

## 5 Caracterização do Solo

### 5.1. Caracterização Geotécnica

#### 5.1.1. Índices Físicos

Este item contempla os índices físicos determinados através da utilização dos processos descritos nas normas referidas no Item 4.1.1. As suas determinações foram realizadas logo após a abertura do bloco na câmara úmida.

Na Tabela 5.1 seguem apresentados os valores dos índices físicos.

Tabela 5.1 – Índices Físicos.

$w_{nat}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$G_s$	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de Vazios, e	Porosidade, n (%)	Grau de Saturação, S (%)
10	2.69	2.86	1.52	0.88	46.85	35.42

#### 5.1.2. Análise Granulométrica

Seguem dispostos na Tabela 5.2 e na Figura 5.1 os resultados da análise granulométrica realizada no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Tabela 5.2 – Distribuição Granulométrica.

Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
0	52	34	14

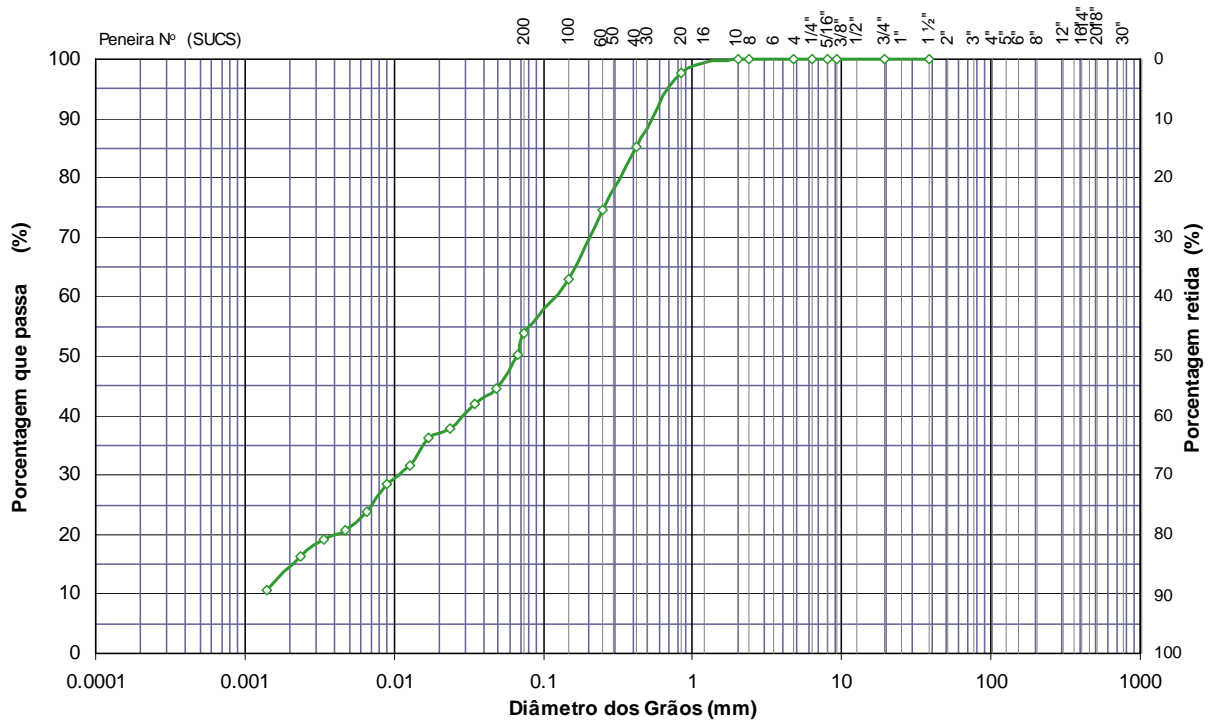


Figura 5.1 – Distribuição Granulométrica.

### 5.1.3. Limites de Atterberg

A determinação dos Limites de Atterberg foi realizada segundo as instruções gerais das normas NBR 6459 (LL) e NBR 7180 (LP) utilizando o material passante na peneira n°. 40.

A Tabela a seguir apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.4 – Limites de Atterberg.

LL	LP	IP	Índice de Atividade de Skempton (I <sub>a</sub> )
39.2	28	11.2	0.8

Segundo o Índice de Atividades de Skempton (eq. 4.1) trata-se de um solo que apresenta atividade normal. Entretanto segue a ressalva de que esta classificação não foi desenvolvida para solos residuais e sim argila de Londres. Com tudo este resultado aparenta representar bem as características do solo em estudo.

## 5.2. Característica Mineralógica

### 5.2.1. Microscopia Ótica

Através da observação da lâmina petrográfica foi possível a identificação dos principais minerais constituintes do solo. Pode-se notar como indicado nas Figuras 5.3 e 5.4 a presença de K Feldspato, Biotita alterada, Granada e, discretamente, o Quartzo.

O processo de intemperismo está bastante evidente no Feldspato Plagioclásio. Na região onde se apresenta este mineral é possível notar uma grande concentração de vazios dispersos. A formação destes vazios está relacionada à perda de álcalis do Feldspato.

Nos K Feldspatos é possível observar a presença de vazios intra-granulares e formação de microporos em seu interior. Também é possível notar a presença de óxido de ferro realizando a cimentação dos grãos.

