

5

Características dos Solos e dos Corpos de Prova Utilizados

5.1

Solos Utilizados

Para a realização dos ensaios foram escolhidos dois tipos de solos. Um dos materiais consiste de um solo maduro, argiloso, coluvionar que se localiza na encosta da PUC-Rio. O outro material, um solo sedimentar arenoso, que foi retirado da Cidade dos Meninos – Duque de Caxias, localizada na Baixada Fluminense.

Estas escolhas basearam-se nos seguintes motivos: os solos são bastante homogêneos, os locais de onde foram retirados são de fáceis acessos, e a existência de informações sobre os mesmos estão disponíveis na PUC-Rio.

5.1.1

Localização, Clima e Geologia

5.1.1.1

Solo Coluvionar – Campo Experimental

As amostras de solo foram retiradas do Campo Experimental II , situado no interior do campus da PUC-Rio, conforme esquema apresentado na Figura 4. Existe um grande número de informações disponíveis sobre os materiais desta área, que podem ser obtidas em Sertã (1986), Lins(1991), Daylac (1994), Moreira (1998), Beneveli (2002).

De acordo com Brito (1981) no município do Rio de Janeiro podem ser definidos cinco tipos climáticos diferentes. A região estudada pertence a uma zona megatérmica com clima tropical úmido chuvoso sem estação seca, sendo o mês mais seco com precipitação superior a 60mm e o mês mais frio com temperatura maior que 18°C. A pluviosidade média da região é em torno de 1.800 a 2.0000mm anuais. A análise climática dessa região indica condições para ocorrência de solos

profundos, bem desenvolvidos e com tendência acentuada para a acidez. (Benevelli, 2002)

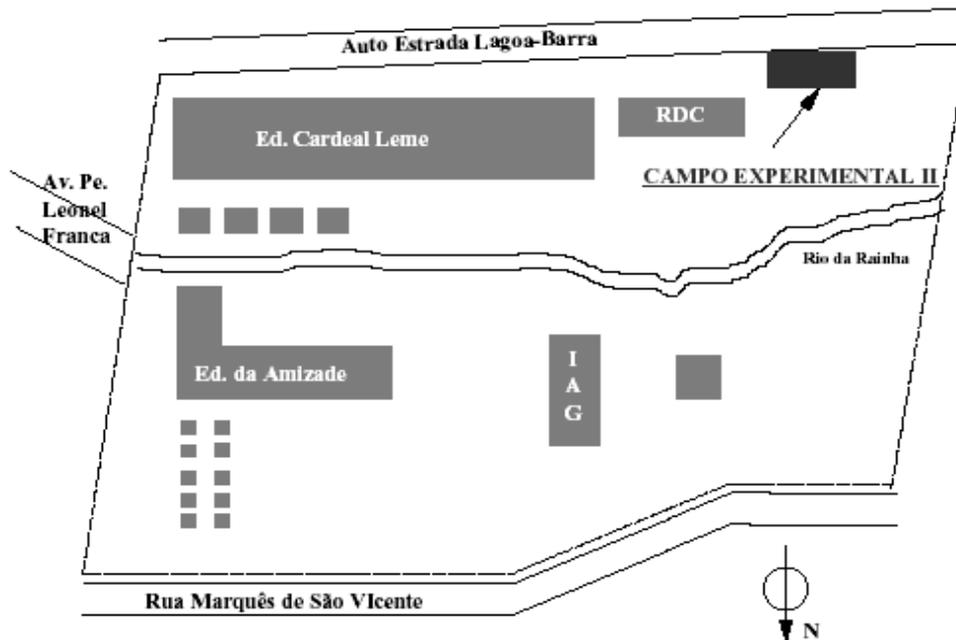


Figura 4 – Localização do Campo Experimental II da PUC-Rio. (Benevelli, 2002)

O Campo Experimental II está inserido no maciço da Tijuca. Segundo Rocha (1993) este maciço é caracterizado por biotita-plagioclásio gnaisse, microclina gnaisse, leptinito/granito e granodiorito, de idade Proterozóica Inferior. A encosta da PUC-Rio, de feição abrupta, tem declividade bastante alta, assim como a maioria das feições geomorfológicas do Estado do Rio de Janeiro.

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

Daylac (1994) apresentou uma descrição morfológica, vista na Figura 5, representativa do perfil do Campo Experimental II. Esta descrição morfológica foi obtida a partir da inspeção de um poço com 13,5 m de profundidade.

De acordo com Moreira (1998), o solo da área estudada é um solo coluvionar maduro que tem como características: tonalidade Bruno amarelada, textura argilo-arenoso com raros pedregulhos de quartzo (angular/subangular) e

lateritas, textura granular, aspecto homogêneo. Constitui-se basicamente por quartzo, argilo-minerais (essencialmente caulinita) e óxidos de ferro, como produtos do intemperismo dos minerais primários do biotita gnaiss.

Localização: LAGOA –BARRA

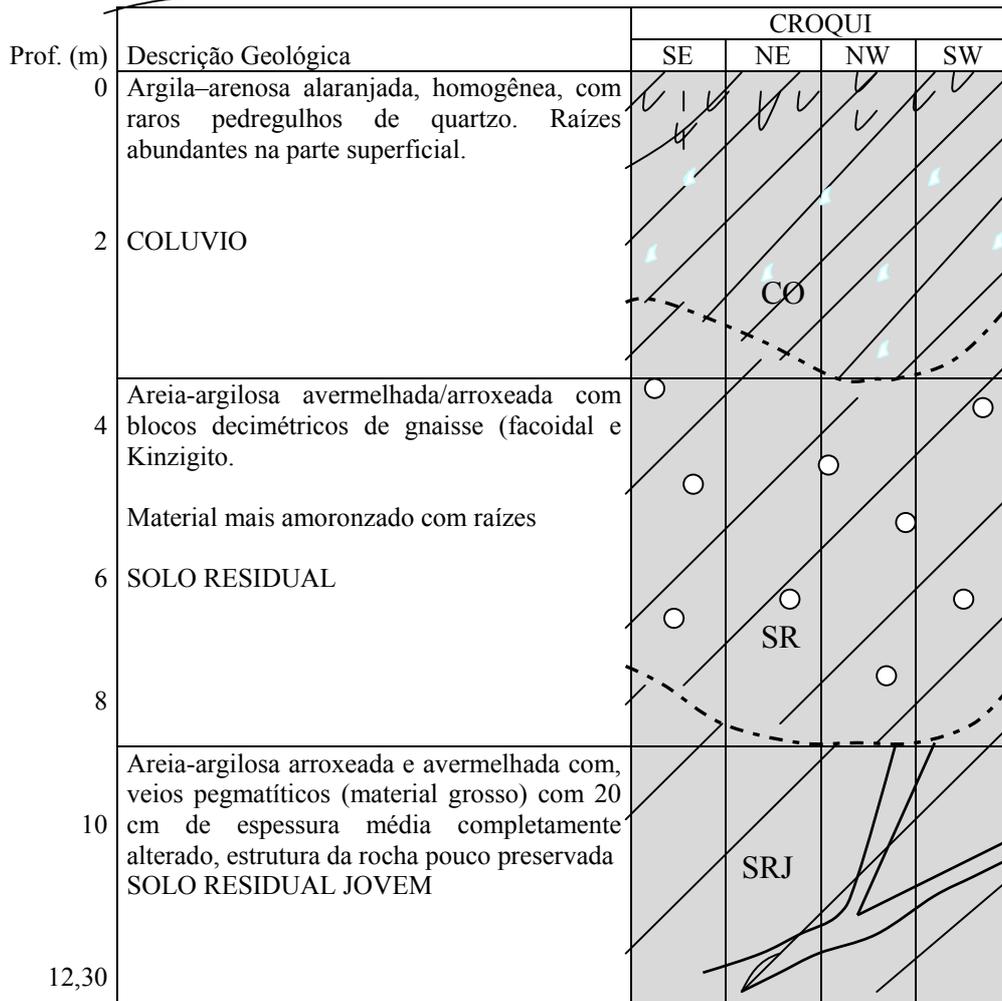
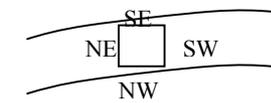


