

4

Caracterização Física, Química, Mineralógica e Hidráulica

Neste capítulo serão apresentados os resultados, análises e interpretação dos ensaios de caracterização física química e mineralógica para cada solo estudado. Os procedimentos adotados em cada um desses ensaios são descritos no capítulo 3.

4.1. Características Físicas

Para o cálculo dos índices físicos apresentados neste capítulo, foram utilizadas amostras indeformadas. A Tabela 4.1 mostra os índices físicos médios, obtidos através dos corpos de prova do cisalhamento direto, permeabilidade e papel filtro.

Tabela 4.1 - Índices físicos médio para o solo no seu estado natural.

Amosta	G_s	γ_{nat} (kN/m ³)	w_{nat} (%)	γ_d (kN/m ³)	e	n (%)	S (%)
F.01	2,61	15,04	21,69	12,36	1,06	51,57	52,00
F.02	2,65	16,21	21,65	13,33	0,95	48,65	59,30
F.03	2,71	15,84	16,48	13,60	0,95	48,67	46,07
F.04	2,67	15,91	15,66	13,76	0,90	47,43	45,42

4.1.1. Análise Granulométrica

A metodologia empregada na realização dos ensaios de granulometria seguiu as recomendações das normas da ABNT NBR 7181/84, como dito no capítulo 4. Os ensaios do material grosso (pedregulho, areias grossa e média) foram feitos por peneiramento, e do material fino (areia fina, silte a argila) pelo processo de sedimentação.

A Figura 4.1 mostra a curva granulométrica de cada solo estudado nesta dissertação. A partir desses resultados foi possível determinar as porcentagens das frações de solo para cada amostra, como é mostrado na Tabela 4.2.

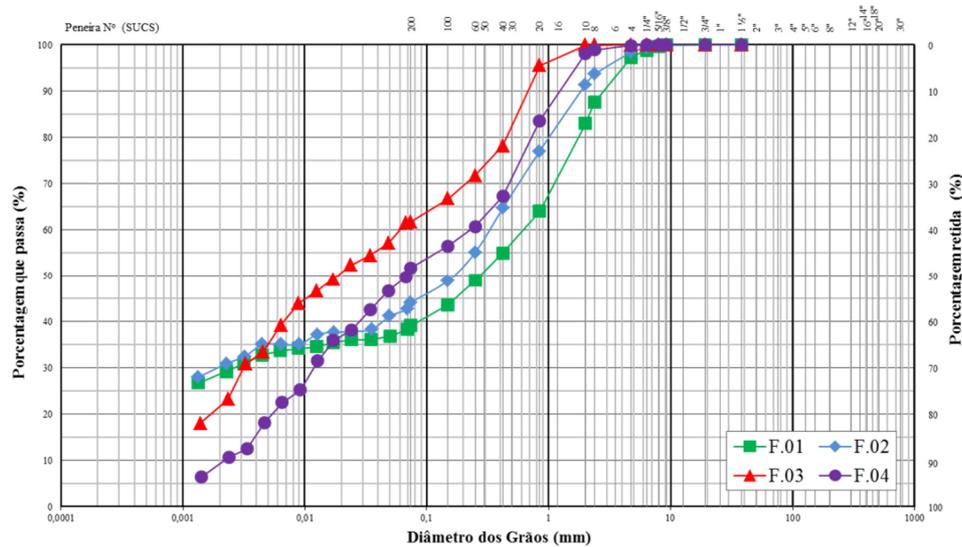


Figura 4.1 - Distribuição Granulométrica para os solos da Prainha e do Condomínio.

Tabela 4.2 - Resumo da Granulometria para os solos analisados da Prainha e do Condomínio (%).

Amostra	Pedregulho	Areia			Total	Finos		Total
		Grossa	Média	Fina		Silte	Argila	
F.01	17,0	24,2	12,6	8,8	62,5	9,1	28,5	37,5
F.02	8,6	21,5	17,9	10,1	58,1	11,9	30,0	41,9
F.03	0,1	14,3	16,4	9,4	40,2	38,5	21,3	59,8
F.04	1,9	23,9	15,6	10,1	51,5	39,5	8,9	48,5

Analisando os dados é possível observar que nos solos F.03 e F.04 predominam as frações areia e silte, enquanto nos F.01 e F.02 há uma presença mais significativa de areia, argila e pedregulho. Pode-se verificar também que as curvas correspondentes aos solos F.03 e F.04 são similares, ocorrendo o mesmo para os solos F.01 e F.02.

4.1.2. Limites de Atterberg

A Tabela 4.3 expressa resultados referentes aos limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade.

Tabela 4.3 - Limites de consistência ou de Atterberg para os solos analisados.

