

## 5

### Características do solo utilizado

#### 5.1.

##### Material Escolhido e Retirada dos Blocos

O material escolhido para a realização dos ensaios foi um solo maduro, coluvionar, argilo-arenoso, não saturado localizado na encosta da PUC-Rio. A escolha desse material se deu em função das seguintes razões:

- O solo é bastante homogêneo (textura, estrutura, cor, etc).
- O local de onde foi retirado é de fácil acesso.
- Existe uma grande quantidade de informações disponíveis na PUC-Rio sobre o mesmo.

Blocos indeformados do material foram retirados para a realização dos ensaios de cisalhamento direto convencional, cisalhamento direto com sucção controlada, compressão diametral e papel filtro. Um resumo do número de blocos, a época em que foram extraídos, a profundidade e tamanho dos blocos, bem como a condição do tempo, é apresentado na tabela 8.

**Tabela 8:** Resumo dos blocos extraídos.

<b>Bloco</b>	<b>Data da extração</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Profundidade</b>	<b>Tempo</b>
1	23/06/04	15x15x20	1,0m	ensolarado
2	23/06/04	25x25x25	1,0m	ensolarado
3	06/08/04	30x30x30	1,5m	ensolarado
4	09/08/04	30x30x30	1,5m	nublado

## 5.2.

### Descrição do Meio Físico

#### 5.2.1.

#### Localização

As amostras de solo foram coletadas do Campo Experimental II localizado no interior do campus da PUC-Rio, conforme mostrado na figura 30. Um grande número de informações sobre os materiais desta área está disponível nos trabalhos de Sertã (1986), Lins (1991), Daylac (1994), Moreira (1998) e Beneveli (2002).

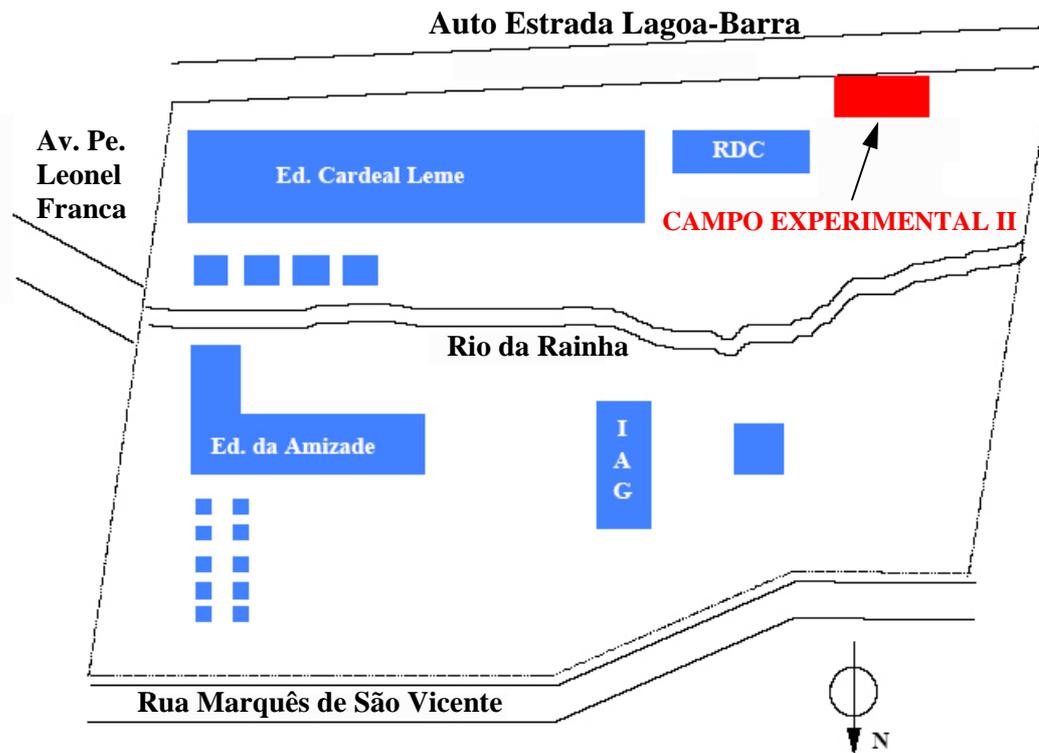


Figura 30: Localização do Campo Experimental II da PUC-Rio.

### 5.2.2.

#### Clima

De acordo com Brito (1981), o município do Rio de Janeiro está sujeito a cinco diferentes tipos de clima. A região em estudo foi definida como pertencente a uma Zona Megatérmica, com clima tropical quente e chuvoso, tendo no mês mais seco, uma precipitação superior a 60mm, e o mês mais frio, uma temperatura maior que 18°C. A pluviosidade média da região gira em torno de 1.800 a 2.000mm anuais.

A análise climática dessa região indica condições para a ocorrência de solos profundos, bem desenvolvidos, com tendência acentuada para acidez e com um processo de intemperismo bem caracterizado (Brito, 1981).

