 horas, em um cadinho de porcelana, com descrição de seu peso. Novamente o material foi esfriado no dessecador e, na seqüência, pesado, calculando-se assim a perda de massa. Essa perda é denominada perda ao fogo.

O índice de perda ao fogo está diretamente relacionado ao grau de alteração dos minerais e à formação dos argilominerais e hidróxidos de ferro e alumínio. Assim, este índice pode ser usado para correlacionar outras propriedades dos solos do perfil estudado com o seu grau de alteração.

#### 4.2.2. Análise química parcial

As análises químicas parciais (ataque sulfúrico e complexo sortivo) foram executadas pela EMBRAPA - Solos segundo o que consta no Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 1997). As amostras de solo utilizadas para estas análises constam da Tabela 4.1. O ataque por ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 1:1 foi utilizado para as seguintes determinações:

- SiO<sub>2</sub>,
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,
- TiO<sub>2</sub>,

O ensaio de complexo sortivo, que forneceu as quantidades de Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Al.<sup>+++</sup>, K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> permutáveis e o valor T (ou CTC) de capacidade de troca

catiônica. Com este dado, foi possível obter a superfície específica (S.E.) dos materiais. A superfície específica é determinada a partir do volume do azul de metileno absorvido pelos minerais argilosos. O fator que converte o valor T para S.E. é 7,8043. Este fator está relacionado às dimensões da molécula de azul de metileno.

A capacidade de troca de cátions é a soma das cargas elétricas negativas. Quando o número de cargas elétricas negativas é alto, tem-se uma argila de atividade alta. Os óxidos de ferro têm o poder de colorir o solo tornando-o avermelhado (hematita) ou amarelado (goethita). A ocorrência do ferro na sua forma mais solúvel ( $Fe^{2+}$ ) está associada a condições anaeróbicas, que são aquelas em que há falta de oxigênio no meio ambiente, normalmente verificada em áreas próximas a rios e drenagens. Quando a condição é aeróbica, a alta concentração de oxigênio favorece a presença do ferro menos solúvel ( $Fe^{3+}$ ). O nível do lençol freático também influencia no tipo de ferro presente no solo, pois está diretamente relacionado às condições aeróbicas ou anaeróbicas.

Baseado no fato de que o processo inicial de intemperismo causa a lixiviação dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos, a concentração de sílica, alumínio e sesquióxido de ferro, os resultados do ataque sulfúrico foram utilizados para o cálculo das relações moleculares  $K_i$  e  $K_r$ , conforme segue. Estas relações são comumente usadas para indicar o grau de alteração dos solos.

$$K_i = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$$
$$K_r = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)}$$

#### **4.2.3. pH e matéria orgânica**

O pH do solo foi determinado em água e também em KCl normal pela EMBRAPA - Solos segundo o que consta no Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 1997).

Para as amostras de rocha foi determinado no LAME/LACTEC apenas o pH em água. Esta determinação foi feita a partir de amostras de rocha pulverizadas submetidas ao método de determinação de pH em água constante do Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 1997).

Determinou-se o teor de carbono orgânico por oxidação da matéria orgânica com bicromato de potássio 0,4N. Multiplicando o valor obtido por 1,7, foi calculada a quantidade de matéria orgânica, em g/kg. Estas determinações foram obtidas pela EMBRAPA - Solos segundo o que consta no Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 1997).

A porcentagem de matéria orgânica presente em cada solo foi também determinada no LAME/LACTEC a partir da diferença de massa das amostras de solo antes e depois de aquecidas a 400° em uma mufla, por 4 horas.

### **4.3. Análises mineralógicas e microestruturais**

Atualmente, as classificações de solos existentes em Geotecnia e áreas afins correspondem ao comportamento geral de diferentes grupos de solos. Estas classificações muitas vezes são superficiais e podem conduzir a ambigüidades devido às formas empíricas utilizadas para obtenção dos parâmetros usados na classificação. A caracterização mineralógica das diversas frações do solo pode contribuir para melhor definir seus parâmetros de classificação. Certamente, sem uma análise mineralógica, uma mesma classificação pode ser atribuída a solos com demais características similares, mas com diferentes índices mineralógicos. Se isto ocorrer, diferenças de comportamento oriundas da mineralogia serão dificilmente detectadas pela classificação dos solos. Em razão disto, a metodologia desta pesquisa fez uso da lupa binocular, da técnica de difração de raios-X e da microscopia óptica/petrografia para identificar os minerais presentes em todo o perfil.

