

5 Investigação Experimental: Caracterização dos Solos

5.1. Amostras Utilizadas e Programa de Ensaios

O programa de ensaios geotécnicos foi conduzido no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME, situado no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. Este laboratório pertence ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. O LACTEC possui um sistema da qualidade implantado e a certificação ISO 9002/94. A ampla maioria dos equipamentos e instrumentos utilizados tem certificados de calibração e as instalações do laboratório possuem sistemas de controle de temperatura e umidade.

A caracterização das amostras foi conduzida simultaneamente e forneceu dados à dissertação de mestrado de Elisangela Oliveira (Oliveira, 2006) e à tese de doutorado da Laryssa Ligocki (Ligocki, 2008), além do presente trabalho.

A investigação experimental neste estudo foi dirigida com o objetivo de analisar o comportamento de resistência e deformabilidade e características de retenção de um solo residual em condições não saturadas.

O perfil do terreno apresentado no Capítulo 4 foi subdividido em 5 diferentes categorias de acordo com a variabilidade de cor, resistência e textura das amostras retiradas para facilitar a posterior descrição das características do solo residual ao longo da profundidade. Na Figura 5.1 são apresentadas as variações de cores encontradas no talude e a sua separação nos grupos Branco, Amarelo, Laranja e Vermelho. A categoria de solo mais intemperizada, não apresentada na figura, encontrada nos primeiros dois metros do perfil, foi chamada de Marrom (Figura 5.2). Não foram coletadas amostras do solo superficial, orgânico e com presença de raízes. A distribuição dessas categorias no talude não é horizontal. De acordo com as características das amostras coletadas elas encontram-se distribuídas no talude conforme mostrado na Figura 5.3.

As tabelas 5.1, a 5.5 resumem os ensaios realizados em cada material. O programa de ensaios do presente trabalho contemplou determinação da curva característica com papel filtro, ensaios de caracterização, compressão diametral

(tração), compressão simples, adensamento inundado e não saturado, triaxiais saturados e não saturados. Completa a lista de ensaios a caracterização física e química, incluindo microscopia ótica, petrografia, difratometria de raios X, matéria orgânica, análise química total e parcial e porosimetria de mercúrio, e os ensaios de cisalhamento direto realizados por Oliveira (2006). Nas tabelas, as amostras chamadas de “talude” referem-se a anéis, principalmente para o ensaio de tração, moldados diretamente do talude, durante a campanha de coleta de amostras. Nos demais casos as amostras ensaiadas advieram de blocos / cilindros indeformados retirados de diferentes pontos da encosta.

Nos itens seguintes são apresentados e discutidos os ensaios de caracterização física, química, mineralógica e microestrutural. As propriedades hidráulicas, de compressibilidade, mecânicas não saturadas e o comportamento do solo sob estado de tensões triaxiais são apresentadas nos Capítulos 7, 8, 9 e 10 respectivamente.



Figura 5.1 – Variação de cores das amostras coletadas.



Figura 5.2 – Solo Marrom.