Figura 5 – Descrição morfológica do perfil (Daylac, 1994)

5.1.1.2 Solo Sedimentar Arenoso – Cidade dos Meninos

Do mesmo modo que o solo escolhido anteriormente, existem estudos realizados pelo grupo de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da

PUC-Rio desde a década de 90, e.g. Borges (1996) e Barreto (1998).

A Cidade dos Meninos está localizada na Baixada Fluminense, região situada entre o litoral e a encosta da Serra do Mar, denominada Serra dos Órgãos, conforme ilustra a Figura 6.



Figura 6 – Mapa da cidade do Rio de Janeiro destacando a Cidade dos Meninos

A Cidade dos Meninos está compreendida entre os rios Capivari, Iguçu e Pilar, como mostra a Figura 7. Em geral, a região apresenta-se topograficamente plana e sujeita a alagamentos, exceto, segundo informações de moradores antigos da região, as áreas aterradas para a construção da estrada da Camboaba e das construções locais (Borges, 1996). Na Figura 7 também estão indicadas a direção do movimento da água subterrânea local, e a localização da extração das amostras.

O clima da região é tropical úmido, caracterizado por duas estações bem definidas (chuvosa e seca), no qual a pluviosidade é máxima no verão e mínima no inverno. Conforme Oliveira (1994), as médias térmicas anuais estão em torno de 24°C, sendo janeiro o mês mais quente.

De acordo com Antunes (1978), a baixada é constituída por áreas de restinga e aluviões fluviais, tabuleiros e peneplanos pré-cambrianos sendo comum em toda a região da baixada a presença de cordões arenosos junto ao mar, barrando planícies pantanosas para o interior e, frequentemente, interrompidas pelas formações rochosa cristalinas que as apoiam.

Barreto (1998), através de perfis de subsuperfície da Cidade dos Meninos, observou uma estratificação nítida, com camadas de espessura métrica intercaladas de sedimentos finos e grosseiros.



Figura 7 – Localização da retirada das amostras e direção do fluxo d'água subterrânea.

5.1.2 Caracterização Física dos Materiais

A fim de caracterizar os materiais empregados neste estudo foram realizados ensaios para determinação do peso específico dos grãos, curva granulométrica e limites de liquidez e plasticidade no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, segundo os procedimentos especificados pela Norma Brasileira – NBR 6457/86, NBR6508/84, NBR 7181/84, NBR 6459/84 e NBR 7180/84 – da ABNT.

Os resultados da caracterização do solo do Campo Experimental e do solo da Cidade dos Meninos estão apresentados na Tabela 8. As curvas granulométricas dos solos estão apresentadas na Figura 8.

Para o solo do Campo Experimental, o teor de matéria orgânica foi medido pelo método da cápsula de porcelana, resultando num valor de 9,125 %. A umidade higroscópica deste material é de 1,92%. De acordo com a curva granulométrica, vista na Figura 8, o solo pode ser classificado como solo argilo-arenoso, apresentando 54% de argila, 35% de areia e 9% da fração silte. De acordo com a classificação universal (curva granulométrica e carta de plasticidade), este é um solo CH, argiloso de alta deformabilidade.

Tabela 8 - Caracterização geotécnica dos solos

SOLO	G	Granulometria						LL (%)	LP (%)	IP (%)	Ativ.
		ped (%)	Areia			Silte (%)	argila (%)				
			Grossa	Média	Fina						
Campo Experimental	2,693	1	8	15	12	9	54	56,8	22,4	34,4	0,637
Cidade dos Meninos	2,600	1	27	19	11	13	29	46,9	27,3	19,6	0,676

LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade;

w_{nat} – umidade natural do solo; Ativ - atividade.