Como consequência do intemperismo da Biotita e da Granada surge o óxido de ferro, o qual é o elemento principal responsável pelo processo de cimentação deste solo. O óxido de ferro age preenchendo os vazios e ligando os minerais ao seu redor.

Em função do fato do solo ser oriundo de uma rocha intermediária apresenta discreta presença de grãos de quartzo.

Na lâmina analisada, como indicado na Figura 5.3 pela seta em amarelo, foi possível visualizar certa orientação estrutural, principalmente no alinhamento entre os Feldspatos. Esta xistosidade é proveniente do processo de formação da rocha de origem.

A análise da lâmina petrográfica classificou o solo como sendo residual jovem com feldspato, biotita muito alterada, K feldspato.

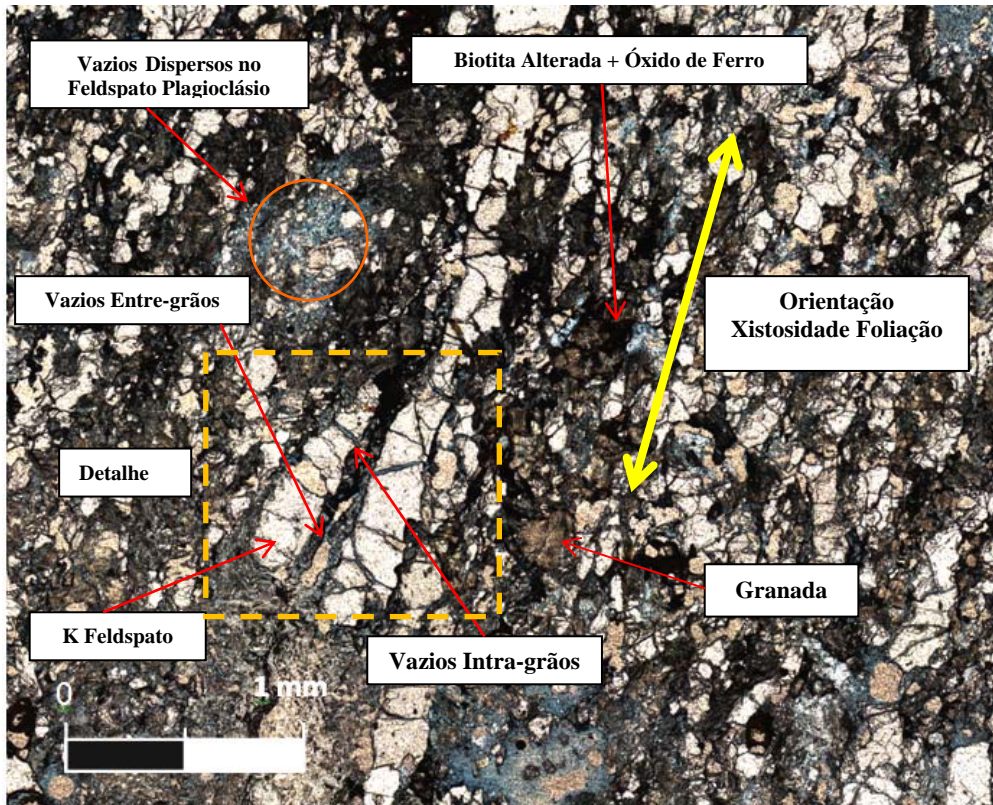


Figura 5.3 – Lâmina Petrográfica.