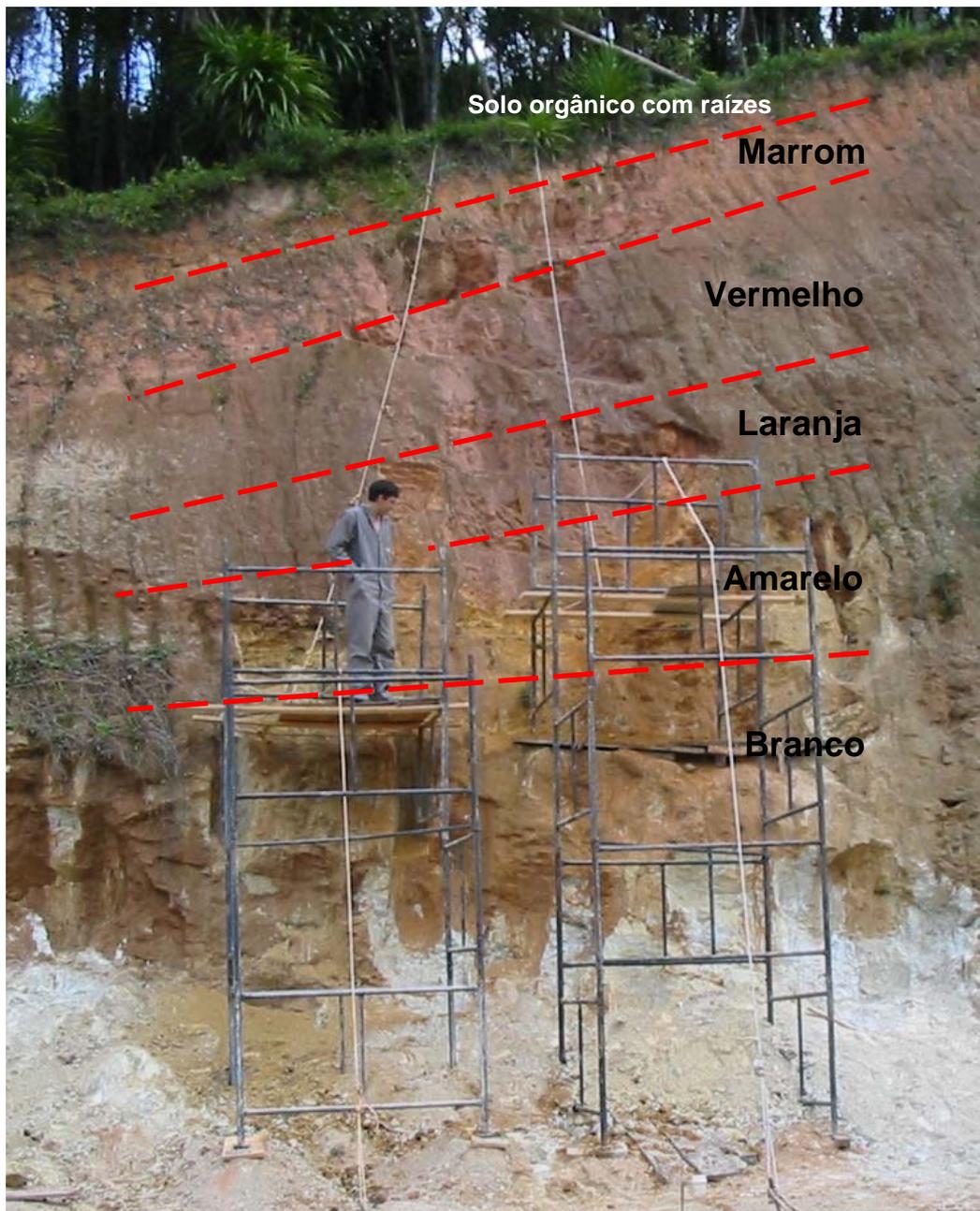


Figura 5.3 – Vista geral do talude e da divisão de camadas.

Tabela 5.1 – Ensaios realizados para o Solo Branco.

Amostra	Curva Granulom.	LL, LP e LC	Porosimetria mercúrio	Análise Química	Matéria Orgânica	Difratometria de Raios X	Microscopia ótica	Cisalhamento Direto	Resistividade	Tração	Compressão Simples	Adensamento
2.4001.05										Sim		
2.4002.05	Sim											
2.4006.05	Sim	Sim								Sim		
2.4011.05	Sim											
2.4013.05												
2.4015.05										Sim		
2.4016.05	Sim											
2.4019.05							Sim				Sim	
2.4026.05												
2.4028.05											Sim	
2.4030.05	Sim	Sim								Sim		
2.4033.05	Sim	Sim								Sim		
2.4035.05										Sim		
2.4036.05											Sim	
2.4037.05								Sim				
2.4038.05							Sim	Sim				
2.4039.05											Sim	
2.4041.05											Sim	
2.4055.05	Sim											
2.4056.07	Sim	Sim								Sim	Sim	
2.4059.05											Sim	
2.4062.05											Sim	
2.4064.05											Sim	
2.4068.05											Sim	
2.4071.05											Sim	Sim
2.4079.05											Sim	
2.4080.05											Sim	
2.4081.05											Sim	
2.4088.05								Sim			Sim	

Continuação

Amostra	Curva Granulom.	LL, LP e LC	Porosimetria mercúrio	Análise Química	Matéria Orgânica	Difratometria de Raios X	Microscopia ótica	Cisalhamento Direto	Resistividade	Tração	Compressão Simples	Adensamento
2.4098.05											Sim	
2.4250.05											Sim	
2.4338.05			Sim									
2.4341.05											Sim	
2.4418.05											Sim	
2.4448.05											Sim	
2.4449.05											Sim	
2.4450.05											Sim	
2.4457.06											Sim	
2.4458.05											Sim	
2.4459.05											Sim	
2.4461.05											Sim	
2.4463.05											Sim	
2.4520.05	Sim			Sim	Sim							
2.4524.05	Sim			Sim	Sim	Sim						
2.4525.05	Sim	Sim		Sim	Sim					Sim		
Talude												
2.4332.05									Sim			
2.4244.05									Sim			
2.4328.05									Sim			
2.4252.05									Sim			
2.4333.05									Sim			
2.4248.06									Sim			
2.4314.05									Sim			
2.4324.05									Sim			
2.4323.05									Sim			
2.4308.05									Sim			
2.4126.05									Sim			
2.4254.05									Sim			Sim

Continuação.