Solo	LL (%)	LP (%)	IP (%)
F.01	43,1	24,7	18,4
F.02	44,0	28,5	15,5
F.03	43,3	36,5	6,8
F.04	30,5	28,3	2,2

É possível verificar que nos solos F.01 e F.02, o a fração argila é maior e o índice de plasticidade é mais elevado quando comparada aos F.03 e F.04.

Analisando o índice de atividade das argilas (I_a) de acordo com a proposta de Skempton, verificou-se que todos os solos possuem I_a menor do que 0,75, ou seja, todos os solos são considerados inativos, como mostrado na Tabela 4.4.

$$I_a = \frac{IP}{\%<0,02mm} \quad (E. 4.1)$$

Tabela 4.4 - Valores de índice de atividade.

Solo	Skempton
F.01	0,65
F.02	0,52
F.03	0,32
F.04	0,25

4.1.3. Classificação do solo – SUCS

A partir dos resultados obtidos com as análises apresentadas foi possível classificar os solos estudados. A classificação utilizada nesta dissertação segue o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). A classificação de cada solo está apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Classificação dos solos estudados de acordo com o SUCS.

Solo	Classificação SUCS
F.01	Areia bem graduada com argila e pedregulho (SC).
F.02	Areia bem graduada com argila e pedregulho (SC).
F.03	Silte com areia com baixa plasticidade (ML).
F.04	Areia siltosa (SM).

Vale ressaltar que existem outras classificações que são empregadas para classificar os solos, mas de acordo com Carvalho, 2012, essas classificações não refletem as características de solos residuais, e ainda podem classificar solos diferentes num mesmo grupo.

4.2. Caracterização Química

4.2.1. Perda ao Fogo

Os índices (L.O.I. – Loss of Ignition) obtidos nesta análise são mostrados na Tabela 4.6. Este índice apresenta uma maneira rápida e de baixo custo para a avaliação do grau de intemperismo, sendo quanto maior este valor, mais intemperizado é o material.

Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de perda ao fogo.

Amostra	L.O.I. (%)
F.01	13,62
F.02	8,42
F.03	7,58
F.04	6,45

Através desses resultados foi possível verificar que a amostra de solo F.01 apresenta-se mais intemperizada, seguida da F.02, e a F.04 é a que se apresenta menos intemperizada dos materiais estudados.

4.3. Caracterização Mineralógica

4.3.1. Difração por Raios-X (DRX)

As análises de DRX foram realizadas em todas as amostras de solo, sendo todas as análises realizadas na amostra em estado natural. Em função dos minerais detectados não houve necessidade de fazer tratamentos para eliminar dúvidas.

A Figura 4.2 e a Figura 4.3 mostram os resultados dos ensaios dos solos coletados no Condomínio do Lago e na Prainha.

As interpretações dos difratogramas obtidos indicam a presença de quartzo (Q), argilominerais do grupo da Caulinita (Ct) e Gibbsita (Gb).

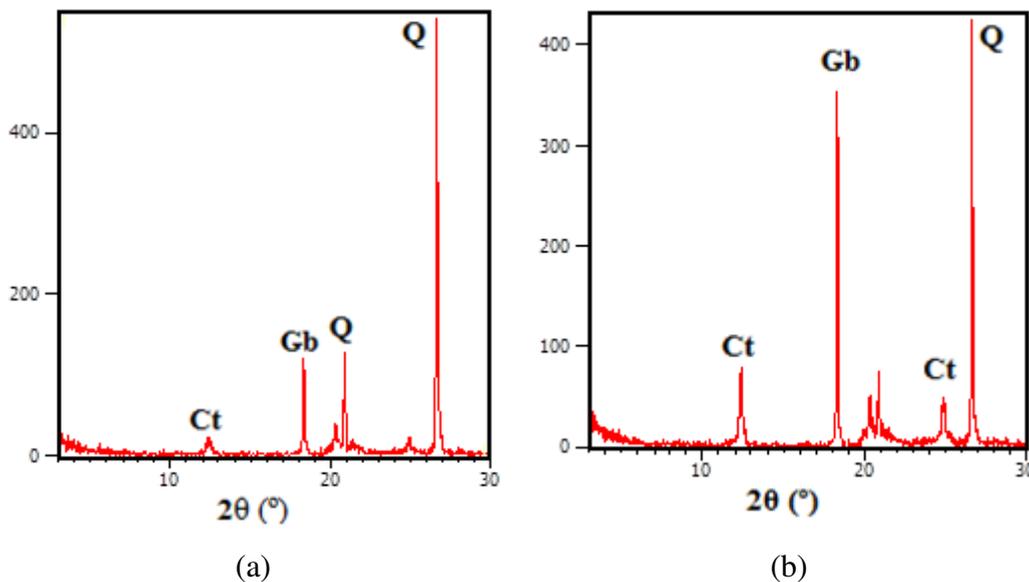


Figura 4.2 - Difratograma da amostra de solo F.01 (a) e F.02 (b).