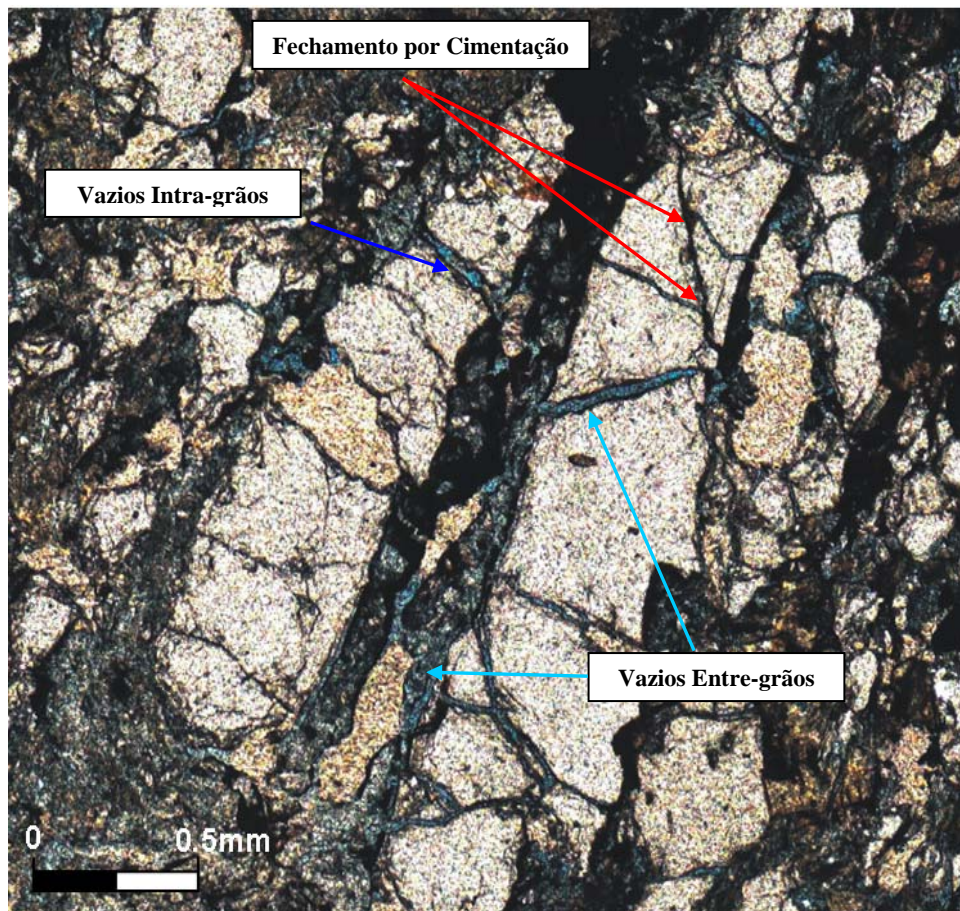


Figura 5.4 – Lamina Petrográfica – Ampliação do Detalhe na Fig. 5.3.



Em conjunto com a observação da lâmina petrográfica, as frações de material retidos na peneira 40, 200 e passante na 200 foram analisadas na lupa binocular.

De maneira esquemática foram representados na Tabela 5.5 os minerais observados em cada fração:

Tabela 5.5 – Resultados da observação com a lupa binocular.

Fração	Ordem	Mineral
Retido #40	Predominante	Quartzo
	Predominante	Concreções com argila e óxido de ferro
	Discreto	Feldspato
Retido #200	Predominante	Mica Muito Alterada (lamelar)
	Presente	Quartzo
	Discreto	Feldspato
Passante #200	Predominante	Argila
	Presente	Laminas de Mica muito alterada

### 5.2.2. Difração de Raio-X

Através da técnica de difração de Raio-X, foram realizadas uma série de 3 análises para se determinar os minerais constituintes do solo em estudo. Para tanto, se utilizou o método do pó. Foram analisadas as frações correspondentes aos retidos nas peneiras 40, 400 e 200.

Nos difratogramas que apresentam picos estreitos, simétricos e bem definidos (i.e. mais intensos) caracterizam os minerais com estrutura cristalina bem definida, podendo indicar ainda uma maior porcentagem deste mineral na amostra. Os minerais podem ainda ser identificados por picos menos intensos e largos e como mineral traço.

Na seqüência são apresentados os difratogramas com os respectivos minerais identificados conforme a granulometria das frações analisadas.

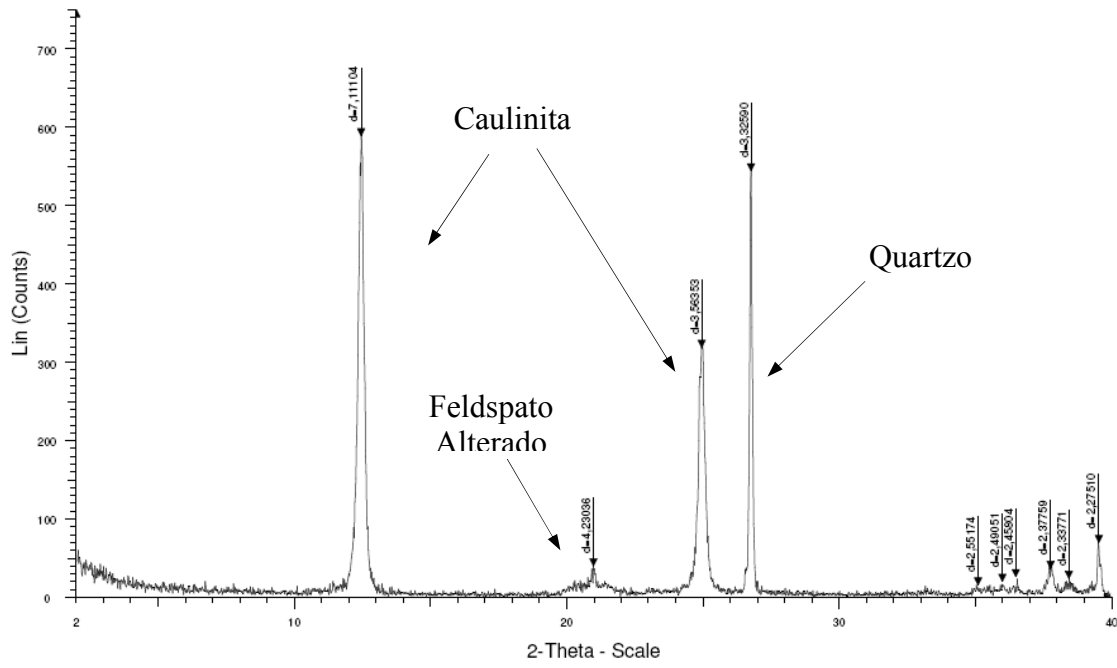


Figura 5.5 – Difratoograma Material Retido na peneira 40.