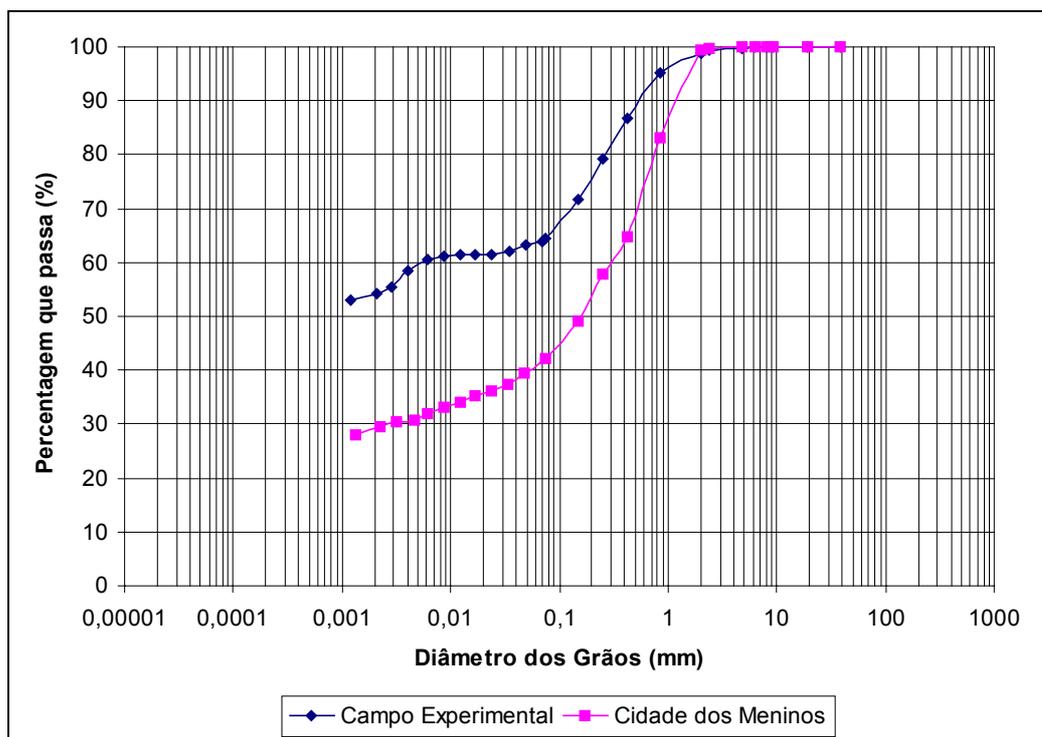


Figura 8 – Curvas granulométricas

O solo da Cidade dos Meninos apresentou uma umidade higroscópica de 1,96%. De acordo com a curva granulométrica, este solo pode ser classificado como um solo areno-argiloso, apresentando 57% de areia, 29% de argila e 13% da fração silte. De acordo com a classificação universal, este é um solo SC, solo areno-argiloso de baixa deformabilidade.

De acordo com a atividade, ambos são solos inativos, pois apresentam uma atividade inferior a 0,75.

Foram retirados do Campo Experimental aproximadamente 200 kg de solo superficial, na forma deformada para a realização dos ensaios. A profundidade de onde foi retirado este solo variou de 50cm a 80cm. Todo este material foi seco ao ar para depois ser destorroado, acondicionado em sacos plásticos e armazenado no laboratório de Geotecnia da PUC-Rio. Retirou-se amostras indeformadas do material com auxílio de sete anéis, com dimensões de 5,14cm de diâmetro e 2,00cm de altura. Os parâmetros obtidos estão listados na Tabela 9.

Tabela 9 – Índices físicos obtidos para amostras da encosta do Campo Experimental

$\gamma_{nat.}$ (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S (%)
16,55	22,26	13,54	0,99	60,60
15,98	24,86	12,80	1,10	60,67
16,90	22,46	13,80	0,95	63,58
17,49	21,76	14,36	0,88	66,99
16,96	21,07	14,01	0,92	61,49
17,48	21,88	14,34	0,88	67,15
17,24	21,64	14,17	0,90	64,73

De acordo com a Tabela 9 pode-se considerar como valores médios para o peso específico total, umidade, peso específico seco, índice de vazios e grau de saturação, são: 16,94kN/m³, 22,28%, 13,86kN/m³, 0,95 e 63,60%, respectivamente. Estes valores estão na mesma ordem de grandeza dos encontrados por Moreira (1998) e Sertã (1986).

Para o área da Cidade dos Meninos, foram amostrados os solos da primeira camada de solo sedimentar, em um ponto distante 800 metros da área contaminada isolada. Foram retiradas aproximadamente 100kg de solo superficial, na forma deformada, para a realização dos ensaios. A amostragem foi feita acima do nível d'água. A profundidade de onde foi retirado este solo variou de 1,0m a

1,2m de profundidade. Todo este material foi seco ao ar para depois ser destorroado, acondicionado em sacos plásticos e armazenado no laboratório de Geotecnia da PUC-Rio. Retirou-se amostras indeformadas do material *in situ* no momento da obtenção das amostras, com auxílio de cinco anéis, com dimensões de 5,15cm de diâmetro e 2,00cm de altura. Os parâmetros obtidos estão listados na Tabela 10.

Tabela 10 – Índices Físicos obtidos para amostras da Cidade dos Meninos

γ_{nat} (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	S (%)
19,52	19,71	16,31	0,59	86,86
19,25	17,38	16,40	0,60	74,57
19,62	17,40	16,71	0,62	73,68
19,21	18,54	16,21	0,59	81,02
19,50	18,25	16,47	0,60	79,22

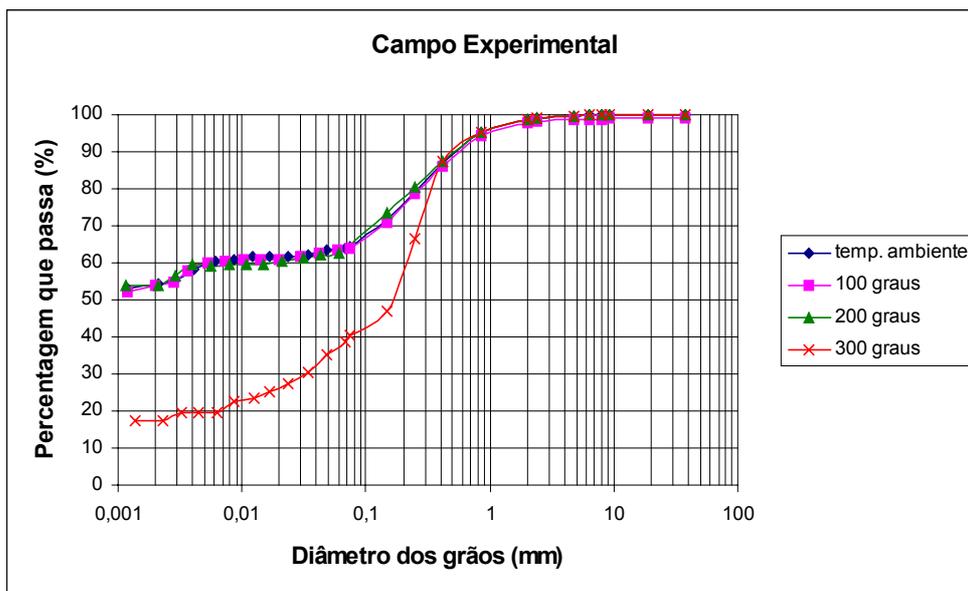
De acordo com a Tabela 10, pode-se considerar como valores médios para o peso específico total, umidade, peso específico seco, índice de vazios e grau de saturação, são: 19,42kN/m³, 18,26%, 16,42kN/m³, 0,60 e 70,07%, respectivamente. Estes valores estão um pouco diferentes dos que foram encontrados por Borges (1996), principalmente no que diz respeito ao índice de vazios. Os valores médios obtidos pela citada autora foram: 16,60kN/m³, 16,33%, 0,82, 51,78% para peso específico total, umidade, índice de vazios e grau de saturação respectivamente. O solo ensaiado pela autora foi coletado numa localização diferente do solo que será utilizado neste trabalho.

Com o intuito de se verificar as variações nas curvas granulométricas e nos valores dos limites de consistência, quando os solos são previamente submetidos a diferentes temperaturas, realizou-se ensaios de sedimentação e de limites de liquidez e de plasticidade para os solos aquecidos em mufla a temperaturas de 100°C, 200°C e 300°C.