### 5.2.3.

#### Geologia e Geomorfologia

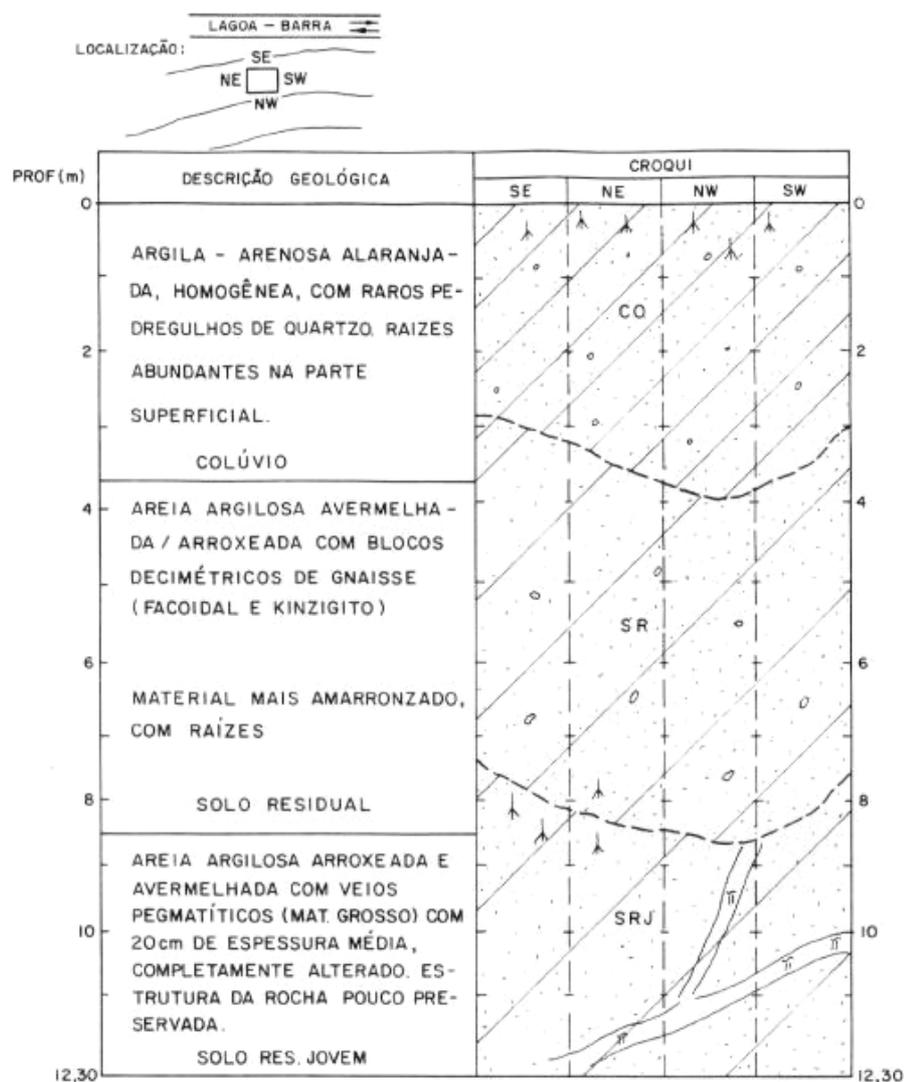
O município do Rio de Janeiro é essencialmente constituído por rochas gnáissicas e graníticas, de idade pré-cambriana, pertencentes a Serra do Mar.

O Campo Experimental II da PUC-Rio está inserido no maciço da Tijuca, sendo este caracterizado por biotita-plagioclásio-gnaiss, microclina-gnaiss, leptinito/granito e granodiorito, segundo Brito (1981). A encosta da PUC-Rio apresenta uma feição abrupta e de declividade elevada. Esta é uma característica típica da paisagem do município do Rio de Janeiro, que é constituída por morros que se elevam bruscamente quase sem transição da planície.

No Campo Experimental II da PUC-Rio não existem afloramentos rochosos. No entanto, Sertã (1986) relata que o embasamento local é constituído por um gnaiss cataclástico (rocha metamórfica de alto grau de metamorfismo) do tipo granada-biotita-plagioclásio-gnaiss. Tal tipo de gnaiss é constituído principalmente por quartzo, feldspato e biotita, tendo como minerais acessórios a muscovita e a granada (Sertã, 1986).

O solo estudado pode ser classificado, pedologicamente, como um latossolo (Benevelli, 2002). Segundo Moreira (1998), este é um solo coluvionar maduro, argilo-arenoso, de origem possivelmente associada a processos erosivos ocorridos em tempos pretéritos. Este possui características de tonalidade vermelha amarelada, textura micro-granular e com aspecto homogêneo, sendo constituído basicamente por quartzo, granada alterada, argilo-minerais (essencialmente caulinita) e óxidos de ferro e alumínio, como produtos do intemperismo dos minerais primários da biotita gnaíse.

É apresentada, na figura 31, uma descrição morfológica representativa do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio, obtida por Daylac (1994) a partir da inspeção de um poço aberto com aproximadamente 13,5m de profundidade.



**Figura 31:** Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio (Daylac, 1994).

### 5.3.

#### Caracterização Física

##### 5.3.1.

#### Densidade Relativa dos Grãos ( $G_s$ )

A densidade relativa dos grãos foi determinada utilizando o material que passou na peneira #40, cuja abertura de malha é de 0,425mm (classificação USBS), seguindo a norma NBR6508 da ABNT.

Utilizou-se cerca de 100g desse material, seco em estufa a 105°C, onde foi colocado 25g em quatro picnômetros de 250mL. Posteriormente procedeu-se a extração do ar contido entre as partículas utilizando uma bomba de vácuo. Esse procedimento é feito até que não haja mais extração de bolhas, o que ocorre em aproximadamente 15 minutos.

O valor de  $G_s$  foi obtido através da média aritmética das quatro determinações, tendo uma variação máxima dos valores de 1,2% . O valor médio de  $G_s$  encontrado foi de 2,736.

##### 5.3.2.

#### Análise Granulométrica Conjunta

Para a determinação da granulometria do solo, peneirou-se cerca de 1,5 Kg do material na peneira #40 (0,425mm), seguindo a norma NBR7181 da ABNT.

