

### 3 Equipamentos, Rotinas e Programa de Ensaio

A seguir são descritas as técnicas e rotinas para a realização dos ensaios de caracterização das amostras e para obtenção de parâmetros de resistência de acordo com o objetivo do trabalho.

Os ensaios abrangeram ensaios de caracterização física, mineralógica e química, além dos ensaios de retenção de água e porosimetria de mercúrio. Para a obtenção de parâmetros hidráulicos foram realizados os ensaios de permeabilidade com carga constante no laboratório e permeâmetro de Guelph. A obtenção dos parâmetros de resistência das amostras ocorreu por meio de ensaios de cisalhamento direto convencional em amostras indeformadas submersas. Todos esses ensaios foram realizados segundo técnicas e rotinas que permitiam a sua repetitividade

Um resumo dos ensaios executados pode ser visto da Tabela 3.1 a Tabela 3.4.

Tabela 3.1 - Resumo do programa experimental de Caracterização Física.

Amostra	Teor de Umidade Natural	Massa Específica dos Grãos	Limites de Atterberg	Granulometria
F.01	x	x	x	x
F.02	x	x	x	x
F.03	x	x	x	x
F.04	x	x	x	x

Tabela 3.2 - Resumo do programa experimental de Caracterização Química, Mineralógica.

Amostra	Caracterização Mineralógica		Caracterização Química
	Lupa Binocular	Difração de Raios-X	Perda ao Fogo
F.01	x	x	x
F.02	x	x	x
F.03	x	x	x
F.04	x	x	x

Tabela 3.3 - Resumo do programa de ensaios hidráulicos, de retenção de água e porosimetria de mercúrio realizados.

Amostra	Permeâmetro de Guelph	Permeâmetro de carga constante com parede flexível	Retenção de Água	Porosimetria de Mercúrio
F.01	x	x	x	x
F.02	x	x	x	x
F.03	x	x	x	x
F.04	x	x	x	x

Tabela 3.4 - Resumo do programa de ensaios de resistência.

Amostra	Cisalhamento Direto
F.01	x
F.02	x
F.03	x
F.04	x

### 3.1. Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica das amostras de solo estudadas foi realizada no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio (LGMA) utilizando amostras amolgadas e indeformadas. Os procedimentos para a realização desses ensaios seguiram as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A partir dos resultados obtidos nesses ensaios foram determinadas as propriedades índices através das correlações básicas, sendo então possível classificar o solo de acordo com o sistema unificado de solos (SUCS). Esses resultados serão apresentados no capítulo 4.

### **3.2. Caracterização Mineralógica**

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada através da realização de ensaios de difração por raios-X (DRX) e as frações grosserias (areia e pedregulho) foram realizadas na lupa binocular no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) na PUC-Rio.

As análises de DRX foram realizadas pelo método do pó em amostras total dos solos, sendo executadas no e-Diffraction Lab/NanoBusiness localizado no INMETRO, utilizando o equipamento X'Pert PRO com monocromador e detector PIXcel 1D da marca PANalytical com varredura de 3 a 70 graus de 2theta.

### **3.3. Caracterização Química**

A única caracterização química realizada foi o ensaio de Perda ao Fogo realizado no LGMA na PUC-Rio em todas as amostras. O procedimento para a realização deste ensaio é similar ao utilizado para determinar o teor de matéria orgânica no solo.

O ensaio consistiu em secar primeiramente o solo no cadim em estufa a 110°C por 24 horas até obtenção da constância de massa. Feito isto, a amostra foi levada a mufla a 600°C por 4 horas, sendo a quantificação realizada pela diferença da massa antes e após o aquecimento. Foi adotada essa metodologia para a obtenção de resultados mais realistas, visto que os solos estudados apresentam uma quantidade significativa de mica alterada, e esta perde água de constituição a temperaturas de 800 a 1000°C.

### 3.4. Parâmetros Hidráulicos

Para a determinação da permeabilidade dos solos foram realizados ensaios *in situ* com a utilização do Permeômetro de Guelph e ensaios de laboratório com permeômetro de carga constante e parede flexível em amostras indeformadas.

#### 3.4.1. Permeômetro de Guelph

O Permeômetro de Guelph é um permeômetro de carga constante utilizado em campo para a medição de permeabilidade saturada ou condutividade hidráulica saturada acima do lençol freático. É composto por um frasco de Mariotte que controla a carga constante dentro do furo, um tubo de acrílico com uma régua graduada onde a água é introduzida e um tripé que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares.