#### **4.3.1. Observação em lupa binocular**

Foi realizada em lupa binocular a caracterização mineralógica das frações pedregulho e areia, ou seja, do material retido na peneira nº 200 (0,074mm), de amostras de solo coletadas em diferentes profundidades ao longo do perfil. De acordo com a classificação do MIT o material retido na peneira nº 200 inclui a fração pedregulho, areia grossa, areia média e areia fina. A análise foi realizada no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. As amostras de solo utilizadas para estas identificações estão listadas na Tabela 4.1.

### 4.3.2. Difração de raios-X

A difratometria de raios-X é um método comumente utilizado na identificação dos minerais presentes em solos e rochas. O princípio desta técnica consiste em se registrar os ângulos associados à reflexão de um feixe de elétrons incidente em uma amostra. Cada mineral gera um conjunto característico de reflexões segundo ângulos  $\theta$ , que podem ser convertidos nos espaços interplanares formados por seus planos cristalinos.

Neste trabalho, foram estudadas amostras de solo e de rocha de diferentes graus de intemperismo utilizando-se a técnica de difratometria de raios-X em uma série de ensaios conduzidos no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio e no LAMIR. Foram analisadas as frações silte e argila dos solos bem como amostras de rocha pulverizadas. As amostras de solo e de rocha utilizadas estão identificadas na Tabela 4.1.

O preparo das amostras de solo envolveu a técnica do “esfregaço”. Nesta técnica as frações silte e argila foram espalhadas com a ajuda dos dedos sobre lâminas de vidro, de modo que se obtivesse uma fina camada de material. Já com o material a lâmina foi posta para secar ao ar. A lâmina não foi totalmente coberta com material para que houvesse um espaço para manuseio e etiquetagem.

A análise mineralógica foi então realizada com o difratômetro do DCMM - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, que apresenta as seguintes características:

- Marca Philips;
- Tubo de raios-X de alvo de cobre;
- Filtro de níquel para absorver as radiações branca e K-beta;
- Detector do tipo contador proporcional;
- Corrente elétrica de 10 mA;
- Diferença de potencial de 40 kV
- Velocidade de goniômetro de 2°/minuto;
- Velocidade do papel registrador de 1200 milímetros/hora;
- Fator de escala de amplificação de 1000 c.p.s. (contagens por segundo);
- Constante de tempo igual a 1.

As leituras dos difratogramas foram executadas abrangendo ângulos  $2\theta$  de 2 a 30°. Como alguns minerais apresentam seus picos apenas para ângulos maiores que 30°, foi necessário repetir as análises para a confirmação destes

minerais. Optou-se então por repeti-las para a fração silte. As leituras foram feitas para ângulos  $2\theta$  de 3 a  $70^\circ$ . Estas análises foram realizadas no LAMIR.

Analisando-se os difratogramas obtidos optou-se por realizar aquecimento e glicolagem na amostra 2.4524.05, de solo Branco. O aquecimento, num forno especial, foi feito em duas etapas:  $350^\circ\text{C}$  por 2 horas e  $550^\circ\text{C}$  por 2 horas. No caso de glicolagem a lâmina foi submetida a uma atmosfera de etileno-glicol por um período mínimo de 4 horas. A glicolagem e/ou aquecimento servem para diferenciar argilominerais que apresentam uma mesma distância interplanar basal numa montagem normal.

O preparo das amostras de rocha envolveu o “método do pó”. Nesta técnica os testemunhos de sondagem foram pulverizados e prensados manualmente sobre uma lâmina. Tanto a análise com tratamento quanto a análise mineralógica das amostras de rocha foram também realizadas com o difratômetro do LAMIR que apresenta as seguintes características:

- Marca Philips Analytical modelo PW-1830;
- Tubo de raios x de difração foco longo modelo PW 2273/20;
- Goniômetro vertical com geometria  $\theta/2\theta$  modelo PW 3020/00.

As leituras dos difratogramas foram executadas abrangendo ângulos  $2\theta$  de 3 a  $70^\circ$ .

### **4.3.3. Petrografia**

Para complementar a identificação dos minerais presentes nos testemunhos de sondagem da rocha do perfil, foram preparadas lâminas delgadas de rocha para análise petrográfica. Foram estudadas amostras de rocha, identificadas na Tabela 4.1, de diferentes graus de alteração. As lâminas foram preparadas no Laboratório da UFRRJ pelo Professor Rubem Porto Jr. e as análises, também auxiliadas por ele, foram conduzidas no microscópio petrográfico do DCMM.

As lâminas foram confeccionadas a partir de fatias de rochas muito finas que foram inicialmente polidas com pó abrasivo grosso (nº 200), intermediário (nº 400) e fino (nº 600) e depois coladas numa lâmina de vidro previamente polida.