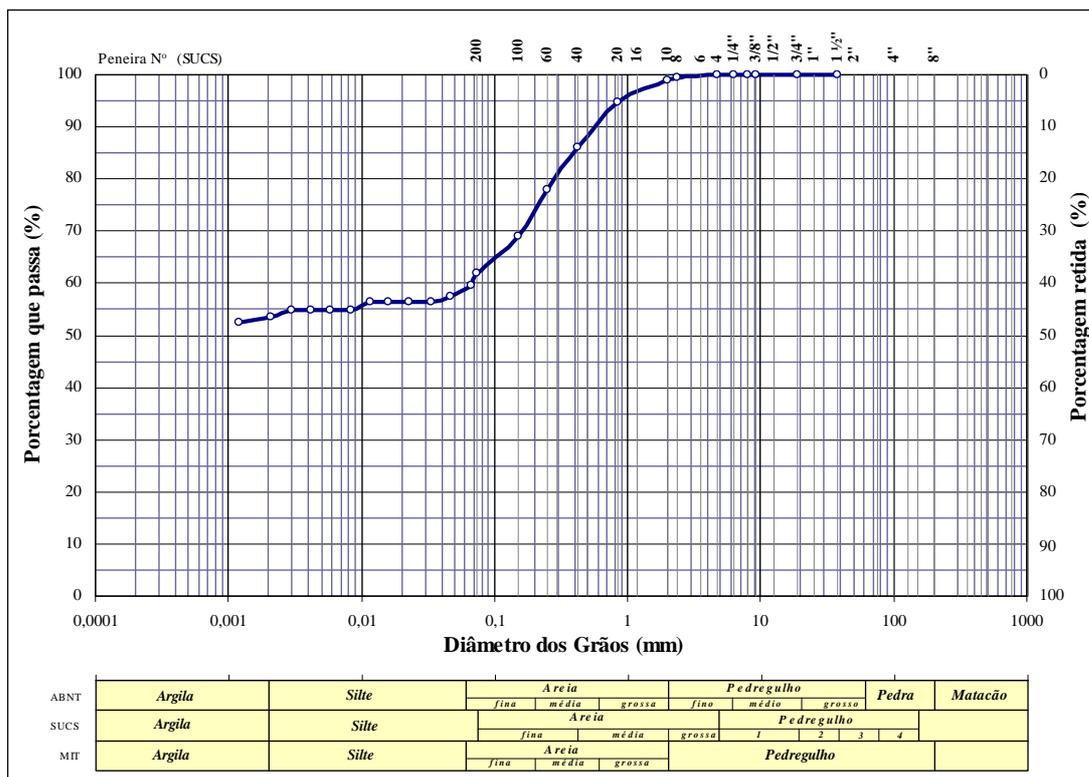
O material que não passou na peneira foi lavado, para a retirada dos grãos menores que 0,425mm, e posteriormente levado à estufa a 105°C para se fazer o peneiramento grosso.

A sedimentação foi feita com 50g do material que passou na peneira #40, sendo este misturado a 125mL de uma solução de hexametáfosfato de sódio. O material permaneceu imerso na solução por 24 horas.

Depois de realizada a sedimentação, o material restante foi lavado na peneira #200 e levado à estufa para a realização do peneiramento fino. A tabela 9 e a figura 32 apresentam o resumo da granulometria (classificação ABNT) e a curva granulométrica do solo, respectivamente.

**Tabela 9:** Resumo da granulometria.

<b>pedregulho</b> (%)	<b>areia grossa</b> (%)	<b>areia média</b> (%)	<b>areia fina</b> (%)	<b>silte</b> (%)	<b>argila</b> (%)
0,9	9,2	16,3	14,6	5,5	53,5



**Figura 32:** Curva granulométrica do solo.

### 5.3.3.

#### Limites de Consistência

Os limites de consistência, limite de liquidez e limite de plasticidade, foram determinados utilizando-se o material passante na peneira #40, seguindo a norma NBR6459 da ABNT. Já o limite de contração foi determinado seguindo a metodologia apresentada na norma NBR7183 da ABNT.

A atividade das argilas foi determinada através do uso da expressão de Skempton:

$$Atividade = \frac{IP}{\% < 2\mu m} \quad (15)$$

Os valores do limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade, limite de contração e atividade das argilas são apresentados na tabela 10. O valor encontrado da atividade das argilas, segundo a equação de Skempton, indica uma baixa atividade do solo.

**Tabela 10:** Limites de consistência e atividade das argilas.

LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)	Atividade das argilas
54,0	27,8	26,2	24,8	0,49

### 5.3.4.

#### Classificação do Solo

Através da caracterização física do solo, podemos classificá-lo, no sistema unificado de classificação de solo (SUCS), com sendo uma argila de alta plasticidade, ou seja, um CH.

## 5.4.

### Análise Química

As análises químicas de capacidade de troca catiônica (CTC) e de ataque sulfúrico do solo, foram retirados do trabalho de Duarte (2004). Essas análises estão apresentadas na tabela 11.

A análise química total em porcentagem peso (tabela 12) foi retirada de um estudo químico e mineralógico detalhado do campo experimental II da PUC-Rio, realizado por Sertã (1986).

**Tabela 11:** Análises químicas de capacidade de troca catiônica (CTC) e de ataque sulfúrico (Duarte, 2004).

Complexo Sortivo (meq/100g)							
Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	CTC	
0,00	0,4	0,11	0,15	1,3	3,3	5,3	
Ataque por H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1:1) - NaOH (0,8%) g/Kg						pH (1:2,5)	
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Ki	Kr	Água	KCL
179	204	103	11,1	1,49	1,13	4,3	4,0

**Tabela 12:** Análise química total em porcentagem em peso (Sertã, 1986).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
55,4%	22,0%	< 0,05%	< 0,10%	11,0%	1,30%	0,11%	0,01%

Analisando os resultados encontrados nas tabelas 11 e 12, pode-se concluir que a grande quantidade de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> encontrada no solo, indica que este sofreu um processo de laterização. Por outro lado, a pequena quantidade de CaO, MgO, K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O encontradas, sugere tratar-se de um material altamente intemperizado, devido à lixiviação intensa dos álcalis. A presença de cátions

trocáveis deste solo, sugere que este é um material de baixa atividade. Os valores de pH indicam que o solo é ácido.

## 5.5.

### Análise Mineralógica

A tabela 13 mostra o resultado da análise mineralógica feita por Sertã (1986) no material em estudo. Para a identificação da microestrutura do material, foram realizadas análises de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, sendo descritas a seguir.