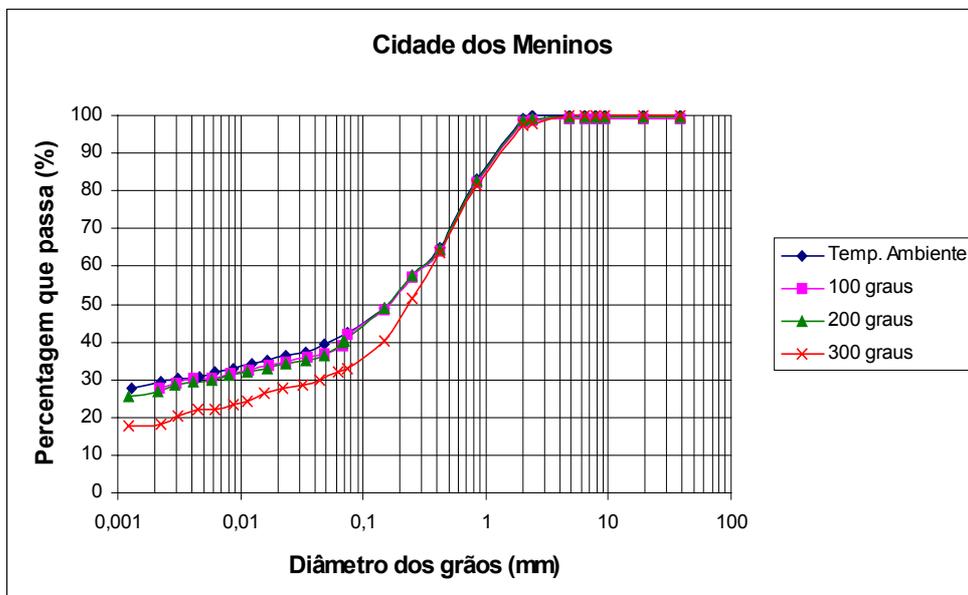
Os resultados obtidos, levando-se em conta o efeito do aquecimento nas curvas granulométricas, estão apresentados na Figura 9.

Até a temperatura de 200°C não se observa mudanças significativas nas curvas granulométricas. Para o solo submetido a aquecimento em mufla durante oito horas na temperatura de 300°C as mudanças ocorridas quanto à sua

granulometria são significativos, e o solo do Campo Experimental deixa de ser um material argilo-arenoso para se tornar um solo com classificação granulométrica areno-siltoso, e, o solo da Cidade dos Meninos aumenta bastante seu percentual de areia diminuindo o de argila, passando de uma areia argilosa para uma areia argilo-siltosa. A diminuição da percentagem de argila pode ter sido fruto de uma cimentação dos grãos de argila fazendo com que estes passassem a ter dimensões de silte ou areia.



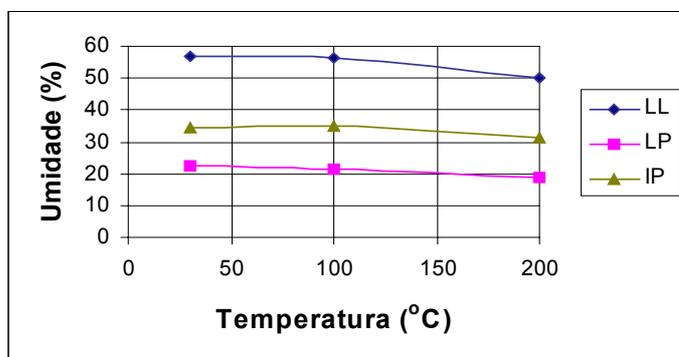
(a)



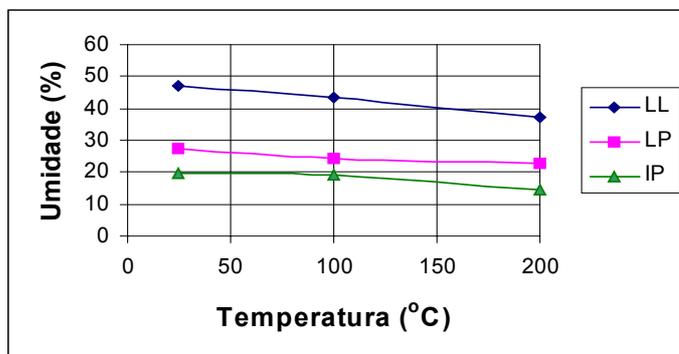
(b)

Figura 9 - Curvas granulométricas dos solos pré-aquecidos: (a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos.

Os resultados obtidos para os limites estão apresentados na Figura 10. A primeira observação interessante a ser feita é que, quando o solo foi submetido a 300°C, tanto o do Campo Experimental como o da Cidade dos Meninos, perderam sua plasticidade, sendo impossível determinar os seus limites. Tal pode estar associado ao fato de que a esta temperatura o solo perde água adsorvida e ocorre precipitação de ferro. Para um solo perder a sua plasticidade significa que este deixou de adsorver água entre as partículas de argila. Este resultado está totalmente de acordo com as curvas granulométricas da Figura 9, que sugere uma possível ocorrência de cimentação dos grãos de argila.



(a)



(b)

Figura 10 – Variações dos Limites de Atterberg: (a) solo do Campo Experimental, (b) solo da Cidade dos Meninos

Para as temperaturas de 100°C e 200°C os limites de Atterberg diminuíram. Este decréscimo nos limites com aumento de temperatura já havia sido observado por outros autores, incluindo Youssef et al. (1961). Alguns autores, como por exemplo, Rabe (1998) e Towata et al. (1993), não verificaram este fato. Isto pode estar relacionado com a faixa de temperatura inferior, de 20°C a 70°C, utilizada

pelos autores.

Quando compara-se a magnitude de variação do limite de liquidez do solo da Cidade dos Meninos com os resultados do solo do Campo Experimental, verifica-se que estas são maiores. Observando-se as curvas granulométricas a percentagem de argila não se alterou para o solo do Campo Experimental (54% de argila até 200°C) enquanto para o solo da Cidade dos Meninos esta foi decrescente com a temperatura (29% de argila na temperatura ambiente, 25% a 100°C e 23% a 200°C). A maior diminuição dos limites para o solo da Cidade dos Meninos pode estar relacionada com a diminuição do teor argiloso deste solo.

5.1.3 Análises Mineralógicas e Geoquímica

Nas Tabelas 11 e 12 são apresentados os resultados médios para as análises químicas de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e de Ataque Sulfúrico, para os solos do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos, respectivamente. Nestas Tabelas estão os resultados obtidos em função da temperatura, sendo ensaiados solos na temperatura ambiente, e solos submetidos a gradientes de temperatura de 100°C, 200°C e 300°C durante 8 horas. Nestas mesmas Tabelas estão listados os valores de pH para a mesma faixa de variação de temperatura.