A lâmina, já com a rocha, foi novamente polida com abrasivo até que atingisse a espessura de  $70\ \mu\text{m}$ . Tentou-se então chegar a uma espessura de  $40\ \mu\text{m}$  com uma nova fase de polimento, mas isso não foi possível, pois as

amostras são de rochas já muito intemperizadas e apresentavam descolamento de partículas nesta fase. Não foi colocada uma lamínula sobre a lâmina para que se pudesse fazer posteriormente a análise com o microscópio eletrônico de varredura.

#### 4.3.4. Micromorfologia dos solos

O estudo da micromorfologia vem a cada dia se tornando mais importante dentro da ciência da pedologia, pois permite uma melhor interpretação dos mecanismos e processos de alteração dos solos.

A micromorfologia de solo corresponde à análise microscópica dos solos quanto ao tipo e arranjo de seus constituintes, em lâminas delgadas, com auxílio de equipamentos ópticos (estereomicroscópio, microscópio óptico e microscópio eletrônico). Com o advento da análise de imagem digital, esta ferramenta vem adquirindo cada vez mais espaço na análise qualitativa e quantitativa (micromorfometria) da estrutura e da porosidade do solo.

Com o intuito de obter uma análise do arranjo espacial dos constituintes e da porosidade do solo, de modo a complementar as análises físicas já disponíveis, e também de complementar o estudo da mineralogia dos solos, foram analisadas sob microscópio óptico amostras indeformadas de solo de 4 diferentes profundidades. As amostras de solo utilizadas estão identificadas na Tabela 4.1. As análises foram realizadas no microscópio petrográfico do DCMM.

Em laboratório, foram selecionadas as amostras utilizadas para tais ensaios. Depois de selecionadas, as amostras foram desencamisadas e a partir delas foram moldados blocos em dimensões apropriadas para a impregnação (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Bloco de solo sendo moldado para impregnação

Após a moldagem, os blocos de solo foram secos ao ar e impregnados a vácuo no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFRJ.

Para impregnação utilizou-se uma mistura de resina do tipo epóxi, endurecedor e álcool etílico (solvente), na proporção de 5:2:1.

Para melhor caracterização e estimativa da porosidade tanto nas lâminas grandes, quanto nas seções delgadas, foi adicionado à mistura de impregnação um corante (azul de metileno). Quando necessário, efetuou-se a re-impregnação superficial de algumas amostras (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Impregnação do bloco e preparação da lâmina

A partir dos blocos impregnados foram confeccionadas lâminas delgadas pequenas (6 x 2,5cm), no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFRJ, que foram utilizadas para exame micromorfológico sob microscópio petrográfico.

Com a finalidade de realizar uma quantificação da porosidade nos solos dos quatro horizontes do perfil estudado, foram realizadas contagens dos espaços porais por intermédio do microscópio petrográfico. A descrição dos constituintes do solo nas lâminas bem como as contagens dos espaços porais através de contagem de pontos foram realizadas com auxílio do microscópio petrográfico do DCMM. Toda a parte de micromorfologia constante desta dissertação contou com o apoio dos Professores Ana Valéria Freire Allemão Bertolino e Luiz Carlos Bertolino da UERJ.

#### **4.4. Análises microbiológicas**

Algumas análises microbiológicas foram realizadas neste trabalho objetivando perceber a variação de características microbiológicas com o grau de intemperismo do solo. Foram contabilizados os microrganismos viáveis e

cultiváveis e a atividade microbiana total dos solos do perfil estudado. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

As comunidades de organismos micro e macroscópicos que habitam o solo realizam atividades imprescindíveis para a manutenção e sobrevivência das comunidades vegetais e animais.

Com base em seu tamanho, a biota do solo pode ser dividida em micro, meso e macrorganismos. Os microrganismos mais conhecidos são representados pelos vírus, archaea, bactérias, fungos filamentosos e unicelulares, protoctistas (algas e protozoários). As bactérias representam o grupo mais numeroso nos solos (Maier *et al.*, 2000).

O microhabitat ou microsítio é um local particular onde células, populações ou comunidades microbianas são encontradas e cujo estado físico-químico (microambiente) influencia o comportamento destes, que, por sua vez, também influenciam o ambiente dentro deste espaço. Microambiente do solo é uma situação físico-química na qual a célula, populações ou comunidades microbianas em particular se encontram num dado momento. Diversos fatores físicos e químicos atuam, simultaneamente, determinando as condições ambientais que não são estáticas, mas dinâmicas (Moreira e Siqueira, 2002)

A presença de um microrganismo em determinado solo é função das condições ambientais dominantes e dos limites da sua bagagem genética. Além disso, o sucesso de um organismo em qualquer habitat é função da extensão e rapidez de suas respostas fisiológicas às condições ambientais extremas de salinidade, temperatura, pressão e pH sendo, portanto, encontrados em quase todos os ecossistemas terrestres, incluindo solos.