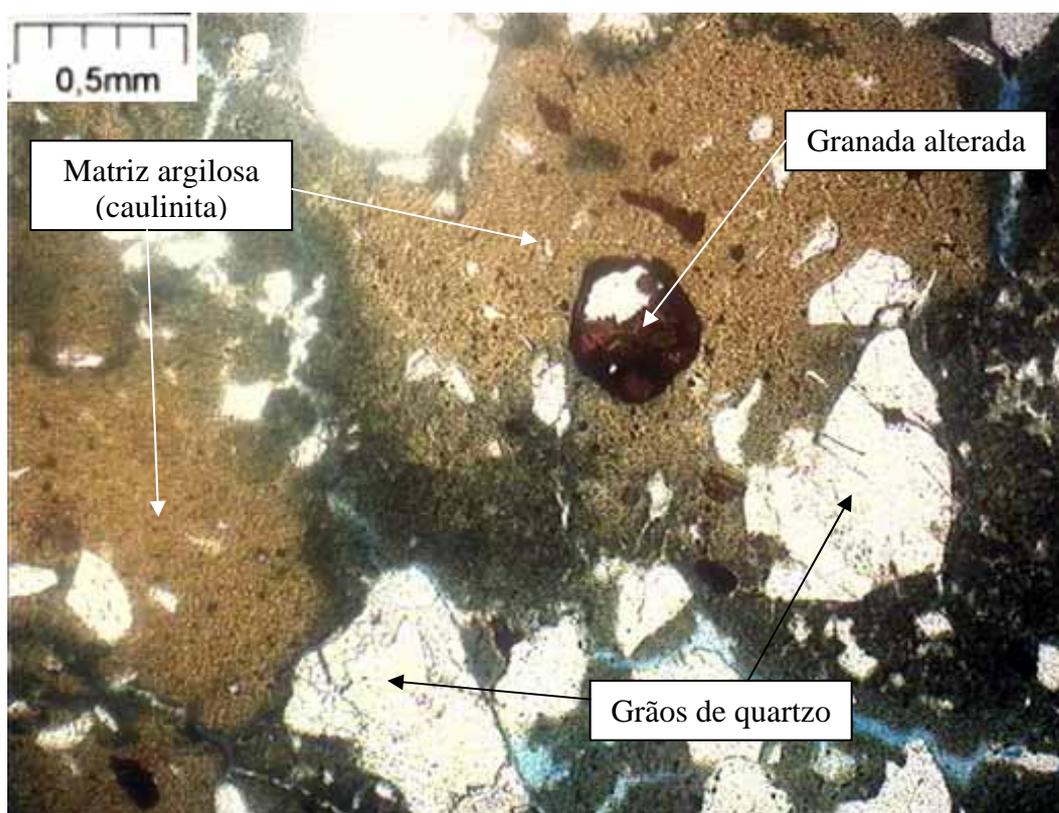
**Tabela 13:** Análise mineralógica (Sertã, 1986).

<b>Fração do solo</b>	<b>Mineral</b>	<b>Quantidade / observações</b>
Pedregulho	Quartzo	grãos arestados de coloração transparentes a leitosos
	Granada alterada	alguns fragmentos
Areia	Quartzo	grãos arestados
	Granada muito alterada	correspondem a aproximadamente 5% da amostra total
	Agregados Ferruginosos	
	Magnetita	pequenos traços
Silte	Quartzo	presença
	Caulinita	presença
	Goetita	presença
Argila	Caulinita	presença marcante
	Goetita	alguns traços

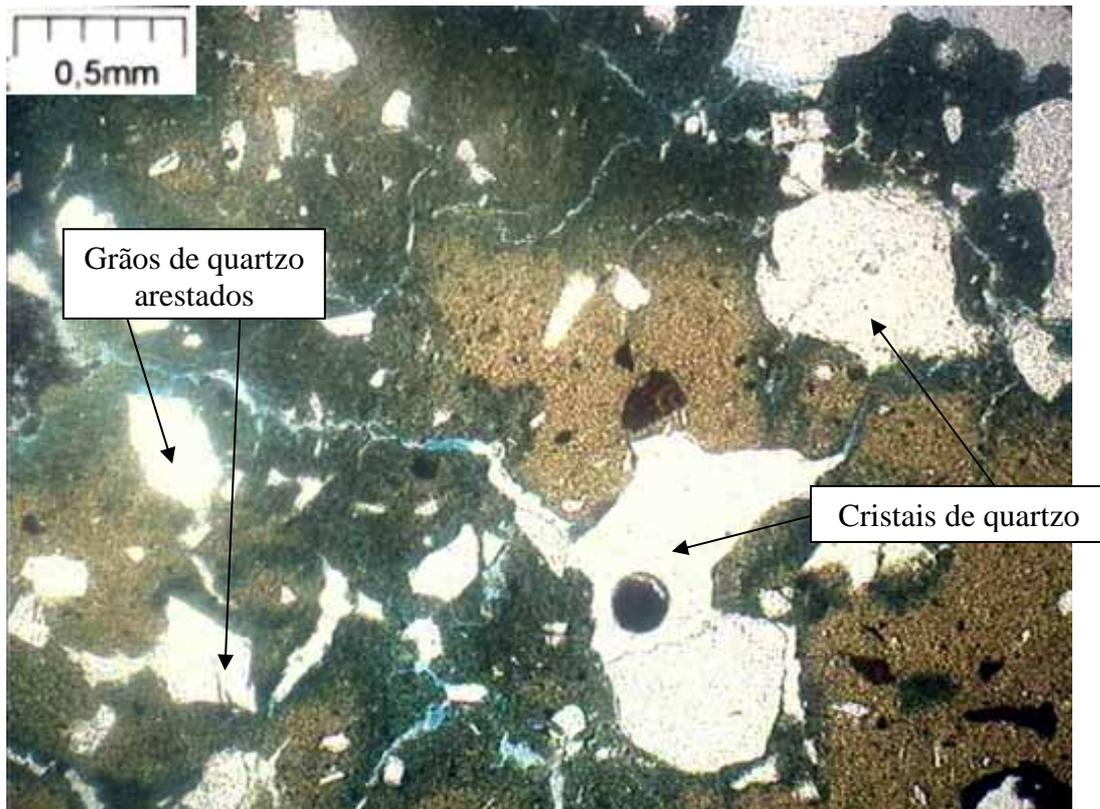
### 5.5.1.