Tabela 11 – Cátions Trocáveis e Análise Química– Campo Experimental

Temp. (°C)	Ca ²⁺ (meq/100g)	Mg ²⁺ (meq/100g)	K ⁺ (meq/100g)	Na ⁺ (meq/100g)	Al ³⁺ (meq/100g)	H ⁺ (meq/100g)	CTC (meq/100g)	
–	0,00	0,4	0,11	0,15	1,3	3,3	5,3	
100	0,00	0,4	0,11	0,16	1,3	3,8	5,8	
200	0,00	0,3	0,10	0,15	2,1	4,5	7,2	
300	0,00	0,3	0,10	0,19	0,3	3,7	4,6	
T.(°C)	SiO ₂ (g/kg)	Al ₂ O ₃ (g/kg)	Fe ₂ O ₃ (g/kg)	TiO ₂ (g/kg)	Ki	Kr	pH em água	pH em KCl
–	179	204	103	11,1	1,49	1,13	4,3	4,0
100	179	204	105	11,5	1,49	1,12	4,1	3,9
200	179	204	106	12,0	1,49	1,12	4,0	3,9
300	183	203	90	11,9	1,53	1,14	5,2	4,8

Tabela 12- Cátions Trocáveis e Análise Química– Cidade dos Meninos

Temp. (°C)	Ca ²⁺ (meq/100g)	Mg ²⁺ (meq/100g)	K ⁺ (meq/100g)	Na ⁺ (meq/100g)	Al ³⁺ (meq/100g)	H ⁺ (meq/100g)	CTC (meq/100g)	
–	0,00	0,6	0,10	0,18	2,0	5,6	8,5	
100	0,00	0,5	0,09	0,12	2,5	6,9	10,1	
300	0,00	0,5	0,09	0,27	0,1	4,5	5,5	
T.(°C)	SiO ₂ (g/kg)	Al ₂ O ₃ (g/kg)	Fe ₂ O ₃ (g/kg)	TiO ₂ (g/kg)	Ki	Kr	pH em água	pH em KCl
–	122	159	26	8,9	1,30	1,18	4,6	4,2
100	122	160	25	10,7	1,31	1,19	4,4	4,1
300	138	175	19	9,7	1,34	1,22	5,4	5,2

Considerando as análises do solo na temperatura ambiente, a grande quantidade de SiO₂(%), Al₂O₃(%) e Fe₂O₃(%) encontradas no solo do Campo Experimental indica que o mesmo é laterítico. Em contrapartida, a pequena quantidade das substâncias químicas CaO, MgO, K₂O e Na₂O encontradas, indica se tratar de material altamente intemperizado. O valor do índice kr também vem a enfatizar e confirmar que se trata de um solo muito intemperizado. Observando-se a relação molecular sílica-alumina (Ki), pode-se dizer que é um material formado predominantemente pelo argilo-mineral caulinita, o que resulta num solo de baixa atividade, o que já era esperado devido a sua classificação. A presença de cátions trocáveis para este solo está coerente em relação a solos de baixa atividade, como se pode observar na Tabela 11.

Para o solo da Cidade dos Meninos os valores de SiO₂ (%) e Al₂O₃(%) menores com relação ao solo do Campo Experimental, mostram que é menor a quantidade de finos deste solo. Os valores de capacidade de troca catiônica se apresentam altos para a pouca quantidade em percentagem da fração argila deste solo. Observando-se a relação molecular sílica-alumina (ki), pode-se dizer que é um material formado predominantemente pelo argilo-mineral caulinita, o que resulta num solo de baixa atividade.

O aumento de temperatura fez com que ambos os solos perdessem um pouco da sua capacidade de troca catiônica, e tanto na Tabela 11 como na Tabela 12 pode-se observar esta diminuição com a temperatura. A diferença significativa é sentida nas quantidades de alumínio. Com o aquecimento o alumínio solúvel

(troçável) no mineral argila se precipitou deixando de funcionar como cátions troçáveis, este alumínio precipitado se tornou um material cimentante, explicando a variação granulométrica com a temperatura.

Os valores de pH indicam que ambos os solos são ácidos. Estes valores de pH crescentes com a temperatura é resultante do aumento das oxidrilas na matriz de solo. Com o aumento da temperatura a água adsorvida libera oxidrilas.

Observando-se a Tabela 11 verifica-se altos valores de índice de ferro no solo do Campo Experimental, este ferro com o aumento de temperatura tendeu a se precipitar, tornando-se um agente causador da cimentação dos grãos de argila, que juntamente com os cátions de alumínio troçável bloqueiam a posição de troca do argilo-mineral. O baixo teor de óxido de ferro no solo da Cidade dos Meninos, apresentado na Tabela 12 vem de acordo com o encontrado na Figura 9, as curvas granulométricas tiveram uma menor variação para o solo aquecido a 300°C do que para o solo da Campo Experimental, uma vez que havia uma menor quantidade de óxido de ferro para funcionar como agente cimentante dos grãos de argila. Tanto os valores de SiO₂ quanto os de Al₂O₃ não sofreram variação percentual com o aquecimento, resultando em valores de k_i e k_r constantes independentemente do aquecimento sofrido pelo solo.

O que fez com que ambos os solos aquecidos a 300°C perdessem a sua capacidade plástica está intimamente ligado aos resultados da Tabela 11 e 12, uma vez que a cimentação dos grãos de argila se deu pela precipitação do alumínio e do ferro, que são elementos não hidratáveis e que bloqueiam a posição de troca do argilo-mineral. Diminuindo assim a capacidade de absorção do argilo-mineral.

Foram realizadas análises mineralógicas para a fração silte-argila, feita por difração de Raio-X, para o solo natural (temperatura ambiente - 25°C a 30°C) e para o solo submetido a diferentes gradientes de temperatura (100°C, 200°C e 300°C). As análises mineralógicas para solos aquecidos foram realizadas com o intuito de se quantificar as mudanças sofridas por esses minerais. As Figuras 11 e 12 apresentam os difratogramas de Raios-X, para amostras de solo na temperatura ambiente e quando submetidas a 100°C, 200°C e 300°C para o solo do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos respectivamente.