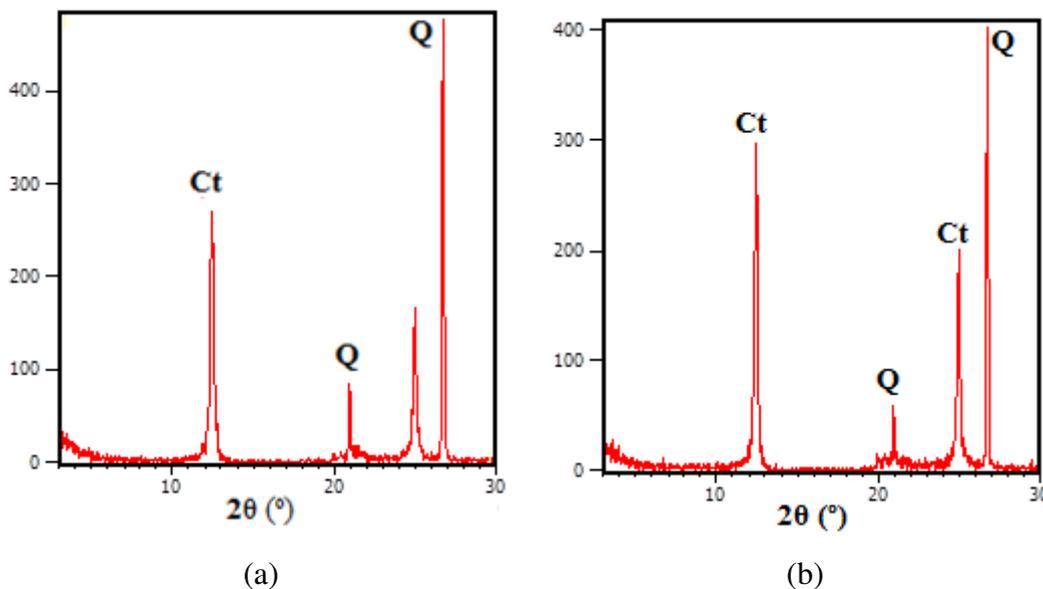


Figura 4.3 - Difratoograma da amostra de solo F.03 (a) e F.04 (b).

4.3.2. Lupa Binocular

As análises com a lupa binocular foram realizadas no LGMA da PUC-Rio nas frações pedregulho e areia com o objetivo de verificar as formas dos minerais presentes, o seu grau de alteração e uma estimativa qualitativa dos minerais. Os resultados obtidos são listados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos.

Amostra	Fração	Minerais
F.01	Pedregulho	Quartzo envolvido com óxido de ferro.
	Areia	Quartzo, concreções de argila.
F.02	Pedregulho	Quartzo e concreções de ferro.
	Areia	Concreções de argila, mica, quartzo e feldspato.
F.03	Pedregulho	Mica biotita derrificada, quartzo e feldspato.
	Areia	Mica biotita, quartzo feldspato.
F.04	Pedregulho	Mica biotita, quartzo e concreções de ferro.
	Areia	Agregados de Argila, mica e quartzo.

Em todas as amostras foi possível observar que os grãos de quartzo são angulares e a mica biotita e feldspatos quando presentes mostram um elevado grau de alteração.

As amostras referentes ao solo F.01 apresenta quartzo como único mineral primário presente, envolvido por óxido de ferro. Também se observou a presença de concreções de argila, como pode ser visualizado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Amostra F.01 fração pedregulho.

No solo F.02 foi observado que o feldspato encontrava-se muito alterado, possivelmente já sob a forma de gibbsita, fato que foi confirmado com as análises de DRX. A Figura 4.5 mostra detalhes dessa amostra.



Figura 4.5 - Amostra F.02 fração pedregulho.

A biotita aparece em maiores porcentagens nas amostras referentes ao solo F.03 e F.04, apresentando coloração dourada envolvida por óxido de ferro,

embora mantenha a sua forma laminar original, que pode ser tomado como indicativo de menor alteração dos respectivos solos em relação aos demais, como pode ser observado na Figura 4.6.