#### Microscopia Ótica

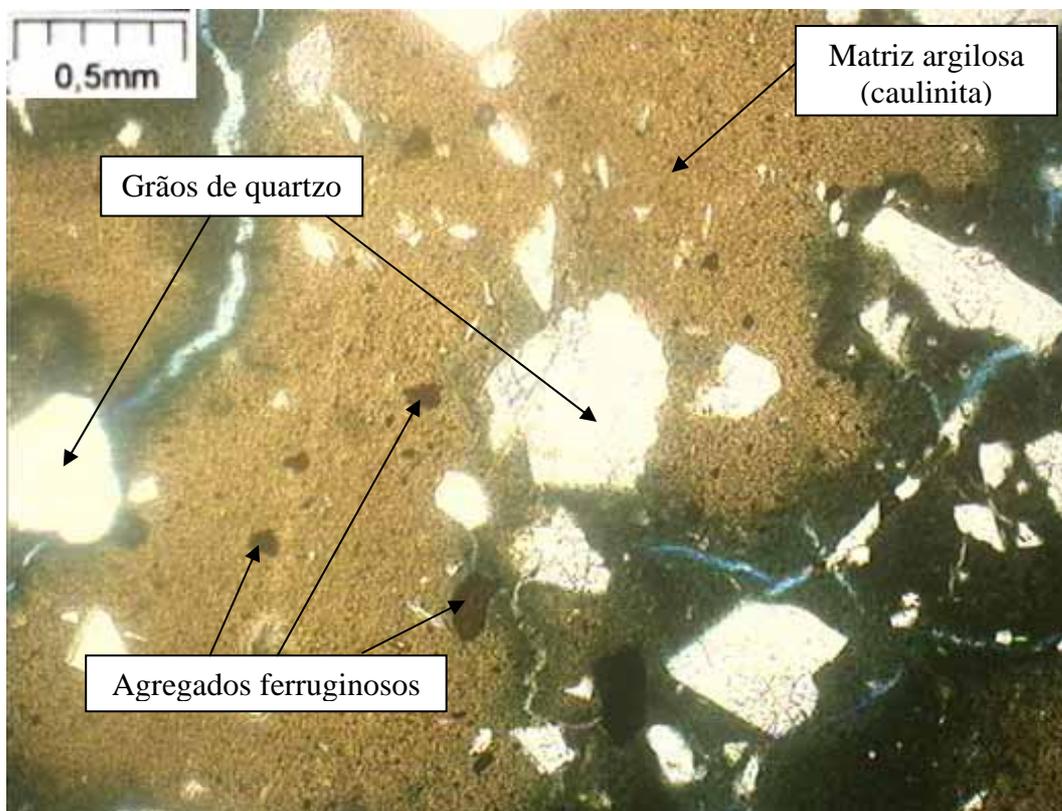
Foram preparadas duas lâminas delgadas de solo pelo instituto de Geociências da UFRJ, a partir do material indeformado. Na análise das lâminas foi constatada a presença de uma matriz de argilominerais (constituída basicamente de caulinita) com grãos de quartzo arestados, englobando alguns agregados ferruginosos, granadas em elevado grau de alteração e cristais grandes de quartzo. Essa matriz argilosa funciona como uma espécie de uma cimentação fraca, unindo os macro-agregados do solo. Nas figuras 33 a 35 são mostrados fotos das lâminas obtidas através do microscópio ótico.



**Figura 33:** Presença da matriz argilosa com grãos de quartzo e granada muito alterada.



**Figura 34:** Grãos de quartzo arestados e cristais grandes de quartzo.



**Figura 35:** Grande área da matriz argilosa englobando alguns grãos de quartzo e agregados ferruginosos.

### 5.5.2.

#### Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas em um microscópio eletrônico, da marca ZEISS modelo DSM 960, pertencente ao Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio (DCMM). A figura 36 mostra uma fotografia do equipamento.

Para as análises, foram utilizadas duas lâminas delgadas de solo, preparadas a partir do material indeformado. Estas foram fixadas sobre um porta-amostra metálico de alumínio, e depois recobertas com uma fina camada de ouro paládio (cerca de 130 a 150 angstroms de espessura). Para tal, utilizou-se uma unidade metalizadora, da marca EDWARDS modelo S-150, através do método de pulverização catódica (sputtering).



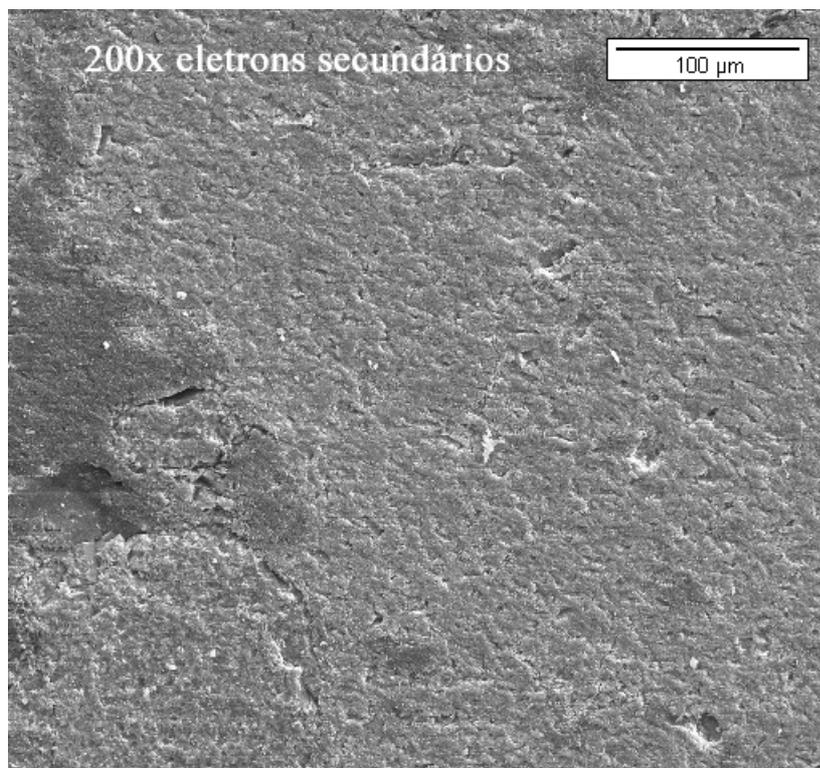
**Figura 36:** Fotografia do microscópio eletrônico de varredura da PUC-Rio.