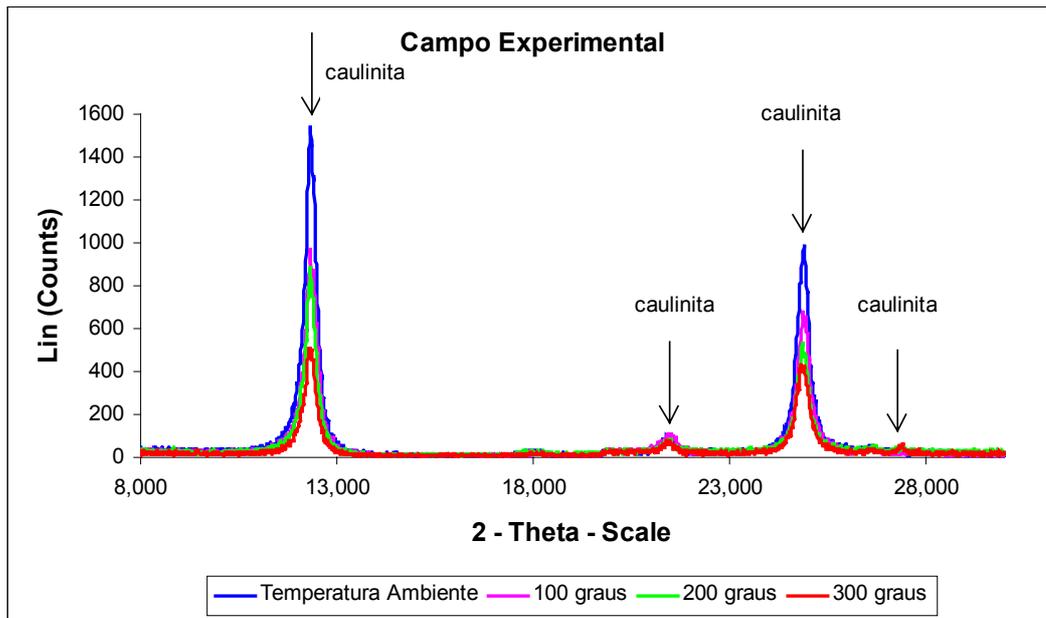


Figura 11 - Difratoformas de Raios-X do solo do Campo Experimental.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9924939/CB

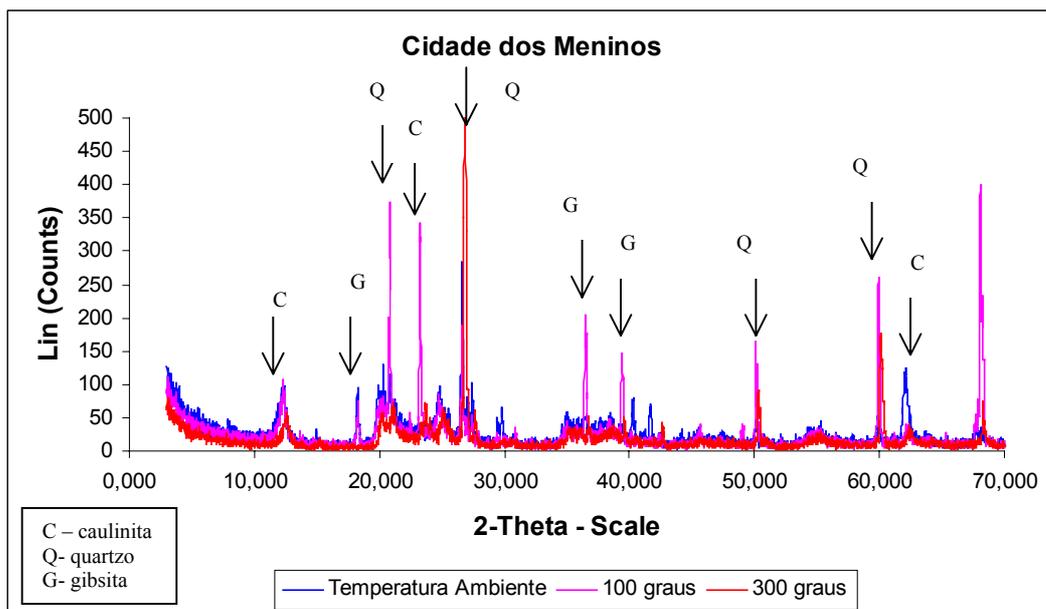


Figura 12 - Difratoformas de Raio-X do solo da Cidade dos Meninos.

Através da Figura 11 observa-se que para o solo natural do Campo Experimental há uma predominância na presença de caulinita, estando este resultado de acordo com o encontrado por Moreira (1998) e Beneveli (2002). Nesta mesma Figura, pode-se observar uma diminuição gradativa dos picos que

evidenciam a presença predominante do mineral caulinita. Fazendo-se uma análise do difratograma de 300°C observa-se a presença de Gibsita, inexistente nos demais difratogramas, evidenciando-se assim a precipitação de ferro.

A análise para o solo natural da Cidade dos Meninos (Figura 12) indicou a predominante presença de caulinita, com traços de Gibsita, estando este resultado de acordo com o encontrado por Borges (1996). Para este caso houve diminuição gradativa da caulinita somente em dois de seus picos, o quartzo não se alterou com a temperatura, e pode-se observar foi a eliminação da Gibsita com o aumento de temperatura.

Foram feitas análises termogravimétricas para os solos em temperaturas ambiente e aquecidas, de 100°C, 200°C e 300°C. Estas análises não indicaram nenhuma alteração dos argilo-minerais com a temperatura e a perda de peso foi insignificante. Essa análise é feita para os minerais constituintes e não para os cátions trocáveis.

Outra mudança verificada nos solos quando estes submetidos a diferentes gradientes de temperatura, era a significativa transformação na sua coloração. No caso do solo do Campo Experimental, para a temperatura ambiente sua cor era levemente avermelhada, chegando a cor bordô intenso quando submetido a 300°C, conforme mostra a Figura 13(a). A cor do solo da Cidade dos Meninos na temperatura ambiente era amarelada, chegando à cor acinzentada quando submetido a 300°C, conforme ilustra a Figura 13(b).

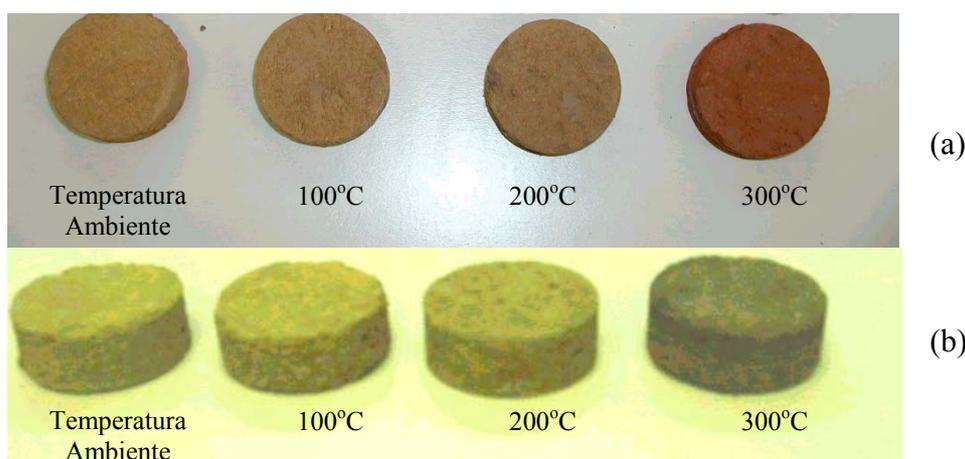


Figura 13 – Mudança na coloração das amostras com a temperatura: Campo Experimental (a), Cidade dos Meninos (b).