O modelo utilizado para a realização dos ensaios foi o 2800K1 da *Soilmoisture Equipment Corp.*, e para determinar a permeabilidade saturada ( $k_{sat}$ ), foram utilizadas as formulações propostas por Elrick *et al.* (1989) e por Reynolds & Elrick (1985) para, respectivamente, o emprego de uma e de duas cargas hidráulicas constantes.

Os ensaios foram realizados nos locais onde as amostras foram coletadas. Um exemplo pode ser visto na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Permeômetro de Guelph utilizado para a realização dos ensaios.

### 3.4.2. Permeâmetro de Carga Constante com Parede Flexível

Para a obtenção da permeabilidade saturada em laboratório executou-se ensaios em células triaxiais no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da PUC-Rio (Figura 3.2). Para isso foram moldados corpos de prova a partir de amostras indeformadas. Posteriormente as amostras foram saturadas e aplicou-se uma carga no topo diferente da base para que houvesse percolação de água. Para assegurar maior precisão nos resultados, a obtenção do volume percolado com o tempo para a utilização nos cálculos foi obtida com o enchimento e esvaziamento do medidor de volume com, pelo menos, três repetições.



Figura 3.2 - Célula Triaxial do LGMA (PUC-Rio).

Conhecendo-se a vazão e as características geométricas do corpo de prova, calculou-se a permeabilidade através da Lei de Darcy (Equação 3.1):

$$k = \frac{Q}{i * A}$$

Equação 3.1 - Lei de Darcy.

### **3.4.3. Ensaio para Obtenção da Curva de Retenção de Umidade**

Para a obtenção da curva característica foi utilizada a técnica do papel filtro.

O método do papel filtro se baseia na propriedade de meios porosos de absorver ou perder água ao entrarem em equilíbrio de pressão, quando estão em ambiente fechado, em contato direto ou não. O ponto de equilíbrio é atingido quando o fluxo de fluido ou vapor cessa, sendo os valores de umidade do solo e do papel filtro diferentes para esse ponto, porém possuem a mesma sucção (Lopes, 2006).

A curva de retenção de umidade é a expressão gráfica da relação entre o teor de umidade (volumétrico ou gravimétrico) ou grau de saturação do solo e a sucção, que pode ser expressa como sucção mátrica ou total.

#### **3.4.3.1. Rotinas e Técnicas de Ensaio**

Nos ensaios realizados pelo método do papel filtro, inicialmente foram obtidas as dimensões dos anéis moldadores de aço ou alumínio. Um anel foi moldado para cada ponto da curva sendo confeccionados 10 anéis. Os corpos de prova foram umedecidos ou secados para obter o teor de umidade desejado.

O umedecimento foi realizado por pesagem e a secagem, ao ar. Após este procedimento foi esperado um período de, pelo menos, dois dias para que houvesse a equalização da umidade de cada corpo de prova, sendo que neste período os corpos de prova ficavam embrulhados em papel filme e papel alumínio e foram colocados dentro de uma caixa de isopor fechada para a equalização da umidade.

Após este período, os papéis filtro foram colocados em contato com o topo e a base de cada corpo de prova, sendo que o papel filtro empregado foi o Whatman número 42, retirando-os sempre diretamente da caixa. Feito isso os anéis foram novamente embrulhados com papel filme e papel alumínio e isolados na caixa de isopor, permanecendo assim por um período de 7 a 10 dias para que houvesse a equalização das sucções.

Passado esse tempo, os embrulhos foram abertos um a um ao lado de uma balança de precisão de 0,0001g, e cada papel foi pesado em intervalos de 10s nos

primeiros 2 minutos, e 15s no minuto final. Após a pesagem, os papéis foram secos em estufa com temperatura entre 100 e 110°C por no mínimo 2 horas, e então os papéis secos foram pesados novamente seguindo o mesmo intervalo de tempo descrito para a pesagem dos papéis úmidos.

Os dados obtidos foram utilizados para montar o gráfico de variação do peso do papel vs a raiz do tempo, e obteve-se o valor da massa inicial do papel filtro através da interpolação dos dados para o tempo zero.

Os pontos muito afastados da reta de ajuste, considerando o fator de correlação menor do que 0,96 foram desconsiderados da curva final.