O objetivo das análises de microscopia eletrônica de varredura foi definir as características morfológicas dos argilominerais e, principalmente, aspectos da distribuição dos poros.

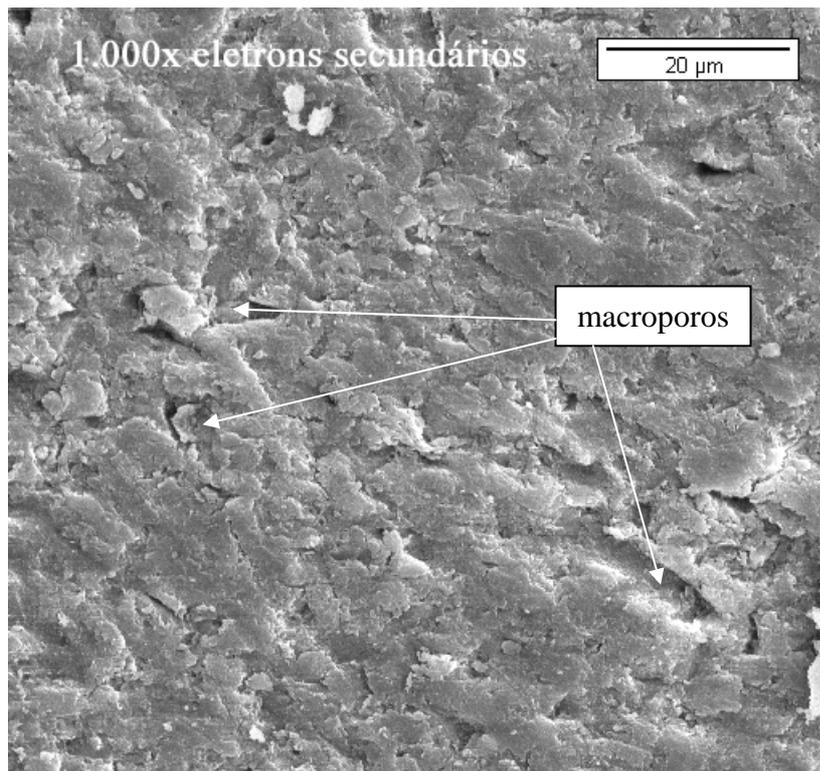
As análises das fotografias mostram a formação de micro-agregados, constituído basicamente por caulinita. Esses micro-agregados se ligam a outros, seja por cimentação, seja por pontes de argila, dando origem a uma distribuição bimodal de poros (De Carvalho et al., 2002). Em geral, os microporos

caracterizam a estrutura interior dos micro-agregados e os macroporos constituem os vazios entre os micro-agregados (De Carvalho & Leroueil, 2004).

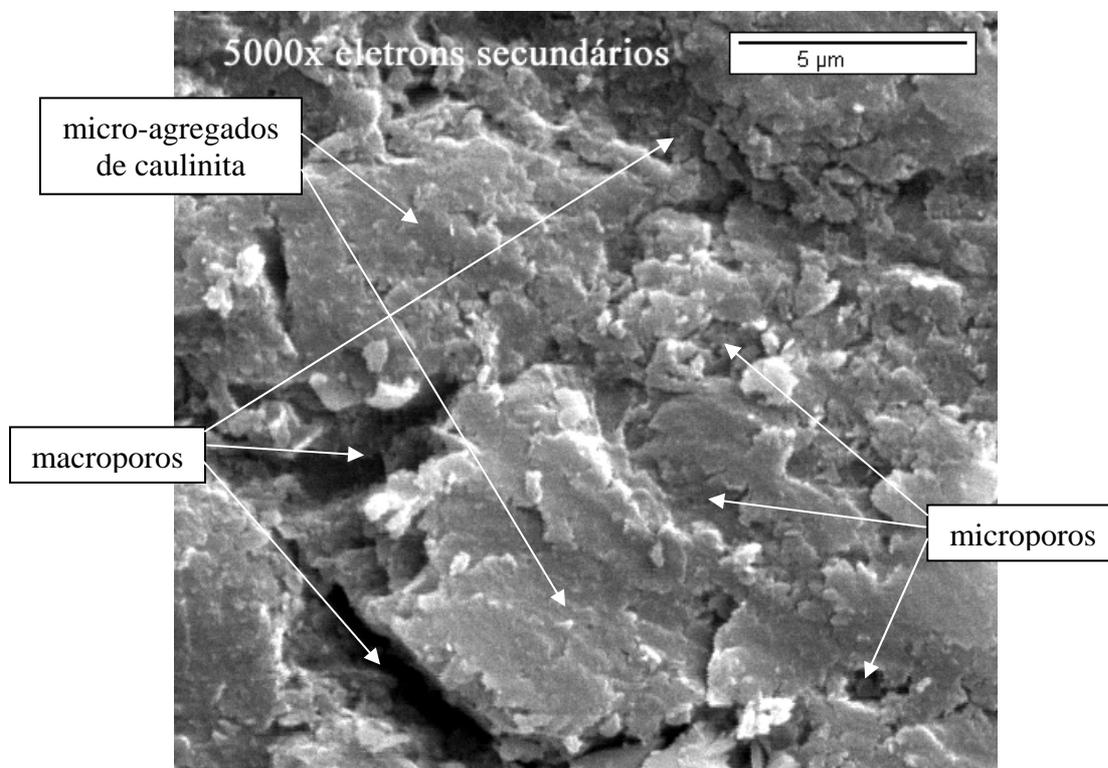
A amostra analisada está interpretada, através de imagens obtidas por emissão de elétrons secundários, desde pequenos aumentos enfocando características gerais, a aumentos mais detalhados, a fim de definir melhor as características morfológicas dos micro-agregados e os aspectos de porosidade. As figuras 37 a 40 apresentam as imagens obtidas para diferentes ampliações.