A atividade biológica do solo é uma denominação genérica para a ação dos organismos vivos do solo, tanto animais quanto vegetais. Esses organismos têm forte influência na gênese e manutenção da organização dos constituintes do solo, principalmente nos horizontes superficiais. As raízes das plantas, por exemplo, alteram o pH do solo ao seu redor e, ao morrer e se decompor, deixam canais.

No solo as principais atividades dos organismos são: a decomposição da matéria orgânica, produção de húmus, ciclagem de nutrientes e energia, fixação de nitrogênio atmosférico e produção de compostos complexos que causam agregação do solo, proporcionando assim, condições ideais para uma biodiversidade extremamente elevada. A biodiversidade microbiana presente nos solos proporciona, principalmente em solos maduros, tratados na área agrícola

ou agrônômica, um equilíbrio que possibilita uma melhor e maior atividade de vegetais e da meso e da macrofauna.

Geralmente a quantidade de microrganismos encontrada nos solos maduros e orgânicos é de 10 a 1000 vezes maior do que nos solos subsuperficiais que apresentam também, menor quantidade de matéria orgânica. No entanto esses microrganismos mesmo que em menor número, sobrevivem nesses ambientes, aparentemente mais inóspitos à vida, às custas de diferentes possibilidades metabólicas apresentadas por inúmeras espécies microbianas.

Os microrganismos participam da gênese do hábitat onde vivem. Nos estágios iniciais de formação do solo, carbono e nitrogênio são elementos deficientes, deste modo, espécies fotossintéticas, quimiossintéticas e fixadoras de nitrogênio são importantes colonizadoras primárias de rochas. Também estão envolvidos no intemperismo através de participação em reações que liberam prótons, nutrientes inorgânicos e ácidos orgânicos (Moreira e Siqueira, 2002).

Muitos deles são capazes de oxidar sais inorgânicos, utilizando-os como fonte de poder redutor, e também de reduzir outros durante seu processo de respiração e transferência de energia, fazendo-os aceptores finais de elétrons já com baixo potencial redox. Durante esse processo esses indivíduos podem usar minerais já solubilizados e disponibilizados, através de processos físico-químicos ou, pela sua própria atividade metabólica, solubilizar minerais fixados sob forma estável em rochas, contribuindo de forma contínua e decisiva para o processo de intemperismo.

Os principais fatores que afetam os microrganismos do solo são: água, substratos e fontes de energia, fatores de crescimento, nutrientes minerais, composição e força iônica da solução do solo, pH, composição e pressão atmosférica, umidade, potencial redox, temperatura e radiação solar, profundidade e cobertura vegetal, interações entre organismos e impactos antropogênicos.

Solos superficiais podem diferir de solos de subsuperfície no que diz respeito ao fluxo de nutrientes. Ambientes subsuperficiais podem apresentar baixo teor de alguns nutrientes não facilmente carregados que podem ser essenciais a determinadas atividades, limitando, assim, a sobrevivência da microflora do solo. A limitação de nutrientes resulta geralmente em uma diminuição de 2 a 6 ordens de magnitude da biomassa em relação aos solos superficiais e de 4 até mais de 10 ordens de magnitude em relação a atividades enzimáticas (Kieft e Phelps, 1997)

Alguns trabalhos da última década apontam a importância do conhecimento do perfil de distribuição das populações microbianas dos solos de subsuperfície e a variação espacial das propriedades microbiológicas (Brockman, 1997; Parkin, 1993). Outros autores apontam a contribuição de um intemperismo biológico (Viles, 1995). Segundo Brockman (1997) devem existir correlações entre a distribuição das propriedades físicas e químicas e a distribuição das propriedades microbiológicas já que os microrganismos dependem de diversos elementos químicos para sua sobrevivência. Não foram encontrados, no entanto, na literatura, informações sobre possíveis correlações entre a presença de microrganismos no solo e o grau de intemperismo do mesmo. Deste modo, pretende-se com esta dissertação dar o primeiro passo em busca da possibilidade de existência destas correlações.