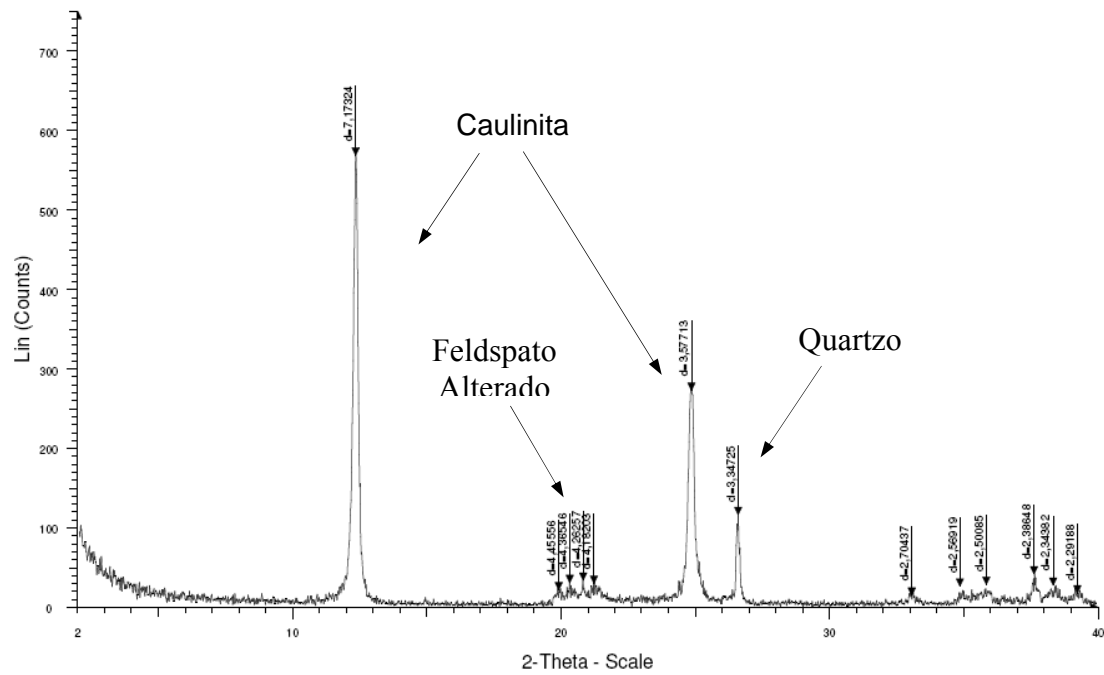


Figura 5.6 – Difratoograma Material Retido na peneira 200.

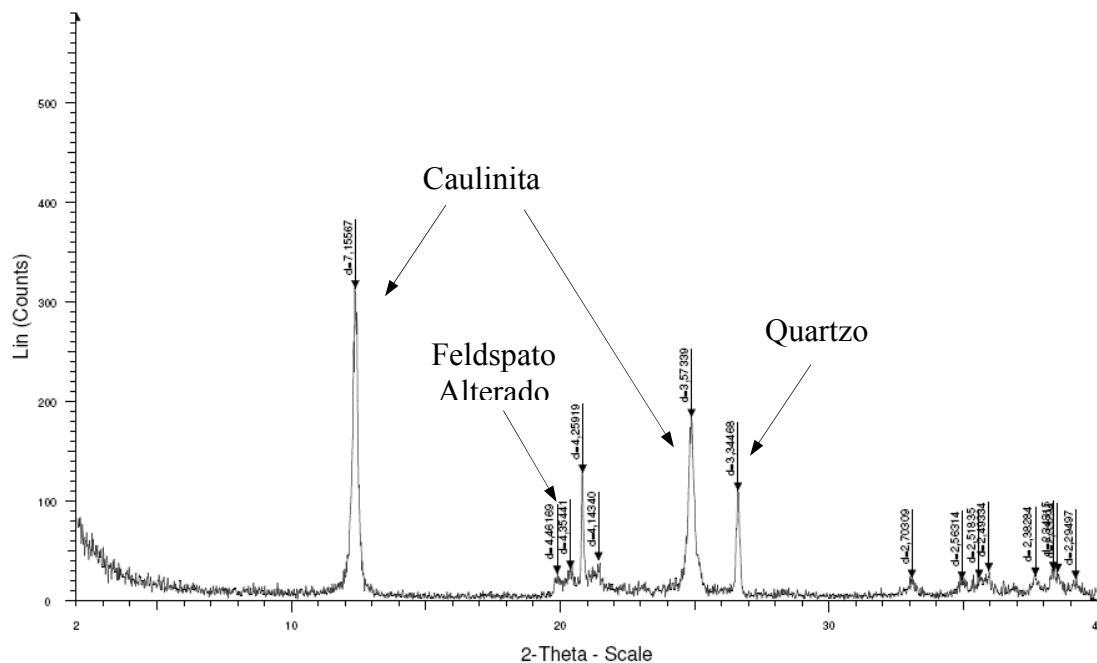


Figura 5.7 – Difratoograma Material Retido na peneira 400.

### 5.3. Propriedades Não-Saturadas

Para o entendimento e caracterização das propriedades não-saturadas, executou-se uma série de ensaios que compreenderam a determinação da curva característica via papel filtro, porosimetria de mercúrio e técnica de análise digital de imagens. Nos itens que seguem estão dispostos os resultados destas análises.