5.2 Preparação e Confeção das amostras

Assim que o solo chegou ao laboratório foi preparado conforme as seguintes etapas: secagem na estufa a 60°C, destorroamento, peneiramento, umedecimento, e, homogeneização. Em seguida confeccionaram-se os corpos de prova para todas as análises aqui realizadas através de compactação, conforme descrito no item 5.2.1.

As amostras de solo foram colocadas em bandejas e levadas à estufa a 60°C, sendo estas periodicamente homogeneizadas dentro das bandejas. A amostra foi considerada seca quando apresentou constância de massa para dois dias consecutivos.

Após o processo de destorroamento o solo foi novamente homogeneizado e, em seguida peneirou-se todo o material em peneira de número 4. A finalidade deste procedimento foi a retirada de possíveis resíduos vegetais/animais e a pequena quantidade de pedregulhos contida na amostra.

5.2.1 Confeção das amostras - Compactação

Geralmente são utilizados três tipos de compactação de laboratório para a determinação da relação umidade x peso específico: impacto, estático e vibração. Cada tipo de compactação induz na amostra uma determinada estrutura que está intimamente relacionada com o comportamento mecânico do material.

Para a realização de ensaios mecânicos em solos compactados em laboratório é condição indispensável que as amostras ensaiadas sejam uniformes. A obtenção de amostras uniformes pelos processos comuns de compactação em camadas requer que seja aplicada a mesma energia de compactação ao longo da amostra. No entanto, nos diversos métodos de compactação existem alguns fatores que conduzem a aplicação de energias de compactação diferenciadas, tais como, a má distribuição dos golpes nos ensaios dinâmicos e a colocação de camadas em volumes diferentes. No processo de compactação estática a pressão de compactação é distribuída uniformemente sobre o topo de cada camada. A

distribuição da pressão ao longo de cada camada depende do atrito lateral. O efeito do atrito pode ser reduzido pela lubrificação das paredes do molde ou pela redução da relação entre a espessura e a altura da camada.

Todos os ensaios foram realizados em amostras de solo compactadas pelo processo estático. As amostras foram compactadas em seis camadas, pois de acordo com Lins (1991), estas apresentaram uma melhor distribuição de densidade. Cada camada foi compactada durante 10 minutos. Procurou-se trabalhar com densidades, umidades e índice de vazios médios de campo.

A Figura 14 apresenta um esquema do molde fabricado para ser utilizado na compactação das amostras. A Figura 15 é uma foto deste molde.

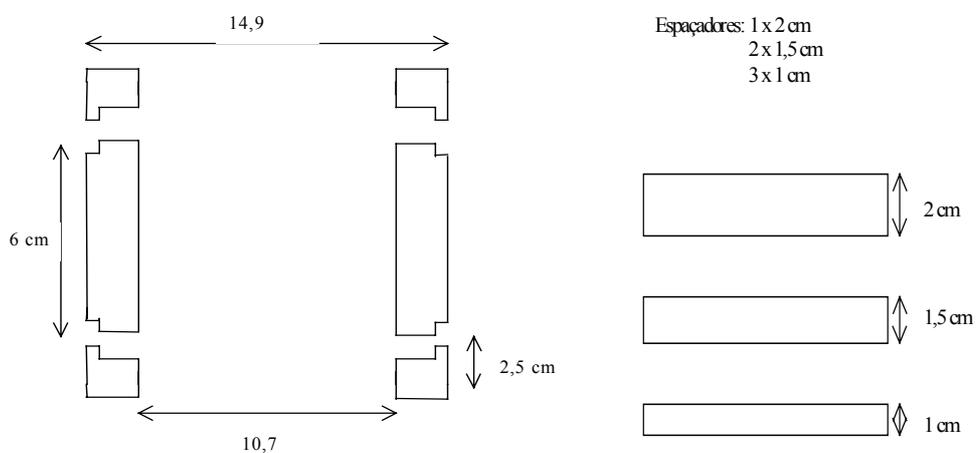


Figura 14 - Esquema do molde de compactação

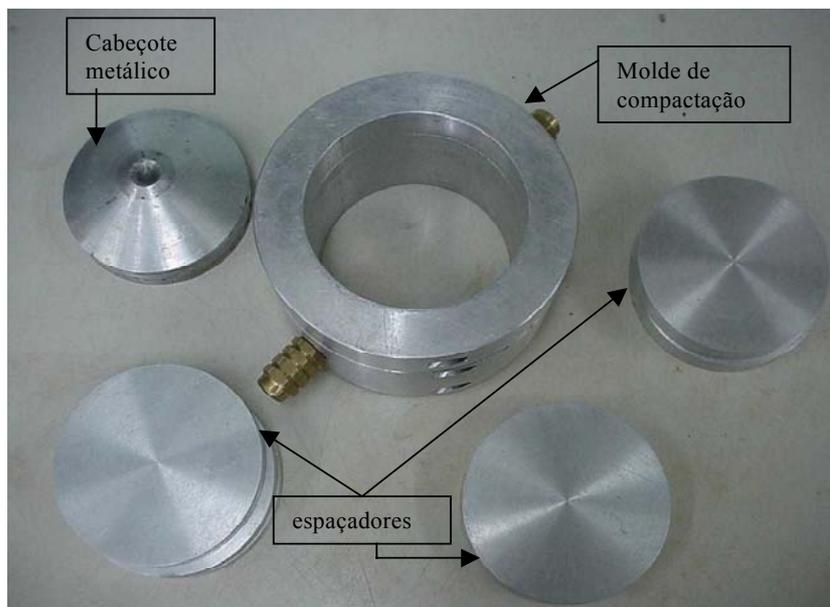


Figura 15 – Foto do Molde

Para a compactação da camada inferior e superior, fez-se necessário o auxílio do colarinho, mostrado na Figura 15, possibilitando assim a sobra de um pouco de material sobre os limites do molde, propiciando-se assim, um acabamento nas partes externas do corpo de prova.

Utilizou-se uma prensa de adensamento, modelo Bishop para se fazer a compactação das camadas (Figura 16). Utilizou-se também o cabeçote metálico mostrado na Figura 15 para se aplicar de forma uniforme a mesma força em toda a área da amostra. Uma peça de acrílico com área exatamente igual a do corpo de prova era utilizada para se obter uma superfície plana e horizontal, pressionando-a levemente contra o material, permitindo-se a distribuição uniforme da força de compactação.