#### 4.4.1.

##### **Contagem de microrganismos viáveis e cultiváveis**

A contagem do número de microrganismos viáveis e cultiváveis (bactérias e fungos) foi feita através da técnica de derramamento em profundidade ou “*Pour Plate*”, ilustrada na Figura 4.5 (Brock *et al.*, 1994). Uma amostra de solo (1g) foi suspensa em água estéril e diluída sucessivamente (diluições de 10 vezes) até uma diluição de  $10^{-2}$  à  $10^{-4}$  dependendo do solo. Uma alíquota de 0,1 mL de cada diluição foi colocada em uma placa de Petri estéril e vazia, e sobre ela foram derramados e homogeneizados aproximadamente 20 mL de meio sólido *Tryptone Soya Agar* (TSA 10%) previamente fundido e mantido a uma temperatura de aproximadamente 56°C. O TSA, que em português quer dizer Agar Triptona Soja, é um meio de cultura utilizado para cultura de microrganismos de solo. Foram feitas triplicatas para cada diluição (Figura 4.5 e 4.6).

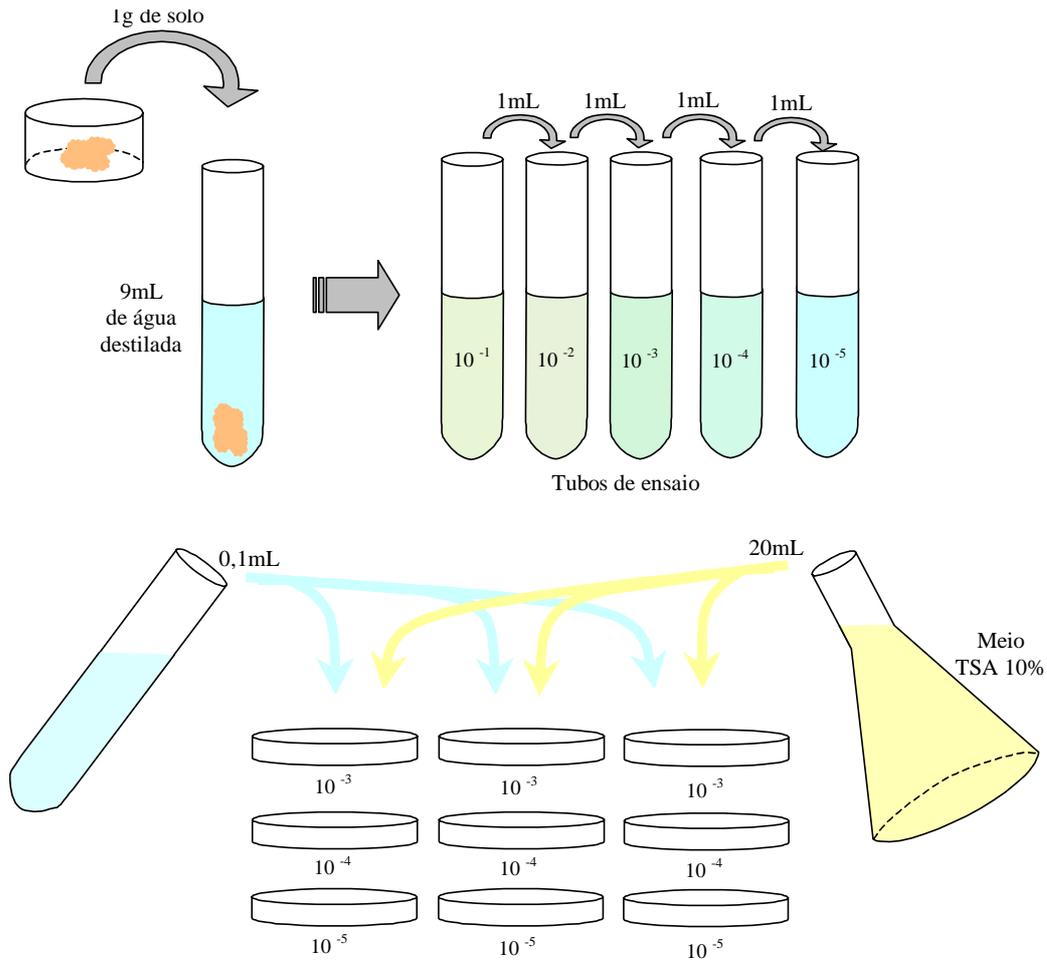


Figura 4.5 – Esquema geral da técnica de *Pour Plate* (Magdaleno, 2005)



Figura 4.6 – Técnica de derramamento em profundidade ou *Pour Plate*

Após uma semana de incubação a temperatura ambiente, as colônias de microrganismos foram contadas com auxílio de uma lupa acoplada a um transluminador e aproveitadas para o resultado somente as placas que continham entre 30 e 300 colônias. Como cada colônia deve ser oriunda da multiplicação de uma única célula, o número de colônias corresponde ao número original de microrganismos plaqueados no meio. Estes microrganismos são então denominados Unidades Formadoras de Colônias.