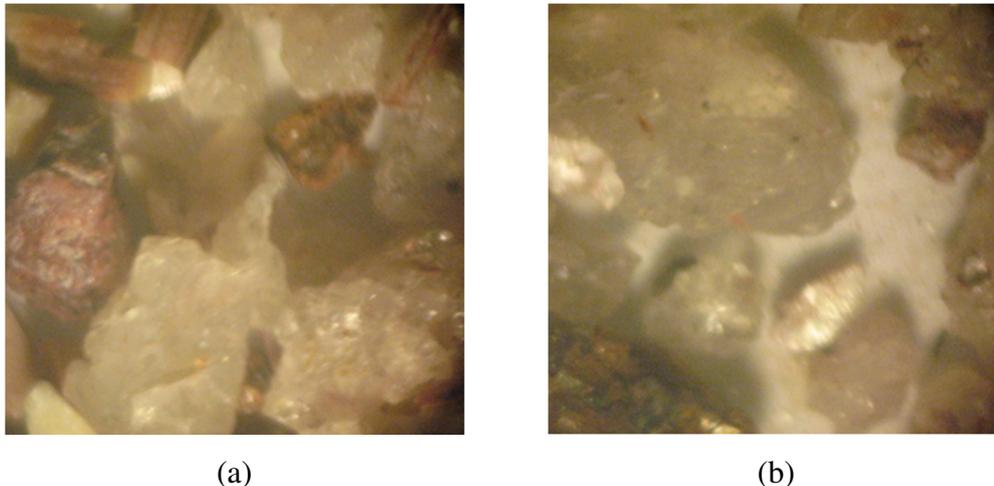


Figura 4.6 - Amostra F.03 (a) e F.04 (b) fração pedregulho.

4.4. Características Hidráulicas

4.4.1. Porosimetria de Mercúrio

O ensaio de porosimetria de mercúrio fornece o tamanho e distribuição dos poros, como já foi exposto no capítulo 4. A Figura 4.7 mostra a distribuição acumulativa dos poros para os solos estudados. Nota-se que os solos F.01 e F.02 apresentam dois patamares na curva do valor injetado acumulado, e os solos F.03 e F.04 possuem as curvas mais suavizadas, com a curva do F.03 um pouco menos suavizada que a do F.04.

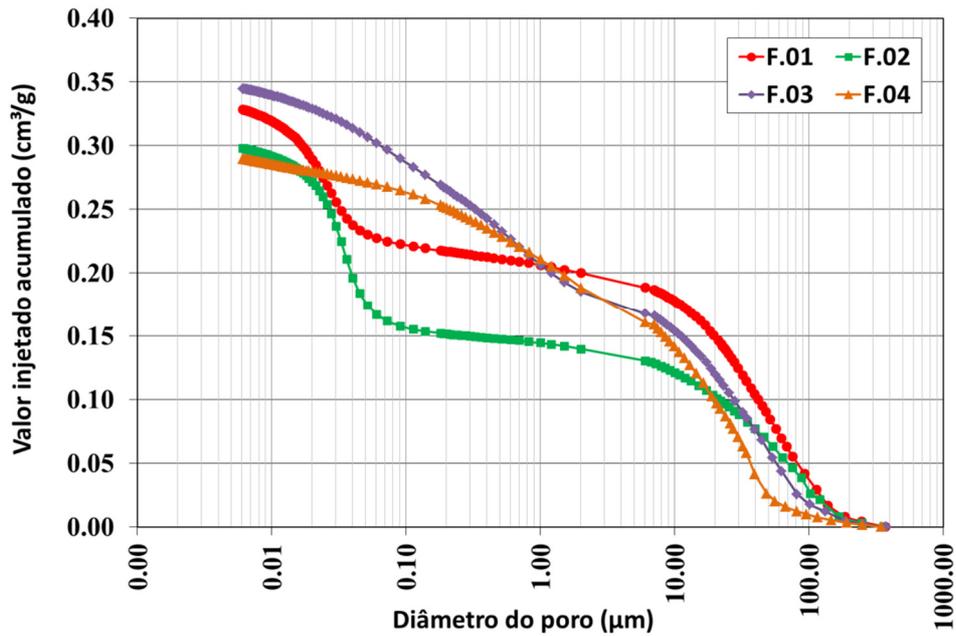


Figura 4.7 - Distribuição acumulativa dos diâmetros dos poros para os solos analisados.

Na Tabela 4.8 é mostrada a porosidade total de cada material analisado. A Figura 4.8 e a Figura 4.9 mostram a distribuição incremental dos diâmetros dos poros ($dV/d\text{Log}D$) pelo diâmetro do poro.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio.