### 3.4.3.2. Programa de Ensaio

Foram realizados ensaios para determinar a curva característica para cada solo estudado nesta dissertação. A Tabela 3.5, Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8 mostram as características iniciais dos corpos de prova assim como a trajetória de umedecimento ou secagem adotada para cada amostra.

Tabela 3.5 - Pontos para a curva característica do solo F.01.

Ponto	Massa Inicial do Corpo de Prova (Anel + Solo) (g)	$\theta$ Inicial (%)	Trajecória	Qde a adicionar/retirar (mL)	$\theta$ Final calculada (%)	$\theta$ Final obtida (%)
1	48,56	17,19	Secagem	-5,43	2,23	4,75
2	53,42	18,94	Secagem	-3,99	8,00	5,75
3	58,78	22,50	Secagem	-3,12	13,77	26,79
4	64,25	24,51	Secagem	-1,80	19,54	30,66
5	67,18	25,59	Secagem	-0,10	25,32	22,36
6	68,93	26,94	Umedecimento	1,50	31,09	18,68
7	70,97	28,22	Umedecimento	3,10	36,86	29,23
8	73,19	29,24	Umedecimento	4,81	42,63	35,74
9	74,62	29,59	Umedecimento	6,81	48,40	39,17
10	77,21	30,94	Umedecimento	8,34	54,18	14,07
11	65,41	18,57	Secagem	-5,93	2,36	4,80
12	68,35	24,30	Secagem	-5,96	7,76	6,83
13	66,98	26,65	Secagem	-4,69	13,15	7,97
14	67,20	24,86	Secagem	-2,22	18,55	11,89
15	64,72	20,97	Umedecimento	1,06	23,94	16,80

16	66,41	25,45	Umedecimento	1,37	29,33	20,75
17	68,10	24,40	Umedecimento	3,68	34,73	26,02
18	66,75	23,29	Umedecimento	6,06	40,12	26,80
19	68,49	23,85	Umedecimento	7,72	45,52	29,89
20	65,86	23,88	Umedecimento	9,53	50,91	37,14

Tabela 3.6 - Pontos para a curva característica do solo F.02.

Ponto	Massa Inicial do Corpo de Prova (Anel + Solo) (g)	$\theta$ Inicial (%)	Trajecória	Qde a adicionar/retirar (mL)	$\theta$ Final calculada (%)	$\theta$ Final obtida (%)
1	64,78	17,90	Secagem	-5,87	1,73	6,37
2	65,20	18,04	Secagem	-3,95	7,17	10,63
3	60,30	18,12	Secagem	-2,00	12,61	16,68
4	66,09	18,92	Secagem	-0,31	18,05	21,97
5	68,22	19,10	Umedecimento	1,59	23,50	22,01
6	68,47	19,19	Umedecimento	3,54	28,94	32,27
7	68,82	19,30	Umedecimento	5,47	34,38	34,81
8	67,73	19,50	Umedecimento	7,38	39,82	37,17
9	69,66	19,60	Umedecimento	9,31	45,27	33,88
10	68,43	19,75	Umedecimento	11,24	50,71	36,73
11	70,07	25,69	Umedecimento	6,39	43,67	31,24
12	71,79	23,69	Umedecimento	9,15	48,90	30,23

Tabela 3.7 - Pontos para a curva característica do solo F.03.

Ponto	Massa Inicial do Corpo de Prova (Anel + Solo) (g)	$\theta$ Inicial (%)	Trajecória	Qde a adicionar/retirar (mL)	$\theta$ Final calculada (%)	$\theta$ Final obtida (%)
1	77,65	33,16	Secagem	-11,51	1,58	1,20
2	77,58	30,75	Secagem	-8,68	6,75	12,80
3	76,68	32,54	Secagem	-7,52	11,91	10,20
4	73,98	33,40	Secagem	-5,92	17,07	16,98
5	75,35	33,71	Secagem	-4,12	22,24	25,85
6	73,42	33,82	Secagem	-2,30	27,40	27,93
7	79,3	34,70	Secagem	-0,77	32,56	32,30
8	74,09	35,92	Umedecimento	0,66	37,72	33,92
9	75,62	39,32	Umedecimento	1,31	42,89	37,52
10	77,15	39,90	Umedecimento	2,93	48,05	39,45
11	67,32	21,71	Secagem	-1,10	18,63	9,41
12	70,32	18,91	Secagem	-2,09	13,11	17,38
13	68,05	19,48	Secagem	-0,31	18,63	19,72



14	65,71	18,42	Umededimento	9,76	45,72	22,80
15	65,67	20,11	Umededimento	11,09	51,24	25,44
16	67,6	15,39	Secagem	-3,61	5,47	8,08
17	65,62	15,26	Umededimento	2,41	21,86	21,20
18	69,13	18,60	Umededimento	4,11	30,06	25,78
19	67,33	19,08	Umededimento	9,88	46,46	29,76

Tabela 3.8 - Pontos para a curva característica do solo F.04.