#### 4.4.2.

#### **Atividade microbiana degradadora total**

A atividade microbiana total do solo foi determinada através da hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA) como proposto por Adam e Duncan (2001), com pequenas adaptações do método, em relação às quantidades de solo usadas e ao tempo de incubação.

Esse substrato é usado para avaliar a atividade de enzimas relacionadas à degradação de ligações di-éster, bastante comuns em lipídios. Portanto essas enzimas estão relacionadas à capacidade de degradação de matéria orgânica, preferencialmente lipídica e com a capacidade metabólica de microrganismos heterotróficos. Essa atividade foi escolhida como modelo somente para fins comparativos entre os diferentes horizontes do solo estudado e também entre outros solos de subsuperfície estudados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. O diacetato de fluoresceína possui 2 ligações éster e assim também é reconhecido pelas enzimas esterases como substrato. Quando hidrolisado por enzimas livres (exoenzimas) e de membrana, liberam a fluoresceína (colorido) como produto final que absorve fortemente um comprimento de onda visível (490nm) que pode ser medido através de espectrofotometria.

Foram pesados 2 a 5 g de solo úmido peneirado em erlenmeyers com capacidade de 50 mL. Foram acrescentados 15mL de solução tampão fosfato 60 mM e, exceto nos “brancos” das amostras, 200 µL de Solução Estoque de diacetato de fluoresceína (FDA) 1000 µg.mL<sup>-1</sup>. O conjunto foi incubado em agitação orbital a 100 RPM, por 60 minutos a 30°C. Após a incubação foram acrescentados 15 mL de solução Clorofórmio/Metanol (2:1) a fim de interromper a reação, e, a seguir, as amostras foram centrifugadas a 2000 RPM por 3 minutos. O sobrenadante então foi filtrado em papel Whatmann nº2 e sua absorbância foi medida em espectrofotômetro a 490 nm. Para o cálculo da concentração de fluoresceína em

cada uma das amostras, foi feita uma curva padrão, através da diluição de uma solução estoque de fluoresceína  $2000 \mu\text{g mL}^{-1}$  em solução tampão fosfato 60 nM.

#### 4.5. Ensaio de desagregabilidade

O ensaio de desagregabilidade não é ainda um ensaio normalizado. Por essa razão, optou-se neste trabalho por utilizar a mesma metodologia utilizada por Ramidan (2003). Ela objetiva a observação do comportamento de amostras de solos sob a influência d'água. Para tal, foram utilizadas 5 amostras indeformadas de solo, encamisadas com tubo de PVC, retiradas em cinco diferentes níveis do talude estudado. As amostras utilizadas estão identificadas na Tabela 4.1. A partir destas amostras, foram moldados corpos-de-prova cúbicos com 5 cm de lado (Figura 4.7).