#### 5.3.1. Curva de retenção de umidade

No gráfico da Figura 5.8 apresenta-se a curva de retenção de umidade do solo estudado. Conforme mencionado no Capítulo 4, item 4.1.3.1, sua determinação foi realizada utilizando o método do papel filtro. Neste gráfico foram representadas as sucções mátricas referentes ao papel filtro disposto no topo e base, bem como a media entre ambos a qual foi estabelecida como sendo a sucção final.

Para a determinação da sucção foram utilizadas as equações de calibração do papel filtro propostas por Chandler et. al. (1992) que estão apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Equação de Calibração do Papel Filtro.

Autor	Calibração
Chandler et al.	$\log S = 4.48 - 0.0622 \times w_f ; w_f \leq 47$
	$\log S = 6.05 - 2.48 \times \log w_f ; w_f > 47$

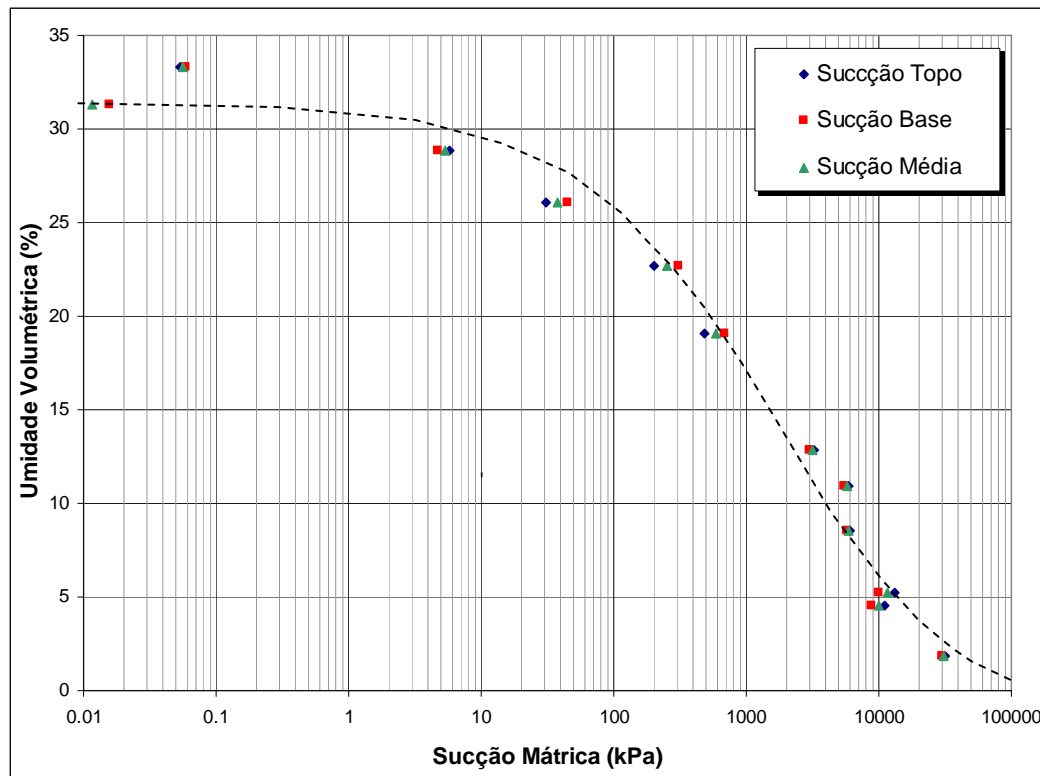


Figura 5.8 – Curva de retenção de umidade.

Analisando o formato da curva de retenção de umidade (linha tracejada) nota-se uma entrada de ar, sendo classificada como unimodal.

De maneira complementar foram realizados dois ajustes através dos modelos de Van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994).

As equações utilizadas nos ajustes bem como os parâmetros adotados encontram-se dispostos na Tabela 5.7.



Tabela 5.7 – Equações de Ajuste para a Curva Característica.

Autor	Equação	Parâmetros
Van Genuchten (1980)	$w = \frac{W_s}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right]^m}$	a, n, m
Fredlund e Xing (1994)	$w = c(\Psi) \frac{W_s}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right)\right]^m}$	a, n, m, c(ψ)

Os parâmetros de ajuste a, n, m e  $w_s$  podem ser obtidos através de interpolações gráficas com a curva de retenção de água, utilizando-se de uma planilha eletrônica do tipo Excel. Os valores utilizados nos ajustes estão representados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Valores dos Parâmetros de Ajuste (Curva Característica).

Modelo	Parâmetros (adotados)			
	a	m	n	$W_s$
Van Genuchten (1980)	$1,89 \times 10^{-4}$	2	0,5624	0,31
Fredlund e Xing (1994)	5093	4,48	0,5418	0,31

No gráfico da Figura 5.9 apresentam-se plotados os resultados do ensaio para determinação da curva de retenção de umidade utilizando o método do papel filtro bem como os ajustes propostos por Fredlund & Xing juntamente com Van Genuchten. Pode-se notar uma boa concordância entre os ajustes utilizados com a curva de retenção do solo em estudo.