Amostra	Porosidade por injeção de mercúrio (%)
F.01	47,96
F.02	46,08
F.03	49,49
F.04	44,50

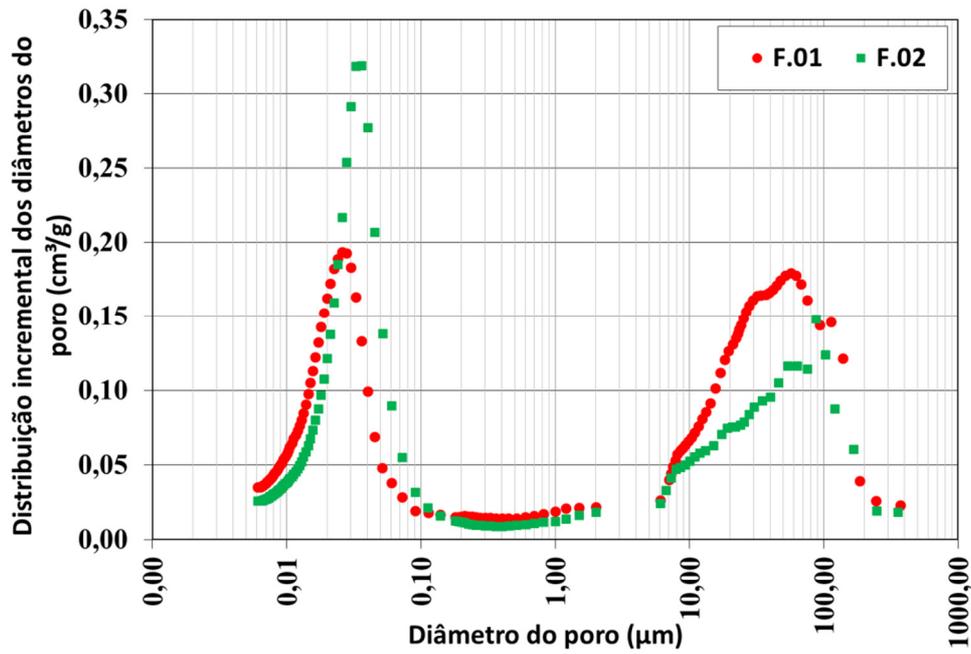


Figura 4.8 - Resultados dos Ensaio de porosimetria de mercúrio para os solos F.01 e F.02.

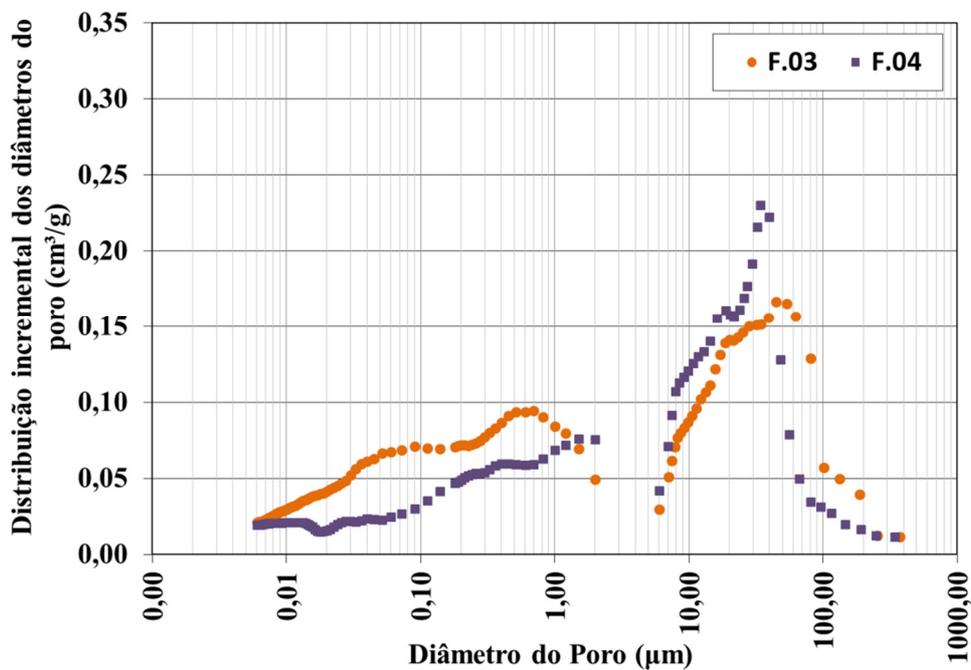


Figura 4.9 - Resultados dos Ensaio de porosimetria de mercúrio para os solos F.03 e F.04.

É possível observar que as amostras correspondentes aos solos do F.01, F.02 e F.03 apresentam dois picos bem definidos, indicando a ocorrência de uma distribuição de poros bimodal nesses solos. No solo F.02 o pico principal corresponde aos micro-poros, já no solo F.03, o pico principal corresponde aos macro-poros. O solo F.01 possui os picos referentes ao micro e macro-poros bem equilibrados. No solo F.04 apresenta apenas um pico bem definido, indicando que este solo possui uma distribuição dos poros unimodal.