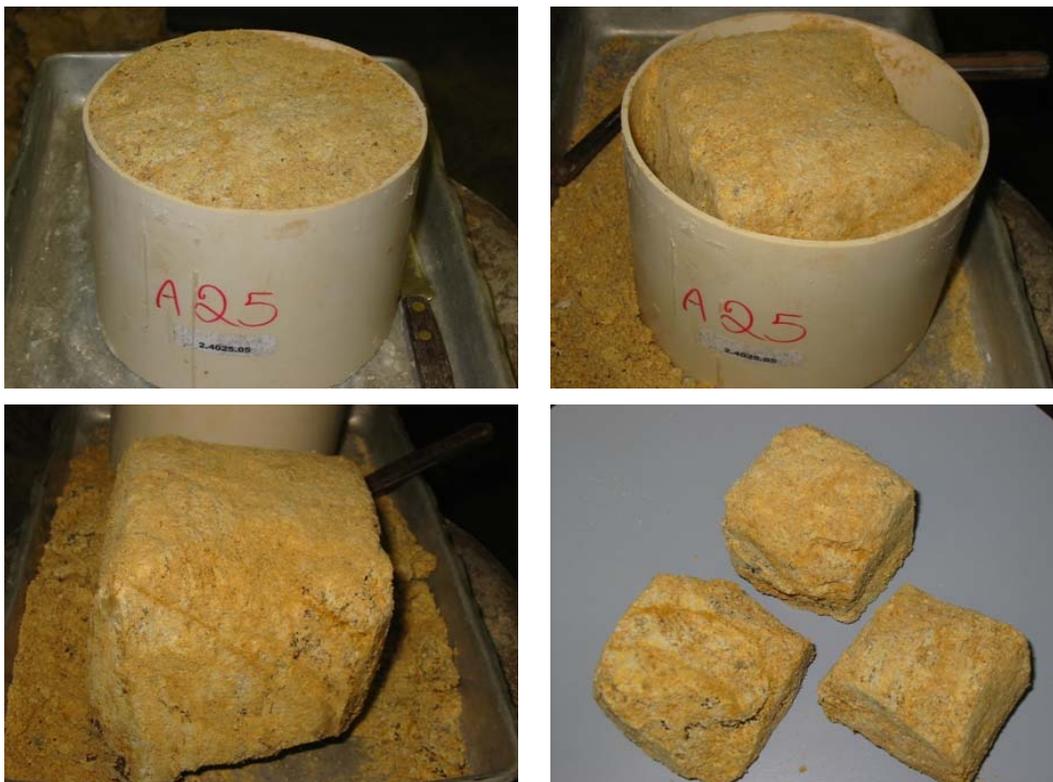


Figura 4.7 – Moldagem dos corpos-de-prova a partir das amostras indeformadas retiradas do talude com auxílio do tubo de PVC

Para a realização do ensaio de desagregabilidade, os corpos-de-prova, com 5 cm de lado, foram colocados dentro de duas bandejas metálicas e sobre pedras porosas saturadas cobertas com papel filtro. Em seguida, observaram-se suas reações ao processo de submersão.

Seguindo a metodologia adotada por Ramidan (2003), os corpos-de-prova foram colocados na primeira bandeja sobre as pedras porosas. Após esta etapa de preparação o nível d'água foi mantido na altura da base das amostras por um período de 30 minutos. Passados os 30 minutos, a altura da água foi aumentada até atingir 1/3 da altura total da amostra. A seguir, os corpos foram mantidos com este nível d'água por mais 15 minutos e, na seqüência, o nível d'água foi elevado até 2/3 da altura total do corpo-de-prova. Os corpos-de-prova foram mantidos com o nível d'água a 2/3 da altura total do corpo por mais 15 minutos e em seguida o nível foi elevado a 3/3 da altura total do corpo ficando assim todos eles inteiramente submersos. Prosseguiu-se com o ensaio até que as amostras completassem um ciclo de 24 horas inteiramente submersas.

Na segunda bandeja, após colocados os corpos-de-prova sobre as pedras porosas, estes foram submetidos a imersão total desde o início do ensaio e mantiveram esta condição por 24 horas. Foram registrados os períodos de 15 minutos da primeira hora e o resultado final após as 24 horas.

#### **4.6. Ensaio de cisalhamento direto**

Com o intuito de obter parâmetros de resistência dos solos estudados, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo das cinco diferentes camadas. As amostras utilizadas e informações dos ensaios de cisalhamento direto podem ser encontradas na Tabela 4.2.. Os ensaios foram realizados no LAME/LACTEC. Foi obtida para cada solo uma envoltória de resistência formada por quatro pontos.

Todas as amostras utilizadas eram indeformadas. Todos os corpos-de-prova foram moldados nas dimensões 100 x 100 mm.

A velocidade média de deslocamento adotada foi de 0,06 mm/min. Esta velocidade foi definida a partir de ensaios realizados como testes. Taxas de deslocamento menores foram evitadas, no intuito de tornar mais operacional a execução do programa de ensaios. A velocidade de 0,06 mm/min atende o critério de Gibson e Henkel (1954), freqüentemente citado na literatura.

Tabela 4.2 – Resumo do programa de ensaios de cisalhamento direto

Registro da amostra	Solo	Profundidade (m)	Tensão normal aplicada no adensamento (kPa)
2.4495.05	Marrom	2,0	25/50
2.4240.05	Marrom	2,2	25/100/200
2.4400.05	Vermelho	3,5	25
2.4241.05	Vermelho	3,2	25
2.4234.05	Vermelho	2,25	50
2.4233.05	Vermelho	2,25	100/200
2.4005.05	Laranja	6,75	25/50
2.4018.05	Laranja	6,95	25/100/200
2.4095.05	Amarelo	7,15	25
2.4211.05	Amarelo	7,5	50
2.4342.05	Amarelo	6,4	50
2.4343.05	Amarelo	6,9	100/200
2.4038.05	Branco	6,95	25/50
2.4037.05	Branco	8,9	100
2.4088.05	Branco	10,8	200

Os corpos-de-prova indeformados foram cuidadosamente moldados a partir dos blocos encamisados. Para isto foram utilizados anéis metálicos quadrados, que possuíam 100 mm de lado e 25,4 mm de altura. Buscando-se evitar alterações no estado do material devido à perda de umidade, o trabalho foi sempre executado no interior de câmara úmida. A operação de moldagem não se mostrou uma tarefa fácil. O destacamento de fragmentos por fraturas do solo, em especial o branco, freqüentemente causava a perda dos corpos-de-prova. A presença esporádica de concreções de manganês, em especial nos solos alaranjados, foi problemática, pois as mesmas por vezes se constituíam um obstáculo à inserção do anel metálico de moldagem. Por outro lado, a incorporação de concreções no corpo-de-prova poderia provocar efeitos indesejáveis no comportamento do material ensaiado.