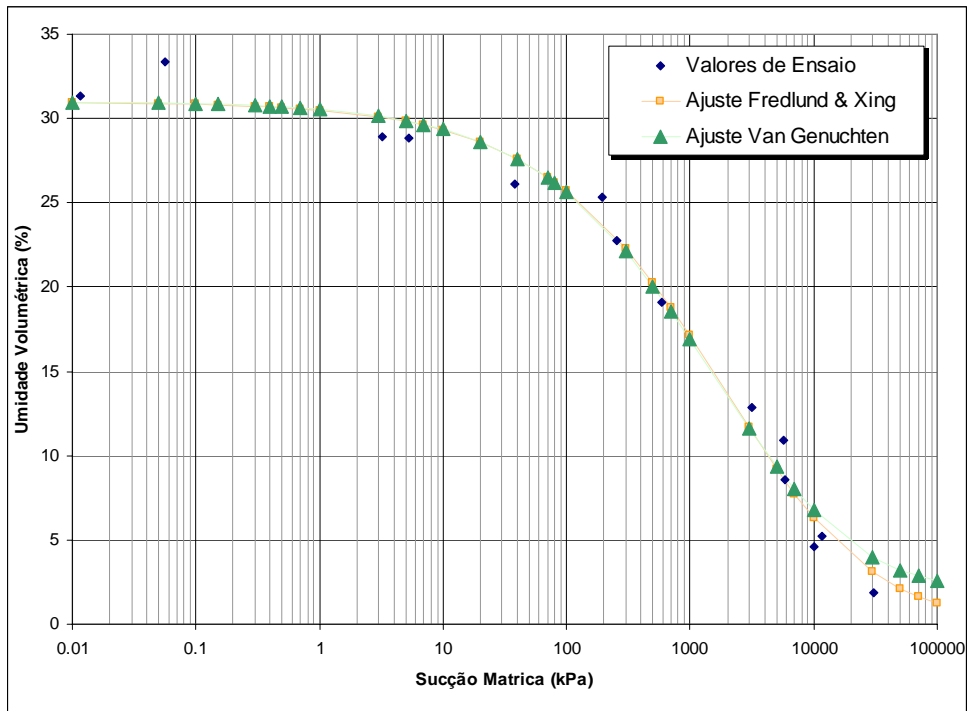


Figura 5.9 – Curva Característica com ajustes.

### 5.3.2. Porosimetria de Mercúrio

Na Figura 5.10 esta representada a curva de distribuição de poros obtida através da técnica de injeção de mercúrio. A porosidade medida foi de 37,64%.

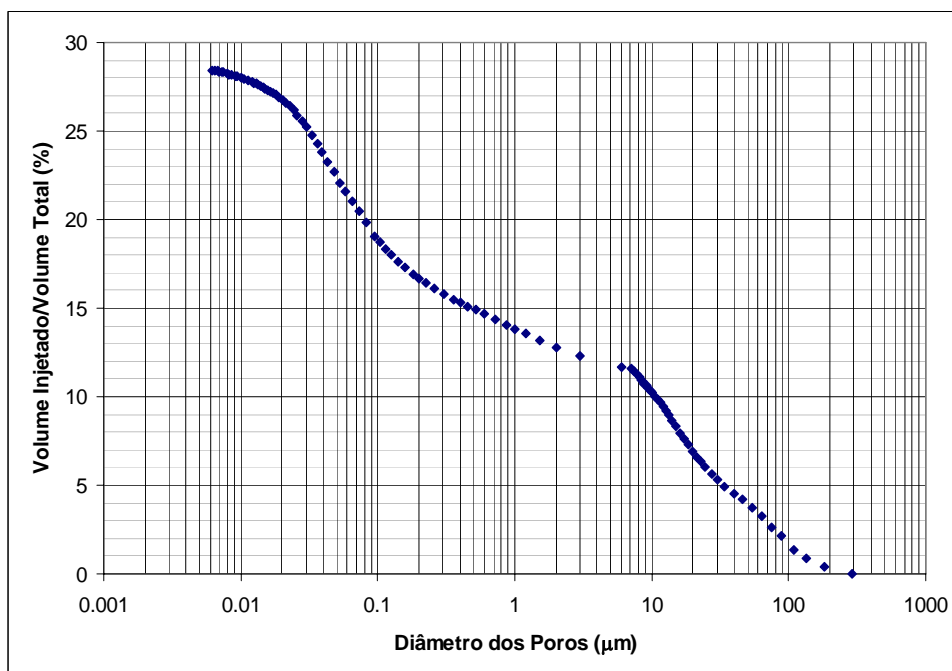


Figura 5.10 – Curva de Distribuição de Poros.

Utilizando a classificação proposta por IUPAC, Tabela 5.9, foi possível através da curva de distribuição de poros observar as concentrações de microporos, mesoporos e macroporos. A curva apresenta um comportamento bimodal, ou seja, concentração de poros em dois diâmetros de poros distintos. Esta característica é própria de solos residuais, que tipicamente apresentam poros entre partículas e poros entre agregados de partículas. Essa tendência já foi observada por outros autores em ensaios de porosimetria com solos residuais (e.g. Machado, 1998).

Tabela 5.9 – Classificação IUPAC (Diâmetro de Poros).