4.4.2. Curva Característica de Sucção

A partir dos dados de distribuição dos poros obtidos com o auxílio do ensaio de porosimetria de mercúrio e os resultados obtidos com o método do papel filtro, é possível determinar a curva característica de sucção.

Os ajustes nas curvas foram realizados com a equação sugerida por van Genuchten (1980) com o auxílio do programa RETC (van Genuchten *et al.*, 1991). Utilizando como base os resultados obtidos com os ensaios de porosimetria de mercúrio, foram definidos ajustes bimodais para os solos F.01, F.02 e F.03 e ajuste unimodal para o solo F.04. Os dados experimentais obtidos são mostrados na Tabela 4.9 e na Tabela 4.10, e as curvas obtidas através do ajuste no programa são mostradas da Figura 4.10 à Figura 4.13. A equação utilizada para o ajuste pelo método de van Genuchten (1980) é mostrada na equação (E. 4.2) abaixo.

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

(E. 4.2)

Sendo a, m e n parâmetros de ajuste que dependem do tipo de solo e θ_s é a umidade em peso correspondente a um grau de saturação de 100%.

Tabela 4.9 - Dados experimentais de entrada no programa das amostras F.01 e F.03.

F.01		F.03	
Sucção Média (kPa)	θ (%)	Sucção Média (kPa)	θ (%)
9512.35	4.80	19721.80	1.20
6622.31	6.83	1064.39	12.80
4711.41	7.97	1586.56	10.20
2763.72	11.89	665.43	16.98
305.17	20.75	4.23	33.92
15.10	26.02	4.01	37.52
6.66	29.89	3.39	39.45
3.67	37.14	1339.32	9.41
21756.72	4.75	267.09	19.72
12095.72	5.75	47.66	22.80
4.18	26.79	27.45	25.44
5.11	30.66	2000.00	8.08
71.46	22.36	26.02	21.20
1912.40	18.68	9.75	25.78
65.93	29.23	50.00	29.76
4.01	39.17		

Tabela 4.10 - Dados experimentais de entrada no programa das amostras F.02 e F.04.

F.02		F.04	
Sucção Média (kPa)	θ (%)	Sucção Média (kPa)	θ (%)
79310.29	0.06	9161.45	2.84
44632.54	0.11	978.37	5.30
15946.32	0.17	258.65	9.64
3080.12	0.22	64.45	13.00
372.51	0.22	37.63	15.68
65.81	0.32	16.74	18.55
47.28	0.35	9.54	22.57
39.15	0.37	5.31	26.89
45.90	0.34	4.61	29.23
37.12	0.37	2.00	35.83
45.15	0.31		

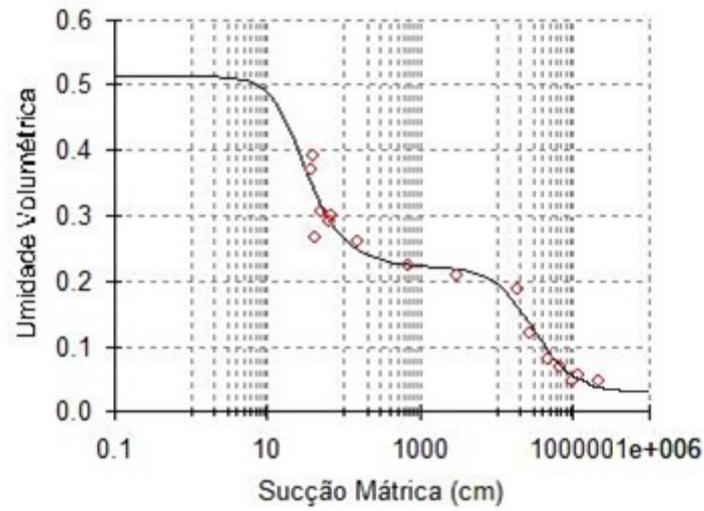


Figura 4.10 - Curva de Retenção do solo F.01.