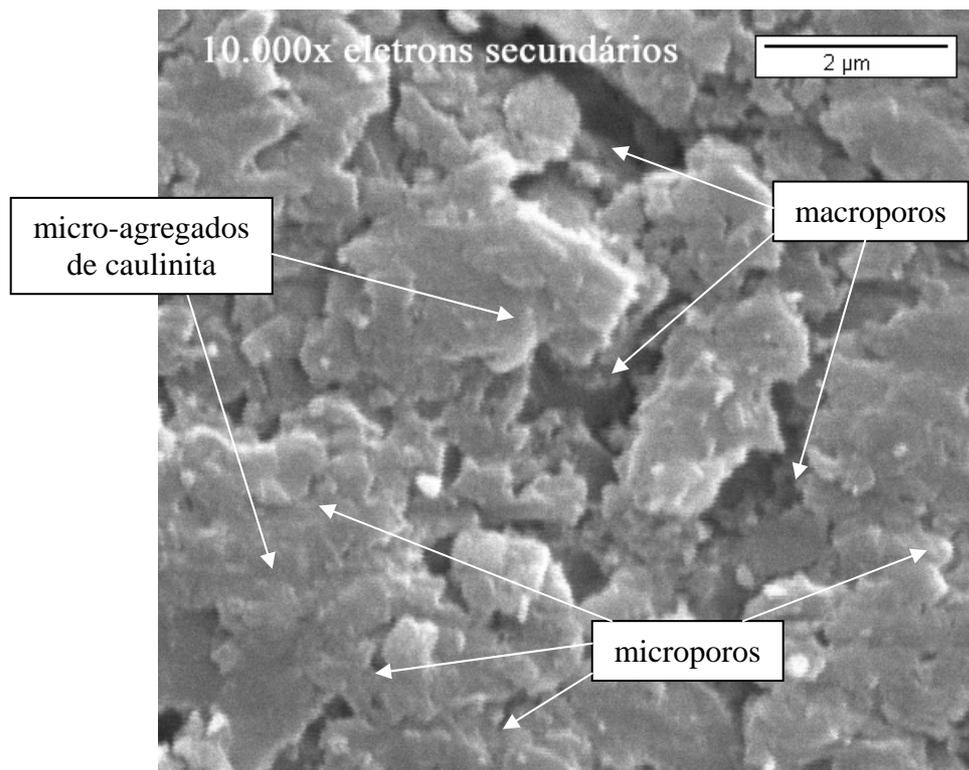
**Figura 37:** Aspecto geral da matriz argilosa (ampliação de 200 vezes).



**Figura 38:** Um detalhamento maior da matriz argilosa com os macroporos sendo visualizados (ampliação de 1000 vezes).



**Figura 39:** Detalhe dos micro-agregados de caulinita, formando entre eles os macroporos, e no seu interior os microporos (ampliação de 5000 vezes).



**Figura 40:** Micro e macro-porosidades caracterizando uma distribuição bimodal dos poros (ampliação de 10000 vezes).

## 5.6.

### Curva Característica de Sucção

A curva característica, ou curva de retenção de água, foi determinada através da técnica do papel filtro. O procedimento utilizado na determinação da sucção mátrica do solo para diferentes umidades, está descrito no capítulo 4.

A figura 41 mostra a forma mais comum de apresentação da curva característica, na qual a sucção é plotada em função da umidade volumétrica. Essa umidade volumétrica foi obtida a partir dos valores do teor de umidade em peso e do peso específico seco, considerando que o solo não apresenta variação de volume significativa com variações de sucção, através da seguinte relação:

$$\theta = w \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (16)$$

onde:

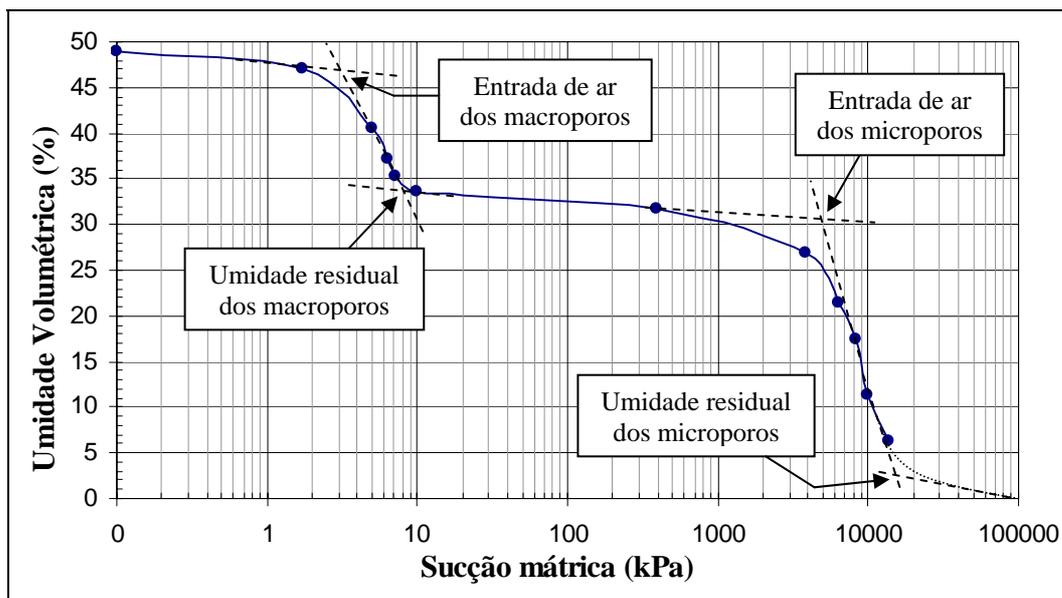
$\theta$  = umidade volumétrica (%);

$w$  = umidade gravimétrica (%);

$\gamma_d$  = peso específico seco do material;

$\gamma_w$  = peso específico da água.