Classificação	Macroporo ( $\mu\text{m}$ )	Mesoporo ( $\mu\text{m}$ )	Microporo ( $\mu\text{m}$ )
IUPAC	$\emptyset < 0,2$	$0,2 < \emptyset < 0,5$	$\emptyset > 0,5$

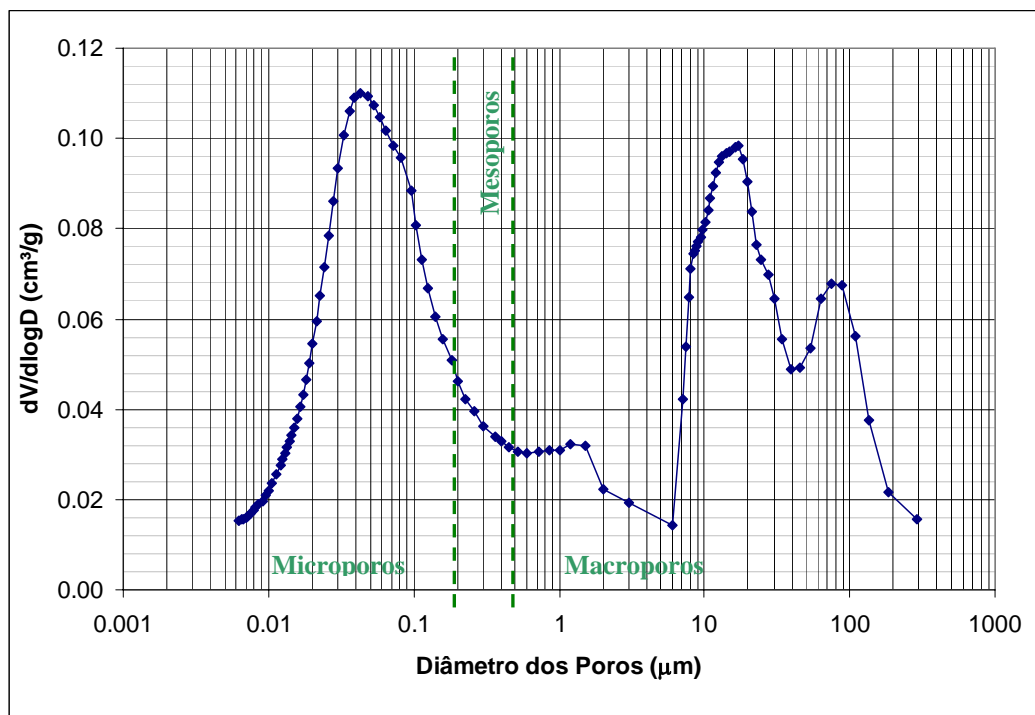


Figura 5.11 – Curva de Distribuição de Poros

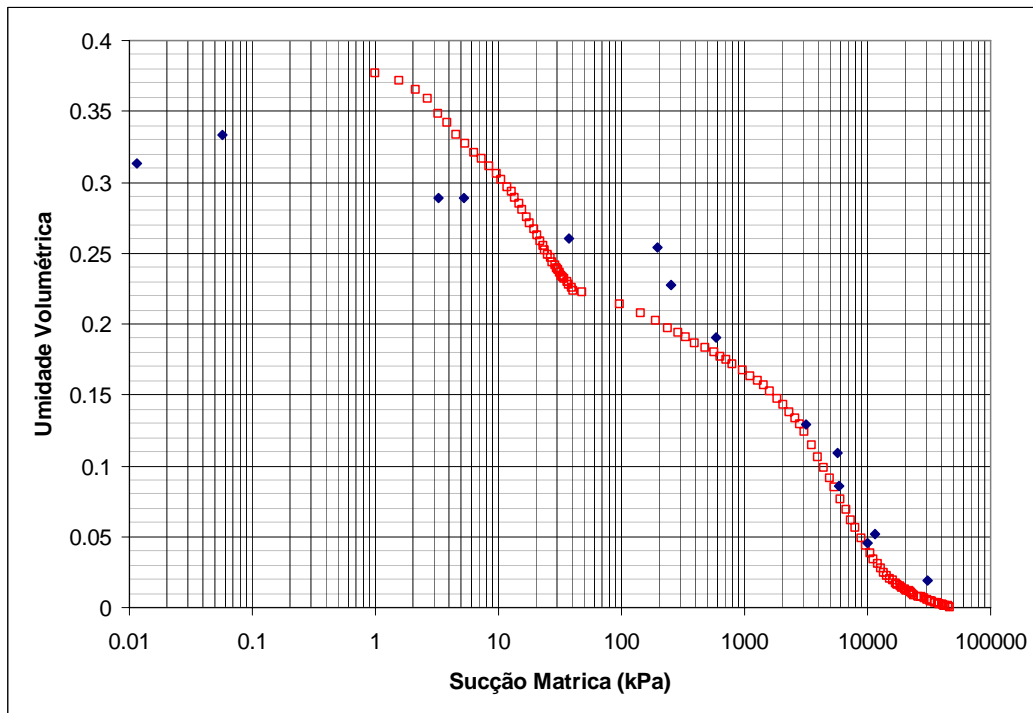


Figura 5.12 – Curva característica – Porosimetria de Mercúrio.