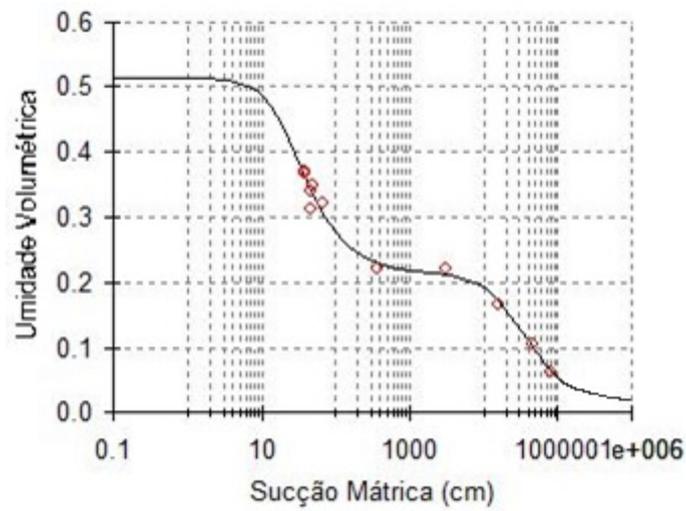


Figura 4.11 - Curva de Retenção do solo F.02.

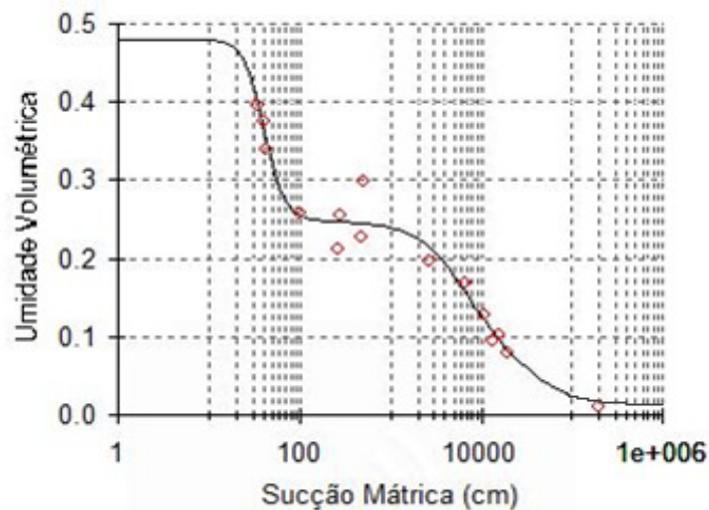


Figura 4.12 - Curva de Retenção do solo F.03.

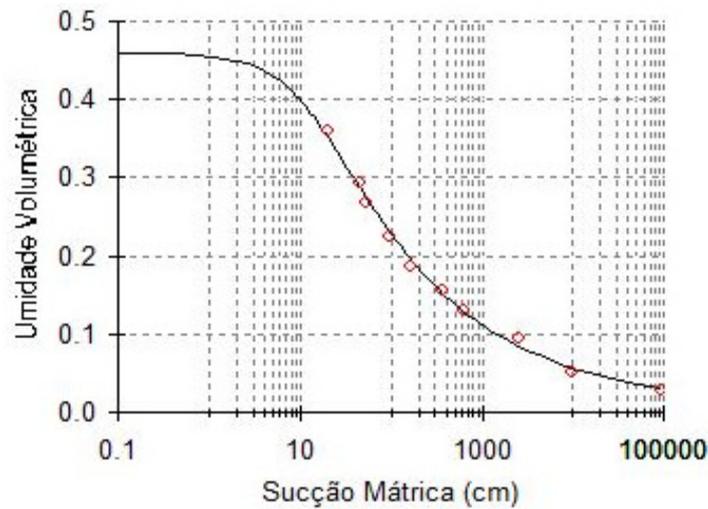


Figura 4.13 - Curva de Retenção do solo F.04.

Os dados de entrada e os parâmetros obtidos ao ajustar as curvas são mostrados na Tabela 4.11 e na Tabela 4.12.

Tabela 4.11 - Valores de entrada do programada RETC.

Solo	Curva Umedecimento			Curva de Secagem			R ²
	n	m	a	n ₂	m	a ₂	
F.01	2,11	0,53	0,049	3,99	0,75	0,00004	0,96
F.02	2,02	0,51	0,045	1,82	0,45	0,00005	0,99
F.03	4,25	0,76	0,028	1,72	0,42	0,00022	0,97
F.04	1,34	0,25	0,082	-	-	-	1,00

Tabela 4.12 - Parâmetros obtidos com o ajuste.

Solo	Curva Umedecimento				Curva de Secagem			
	θ_{s_1} (%)	θ_{r_1} (%)	ψ_{ar_1} (cm)	ψ_{res_1} (cm)	θ_{s_2} (%)	θ_{r_2} (%)	ψ_{ar_2} (cm)	ψ_{res_2} (cm)
F.01	51,34	3,29	10,0	100	5,29	3,50	9571	181818
F.02	51,34	24,70	9,0	150	28,24	4,12	9571	180000
F.03	48,00	25,00	25,0	70	26,00	3,00	2000	71500
F.04	45,88	3,20	4,5	1500	-	-	-	-

É possível observar que o valor de entrada de ar nos macroporos do solo F.04 foi menor do que nos outros solos seguida do F.01. Em relação à pressão de entrada de ar nos microporos, o solo F.03 apresenta o menor valor comparado aos solos F.01 e F.02, tendo esses os mesmos valores de pressão de entrada de ar. O

valor de umidade residual dos macroporos apresentou maior no solo F.03 e menor no solo F.01 (comparando somente os três primeiros solos), e para os microporos o solo F.02 apresentou o valor de umidade residual maior e o solo F.03 o menor valor.