(a)



(b)

Figura 16 –Fotografias da Prensa de adensamento Modelo Bishop utilizadas: (a) vista frontal e (b) vista lateral.

Sabendo-se o volume do molde, a umidade natural e o peso específico natural do solo, calculou-se a quantidade de material necessário para a confecção do corpo de prova.

Visava-se trabalhar com corpos de prova que tivessem valores médios dos parâmetros encontrados no campo. Para o solo do Campo Experimental II,

considerou-se como peso específico natural médio deste material de 17kN/m^3 , o peso específico seco de 14kN/m^3 e a umidade de 22%. Para o solo da Cidade dos Meninos, considerou-se o peso específico natural médio de $19,5\text{kN/m}^3$, 19%, $16,5\text{kN/m}^3$. Procurou-se analisar qual a energia de compactação que resultaria nestes valores médios.

Para esta análise inicialmente adicionou-se 200mL de água a um 1kg de solo do Campo Experimental seco ao ar. Então para uma mesma quantidade de água adicionada ao solo variou-se os níveis de pressão aplicados: 123,15kPa, 246,31kPa, 369,46kPa, 492,61kPa, 615,76kPa, 738,92kPa e 862,07kPa. A Tabela 13 mostra esses resultados. Foram feitas outras compactações alterando-se somente a quantidade de água acrescentada ao solo seco ao ar. Para a nova análise adicionou-se 240mL de água a 1kg de solo seco ao ar. Estes resultados também estão relacionados na Tabela 13. A Figura 17 mostra os resultados da Tabela 13, levando-se em conta a variação do peso específico seco e total com a pressão de compactação.

Tabela 13 – Variações de peso específico e umidade com a pressão de compactação

Pressão (kPa)	Acréscimo de 200 mL ao solo seco ao ar			Acréscimo de 240 mL ao solo seco ao ar		
	γ_{nat} (kN/m^3)	w (%)	γ_{d} (kN/m^3)	γ_{nat} (kN/m^3)	w (%)	γ_{d} (kN/m^3)
123,15	13,60	20,58	11,28	15,97	25,45	12,73
246,30	15,03	20,40	12,48	18,18	25,49	14,49
369,45	16,15	20,65	13,39	18,96	25,85	15,07
494,61	16,59	21,02	13,71	19,62	25,02	15,69
615,76	17,80	21,60	14,64	19,68	25,90	15,63
738,92	17,17	20,92	14,20	19,91	25,01	15,92
862,07	18,66	21,11	15,41	20,20	25,61	16,08

Para finalmente se chegar aos valores médios de campo executou-se a curva de compactação para a pressão de 500kPa, tanto para o solo do Campo Experimental, como para o solo da Cidade dos Meninos, conforme ilustra a Figura 18.

Através da curva de compactação do solo do Campo Experimental obteve-se os valores médios de $14,5\text{kN/m}^3$ para peso específico seco e 22% de umidade. A umidade ótima para este nível de pressão de compactação é de $25,5\%$ e o peso específico seco máximo é de $15,6\text{kN/m}^3$.

De acordo com a Figura 18, a curva de compactação do solo da Cidade dos Meninos apresentou os valores de $16,5\text{kN/m}^3$ para peso específico seco e 18% de umidade. A umidade ótima para este nível de pressão de compactação é de $18,8\%$ e o peso específico seco máximo é de $17,17\text{kN/m}^3$.

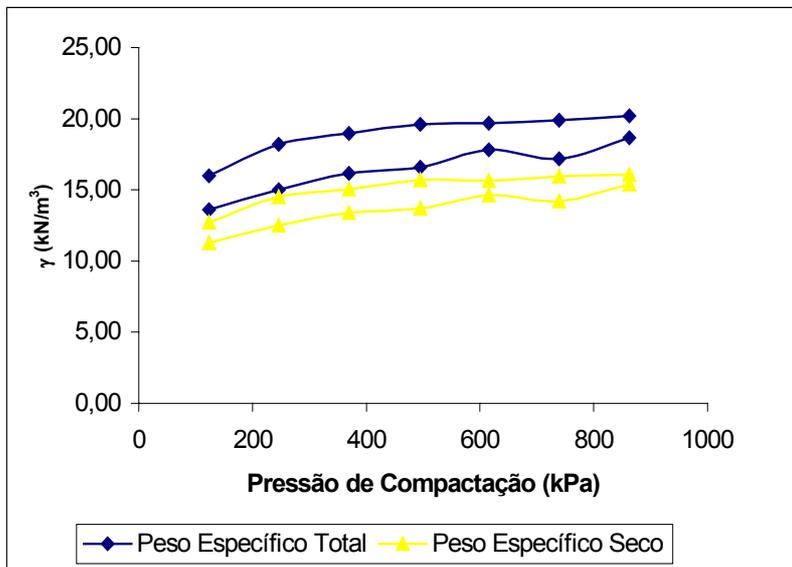
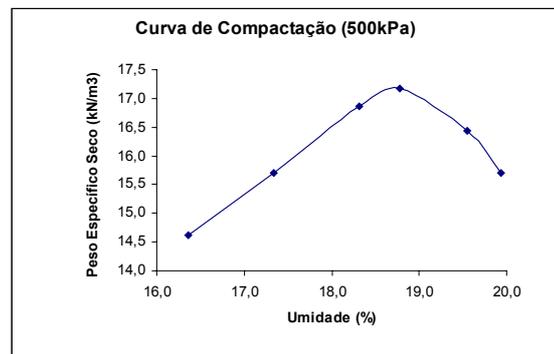
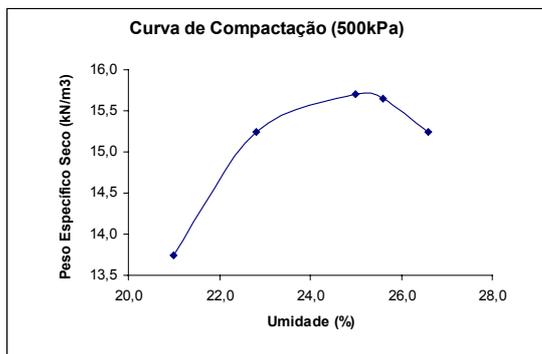


Figura 17 – Variação dos pesos específicos segundo pressão de compactação.



(a) Solo do Campo Experimental (b) Solo da Cidade dos Meninos
 Figura 18 – Curvas de Compactação Estática para um pressão de 500 kPa: (a) solo do Campo Experimental e (b) solo da Cidade dos Meninos.

Utilizando-se dos resultados obtidos acima executou-se a confecção de todos os corpos adicionando-se 210mL a 1kg de solo seco e 170mL a 1kg de solo seco, para os solos do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos, respectivamente, compactando-os com uma pressão de 500 kPa em seis camadas, com um tempo de aplicação de dez minutos para cada camada, conforme descrito no item 5.2.1.