Ao final do trabalho, o corpo-de-prova foi “rasado” no topo e na base, utilizando-se as sobras de material para determinar sua umidade. As sobras de material de cada amostra foram embaladas em sacos plásticos e permaneceram na câmara úmida para eventuais ensaios futuros.

A prensa de cisalhamento direto empregada nos ensaios é a prensa Shear Trac II, fabricada pela Geocomp (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Prensa Shear Trac II utilizada nos ensaios – LAME/LACTEC – Laboratório de Materiais e Estruturas, Centro Politécnico da UFPR

A prensa Shear Trac II é um equipamento de ensaio totalmente automatizado. Ele executa as fases de adensamento e cisalhamento de modo inteiramente automático. A máquina faz o que foi projetado sem a necessidade de monitoração constante o que permite que se trabalhe em outras atividades enquanto um ensaio fica funcionando direto. É também possível deixar os ensaios funcionando durante a noite, fora do horário comercial. O software permite uma fácil recuperação e avaliação de dados.

A prensa possui um motor elétrico que desloca a base da célula de cisalhamento, de modo que sua metade superior reage contra uma célula de carga medindo-se a força tangencial. O deslocamento horizontal é medido por um extensômetro, na base da célula. Os deslocamentos verticais são monitorados também com um extensômetro, posicionado no topo do sistema de carregamento vertical.

Nas caixas de cisalhamento (Figura 4.9) foram usadas placas metálicas ranhuradas e pedras porosas, tanto no topo como na base das amostras.



Figura 4.9 – Detalhe da caixa de cisalhamento da Prensa Shear Trac II

Uma vez moldados, os corpos-de-prova eram transferidos para a caixa de cisalhamento. Em seguida, adensava-se o solo em dois estágios com duração de 24 h. No primeiro estágio aplicava-se, por 5 minutos, uma tensão de 2kPa, e no segundo estágio a tensão total normal desejada (25, 50, 100 ou 200 kPa)

Em todos os ensaios, procedeu-se à inundação do solo imediatamente após a aplicação do primeiro estágio de carregamento. Durante a fase de adensamento, o software que acompanha a prensa mediu os recalques dos corpos-de-prova.

A Tabela 4.3 traz dados dos 24 corpos-de-prova empregados nos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 4.3 – Dados dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto

Registro da Amostra	Solo	Tensão normal aplicada (kPa)	Umidade inicial ( $w_0$ %)	Umidade final ( $w_f$ %)	Peso específico ( $\gamma_n$ kN/m <sup>3</sup> )	Peso específico seco ( $\gamma_d$ kN/m <sup>3</sup> )
2.4495.05	Marrom	25	25,43	42,10	18,54	14,78
2.4495.05	Marrom	50	21,03	44,21	18,36	15,17
2.4240.05	Marrom	25	22,65	35,03	18,79	15,32
2.4240.05	Marrom	100	22,65	31,86	19,69	16,06
2.4240.05	Marrom	200	22,65	30,80	18,50	15,09
2.4400.05	Vermelho	25	25,62	51,98	15,86	12,62
2.4241.05	Vermelho	25	29,71	54,66	14,83	11,43
2.4234.05	Vermelho	50	27,39	53,51	14,98	11,76
2.4233.05	Vermelho	100	28,41	48,22	23,64	18,41
2.4233.05	Vermelho	200	28,41	47,25	15,01	11,69
2.4005.05	Laranja	25	31,64	46,47	14,26	10,83
2.4005.05	Laranja	50	31,64	43,54	17,49	13,28
2.4018.05	Laranja	25	28,44	54,70	15,86	12,34
2.4018.05	Laranja	100	36,01	47,80	16,16	11,88
2.4018.05	Laranja	200	36,01	45,15	17,23	12,67
2.4095.05	Amarelo	25	26,90	40,19	16,83	13,26
2.4211.05	Amarelo	50	29,09	40,54	18,06	13,99
2.4342.05	Amarelo	50	15,03	37,12	18,30	15,91
2.4343.05	Amarelo	100	24,59	41,08	17,27	13,86
2.4343.05	Amarelo	200	24,59	36,66	17,32	13,90
2.4038.05	Branco	25	14,53	26,21	20,33	17,75
2.4038.05	Branco	50	14,28	25,41	18,68	16,34
2.4037.05	Branco	100	10,02	25,99	21,69	19,71
2.4088.05	Branco	200	18,47	33,45	20,64	17,43