4.4.3. Permeabilidade Saturada

Conforme dito no capítulo 3, foram adotados dois métodos para determinar a permeabilidade saturada dos solos em análise: permeâmetro de Guelph, no campo, e o permeâmetro de carga constante com parede flexível no laboratório. Os resultados obtidos com esses ensaios são mostrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Permeabilidades obtidas nos ensaios no campo e no laboratório.

Solo	K_{sat} (Guelph) (cm/s)	α (cm^{-1})	K_{sat} (P. Carga Cte) (cm/s)	B
F.01	2,57E-03	0,23	2,08E-04	1,00
F.02	4,52E-03	0,18	1,17E-04	0,97
F.03	6,31E-04	0,03	2,62E-05	0,97
F.04	1,00E-04	0,01	1,99E-04	0,97

Observa-se que os solos F.01, F.0.2 e F.03 apresentam a diferença de uma ordem de grandeza em relação aos dois ensaios realizados, enquanto que o solo F.04 apresenta a mesma ordem de grandeza tanto no ensaio realizado em campo, quanto em laboratório.

4.5. Análise dos Resultados

A partir das análises realizadas foi possível verificar, em relação aos índices físicos do estado natural, que os quatro solos estudados possuem os índices aproximadamente iguais, havendo uma pequena diferença somente na umidade natural, justificado pela profundidade de amostragem.

A densidade relativa dos grãos depende da composição mineralógica do mesmo, como se pode observar na Tabela 4.14:

Tabela 4.14 - Densidade relativa dos grãos de alguns minerais (Deer et al., 1981 apud Lopes, 2006).

Mineral	Gs
Quartzo	2,70
Muscovita	2,66 - 2,73
Caulinita	2,65 - 2,92
Ilita	2,80 - 2,83
Esmectita	2,45
Gibbsita	4,38
Goethita	5,30
Hematita	4,31 - 5,61
Magnetita	4,41 - 5,61

Tomando esta tabela como base, verifica-se que os solos analisados possuem densidade relativa dos grãos dentro do intervalo de valores da caulinita, mostrando que estes valores encontrados estão de acordo com as análises mineralógicas.

Em relação às curvas granulométricas, foi observado que os solos F.01 e F.02 possuem sua forma semelhante, assim como as dos solos F.03 e F.04. O solo F.03 é o que apresenta maior porcentagem de finos, sendo a maior parte dessa fração constituída por silte (38,5%). Os solos F.01, F.02 e F.04 apresentam maior quantidade da fração areia.

A partir dos valores de limites de consistência obtidos, é possível verificar que os solos F.01 e F.02 são mais plásticos do que os solos F.03 e F.04, o que pode ser explicado pelo maior percentual da fração argila nos solos F.01 e F.02.

O índice de atividade foi calculado a partir da equação de Skempton. Verificou-se que os solos estudados não apresentam atividade.

Com os dados de caracterização geotécnica, classificaram-se os solos segundo o SUCS como sendo o F.01 uma areia bem graduada com argila e pedregulho (SC), o F.02 uma areia bem graduada com argila e pedregulho (SC), o F.03 um silte com areia com baixa plasticidade (ML), e o F.04 uma areia siltosa (SM).

A composição mineralógica das frações pedregulho e areia mostraram-se similares para os solos analisados, diferenciando apenas pela presença de feldspato no solo F.02 e F.03 e pela ausência de mica no solo F.01.

A análise química de perda ao fogo mostrou que o solo F.01 apresenta maior grau de intemperismo devido ao maior índice obtido com este ensaio (L.O.I), seguido do solo F.02. O solo F.04 foi o que apresentou menor índice de perda ao fogo.

Os gráficos que mostram a distribuição incremental dos diâmetros do poro ($dV/d\text{Log}D$) pelo diâmetro do poro obtidos pelos ensaios de porosimetria de mercúrio, mostraram dois picos bem definidos para os solos F.01, F.02 e F.03, indicando uma distribuição bimodal dos poros. O solo F.04 apresentou apenas um pico, indicando uma distribuição unimodal. As curvas características foram ajustadas de acordo com esses dados.