Ponto	Massa Inicial do Corpo de Prova (Anel + Solo) (g)	$\theta$ Inicial (%)	Trajectoria	Qde a adicionar/retirar (mL)	$\theta$ Final calculada (%)	$\theta$ Final obtida (%)
1	68,50	20,66	Secagem	-6,11	3,24	2,84
2	71,02	19,97	Secagem	-4,26	8,10	5,30
3	71,79	20,66	Secagem	-2,70	12,96	9,64
4	70,84	20,08	Secagem	-0,81	17,82	13,00
5	70,79	20,95	Umedecimento	0,62	22,68	15,68
6	70,18	20,30	Umedecimento	2,65	27,54	18,55
7	68,73	20,99	Umedecimento	3,89	32,40	22,57
8	69,93	20,52	Umedecimento	6,05	37,27	26,89
9	70,71	20,47	Umedecimento	7,78	42,13	29,23
10	73,20	22,11	Umedecimento	8,93	46,99	35,83

#### 3.4.4. Porosimetria por Injeção de Mercúrio

A partir do ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio é possível determinar o tamanho e a distribuição dos poros no solo. Estas informações obtidas são intimamente relacionadas ao comportamento hidráulico do solo, uma vez que, a partir da distribuição dos poros é possível determinar o tipo de comportamento das curvas de retenção de umidade, podendo fazer ajustes unimodais ou bimodais para estas.

Os ensaios realizados para as quatro amostras de solo, foram executados no Laboratório da Fundação de Apoio à Física e à Química da Universidade de São Carlos, tendo sido utilizado o porosímetro do modelo *Micrometrics PoreSizer 9320*, com capacidade de investigação de poros com diâmetro de 0,0017mm a uma pressão de 1,7MPa, até diâmetros de 60Å, correspondente a uma pressão de 212MPa.

### 3.5. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

#### 3.5.1. Equipamento

Para a determinação dos parâmetros de resistência efetivos do solo saturado foram realizados ensaios de cisalhamento direto no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio (LGMA), sendo o equipamento utilizado da marca Wykeham Farrance (Figura 3.3) e o monitoramento foi realizado através do programa Catman Easy.



Figura 3.3 - Pressas utilizadas para a realização dos ensaios de cisalhamento direto.

#### 3.5.2. Rotinas e Técnicas de Ensaio

O procedimento de montagem e execução dos ensaios foi o mesmo descrito na norma técnica ASTM (1990).

Os ensaios executados foram drenados, acontecendo em duas etapas: adensamento e cisalhamento. Na primeira etapa, os corpos de prova, moldados em blocos indeformados, foram submersos em água destilada e deixados adensar por 24 horas. Adotou-se este procedimento para garantir a saturação do material. Em seguida, calculou-se a velocidade a ser usada no ensaio de cisalhamento, segundo proposto por Head (1986). Todos os corpos de prova foram cisalhados com velocidades de deslocamento constantes e iguais a 0,0612 mm/min, sendo imposto o deslocamento de aproximadamente 15mm para a obtenção da velocidade de

cisalhamento. Após o término do ensaio foi obtido o teor de umidade final da amostra.

### 3.5.3. Programa de Ensaio

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto convencional (CD) em amostras de solo indeformado, sendo três desses ensaios para a Prainha e três para o Condomínio. A Tabela 3.9 mostra a nomenclatura e a tensão normal aplicada em cada ensaio.

Para cada um quatro solos foram moldados, no mínimo, seis corpos de prova. Em todos foram repetidas as mesmas sequências de tensões normais: 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa.

Tabela 3.9 - Nomenclatura e a tensão normal aplicada em cada ensaio.

Ensaio	Tensão Normal (kPa)
CD_F.01_1	25
CD_F.02_1	
CD_F.03_1	
CD_F.04_1	
CD_F.01_2	50
CD_F.02_2	
CD_F.03_2	
CD_F.04_2	
CD_F.01_3	100
CD_F.02_3	
CD_F.03_3	
CD_F.04_3	