A curva característica obtida apresenta dois pontos de inflexão. Essa é uma característica que segure a existência de uma distribuição bimodal dos poros, na qual foi comprovada através da análise de microscopia eletrônica. Essa distribuição bimodal dos poros é caracterizada pelos macroporos, formados pelos vazios entre os micro-agregados e pelos microporos, formados no interior das agregações.



**Figura 41:** Curva característica em função da umidade volumétrica.

A entrada de ar dos macroporos determinada é de, aproximadamente 3kPa, enquanto que a entrada de ar dos microporos é de 5000kPa aproximadamente. Nota-se que a partir do valor de entrada de ar dos macroporos até uma sucção de 10kPa, relacionada à umidade residual dos macroporos, ocorre uma elevada dessaturação do material. Já para valores de sucção variando entre 10 e 1000kPa,

essa dessaturação não é tão elevada. Esse comportamento é mais facilmente visualizado na figura 42.

As figuras 42 e 43 mostram outras formas de apresentação da curva característica, onde a sucção mátrica é plotada em função do grau de saturação ou da umidade gravimétrica.

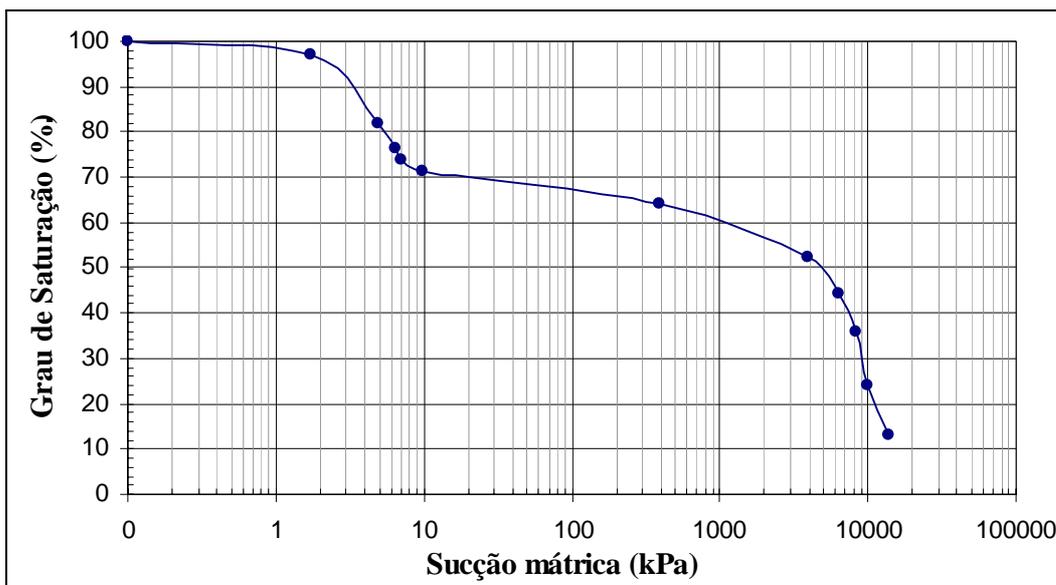


Figura 42: Curva característica em função do grau de saturação.

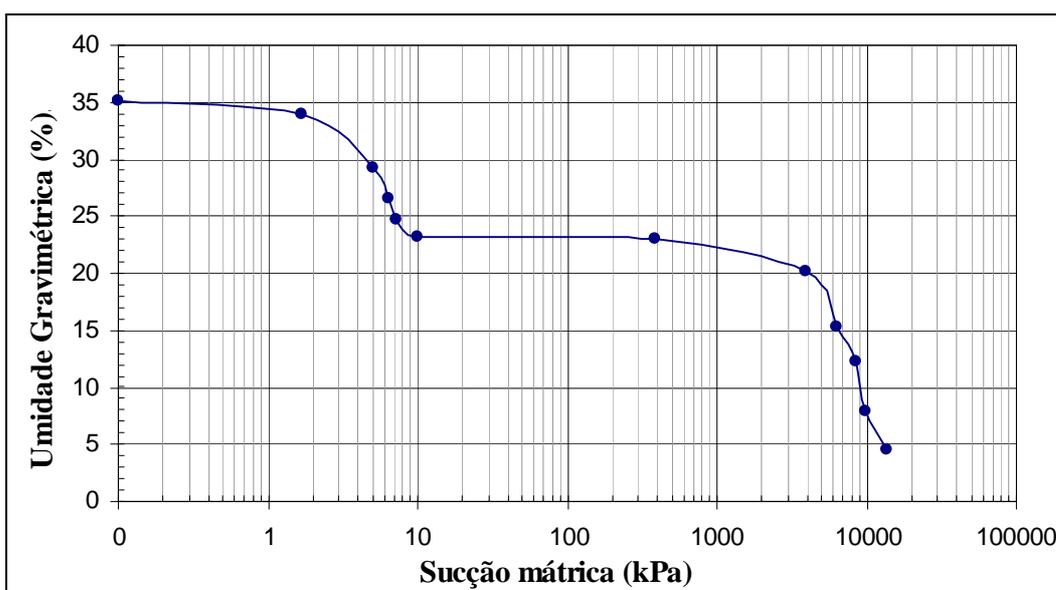


Figura 43: Curva característica em função da umidade gravimétrica