Como apresentado na Figura 5.12, a partir dos resultados do ensaio de porosimetria de mercúrio foi determinada a curva de retenção de umidade. Para tanto foram utilizadas as considerações mencionadas no Capítulo 4.

Pode-se notar uma boa correlação entre as técnicas para valores altos de sucção. Entretanto, para valores de sucção abaixo de 1000 kPa o ajuste já não se mostra satisfatório.

Indo de encontro ao observado na técnica do papel filtro, que aparentava possuir um único valor de entrada de ar, o comportamento da curva de retenção de umidade proveniente do ensaio de porosimetria de mercúrio indica a existência de dois valores de entrada de ar.

### 5.3.3. Microscopia Digital de Varredura,

O processo de captura da imagem da lamina foi realizado através da técnica de varredura. Esta técnica consiste em capturar imagens, ao longo da lamina, através de deslocamentos conhecidos para no final se compor um mosaico com as fotos. Para tanto o equipamento possui uma mesa servo controlada que desloca a lamina até a posição definida pelo software.

Com o intuito de tornar o trabalho de captura e análise da imagem menos moroso, em vista o tamanho dos arquivos gerados, a digitalização foi realizada em quatro etapas. Segue na Figura a seguir a configuração das divisões realizadas.

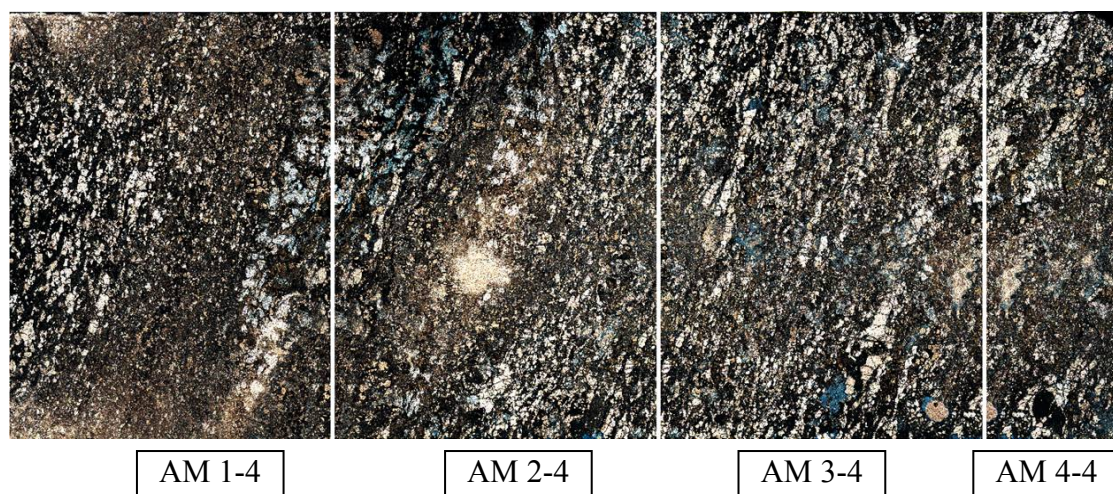


Figura 5.13 – Lâmina Petrográfica Completa.

Através da técnica de análise adotada foi possível a inserção de filtros que pudessem traduzir as características morfo-estruturais do solo. Para tanto houve a tentativa de se realizar a contagem dos *pixels* referentes aos vazios, representados pela cor azul, em cada seção da lâmina. Na Tabela 5.10 estão apresentados os resultados referentes às análises de cada seção.

Tabela 5.10 – Relação das Porosidades Através da Técnica de Microscopia Digital de Varredura.

Seção	Porosidade (%)
1-4	1.81
2-4	3.05
3-4	5.98
4-4	5.43
Porosidade Média	4.77

Notavelmente a porosidade na seção 1-4 apresenta um valor menor que as outras. Diferenças como esta eram esperadas por se tratar de um solo que apresenta grande heterogeneidade.

Os valores de porosimetria obtidos através dos Índices Físicos e utilizando as técnicas de Porosimetria de Mercúrio e Microscopia Digital de Varredura (MDV) estão representados na Tabela 5.11. A análise destes resultados sugere que a porosidade determinada através dos Índices Físicos representa a porosidade total enquanto os valores determinados através da técnica de Porosimetria de Mercúrio indicariam a porosidade efetiva (i.e. vazios interconectados). O valor obtido com a MDV foi muito menor que os demais. Partindo do pressuposto de que tal valor é irreal, uma possível explicação para tal estaria na dificuldade de se encontrar um filtro que permitisse uma identificação adequada dos vazios do material.

Deve-se ressaltar que as técnicas de Porosimetria de Mercúrio e MDV possuem limitações. Ambas apresentam a problemática da representatividade das amostras utilizadas em função de seus tamanhos reduzidos. Além disso, acredita-se que a aplicação de Mercúrio a altas pressões possa vir a alterar a estrutura do solo cimentado, alterando assim as propriedades de porosidade. Acredita-se também que em função da técnica de MDV realizar uma análise em 2D que os valores de porosidade possam não ser representativos.

Tabela 5.11 – Porosidades Através das diferentes.

	Índices Físicos	Porosimetria de Mercúrio	Microscopia Digital de Varredura
Porosidade (%)	46,85	37,64	4,77