Amostra	Curva Granulom.	LL, LP e LC	Porosimetria mercúrio	Análise Química	Matéria Orgânica	Difratometria de Raios X	Microscopia ótica	Cisalhamento Direto	Resistividade	Tração	Compressão Simples	Adensamento
2.4342.05												
2.4343.05			Sim			Sim						
2.4344.05											Sim	
2.4345.05											Sim	
2.4422.05											Sim	
2.4424.05											Sim	
2.4481.05										Sim		
2.4521.05	Sim	Sim		Sim	Sim		Sim					
2.4526.05	Sim	Sim		Sim	Sim							
2.4527.05	Sim	Sim		Sim	Sim	Sim						
2.4375.05									Sim			
2.4376.05									Sim			
2.4372.05									Sim			
2.4374.05									Sim			
2.4373.05									Sim			
2.4217.05									Sim			
2.4379.05									Sim			
2.4392.05									Sim			
2.4393.05									Sim			

Continuação.

Amostra	Curva Granulom.	LL, LP e LC	Porosimetria mercúrio	Análise Química	Matéria Orgânica	Difratometria de Raios X	Microscopia ótica	Cisalhamento Direto	Resistividade	Tração	Compressão Simples	Adensamento
2.4276.05											Sim	
2.4277.05											Sim	
2.4278.05											Sim	
2.4280.05											Sim	
2.4281.05											Sim	
2.4288.05											Sim	
2.4349.05										Sim		
2.4425.05											Sim	
2.4225.05									Sim			
2.4228.05									Sim			
2.4228.05									Sim			
2.4285.05									Sim			
2.4351.05									Sim			
2.4398.05									Sim			

* Amostras amarelo escuro

Tabela 5.4 – Ensaio realizados para o Solo Vermelho.

Amostra	Curva Granulom.	LL, LP e LC	Porosimetria mercúrio	Análise Química	Matéria Orgânica	Difratometria de Raios X	Microscopia ótica	Cisalhamento Direto	Resistividade	Tração	Compressão Simples	Adensamento
2.4047.07	Sim	Sim							Sim	Sim	Sim	Sim
2.4114.05											Sim	
2.4232.05											Sim	
2.4233.05								Sim				
2.4234.05								Sim				
2.4235.05											Sim	
2.4237.05	Sim	Sim								Sim	Sim	
2.4239.05	Sim	Sim								Sim	Sim	
2.4241.05	Sim		Sim					Sim				
2.4353.05	Sim											
2.4355.05	Sim	Sim								Sim		
2.4358.05										Sim		
2.4400.05	Sim							Sim				
2.4503.05											Sim	
2.4504.05											Sim	
2.4517.05												
2.4522.05	Sim	Sim		Sim	Sim							
2.4523.05	Sim	Sim		Sim	Sim	Sim						
2.4441.05									Sim			
2.4041.05												Sim
2.4431.05									Sim			
2.4047.07									Sim			
2.4433.05									Sim			

5.2. Caracterização Física, Química, Mineralógica e Microestrutural

5.2.1. Caracterização e Índices Físicos

Os ensaios de caracterização foram realizados sobre amostras deformadas representativas coletadas ao longo da altura do talude (Figura 5.4) e em material proveniente dos corpos de prova utilizados em ensaios de determinação de sucção, compressão simples, compressão diametral, adensamento e triaxiais. Os ensaios de caracterização seguiram os procedimentos descritos pelas normas brasileiras a seguir relacionadas:

- O peso específico real dos grãos foi determinado utilizando as normas ABNT: NBR 6508 (ABNT, 1984) e DNER-ME 093/94 (DNER, 1994);
- O limite de liquidez foi determinado segundo a norma ABNT: NBR 6459 (ABNT, 1984);
- O limite de plasticidade foi determinado segundo a norma ABNT: NBR 7180 (ABNT, 1984);
- A análise granulométrica foi realizada segundo os procedimentos da norma ABNT: NBR 7181 (ABNT, 1984);
- A determinação do peso específico seco máximo e teor de umidade ótima foram realizados segundo norma de compactação da ABNT: NBR 7182 (ABNT, 1986).

As determinações de peso específico real dos grãos foram realizadas primordialmente de acordo com a ABNT (1984), mas no caso em que havia pouco material, principalmente das amostras provenientes dos ensaios de sucção, adensamento e triaxial, esse parâmetro foi determinado utilizando-se o procedimento do DNER (1994). Deve-se levar em consideração na análise dos resultados que o solo ensaiado provém de peneiras distintas: 4,8 mm no caso da ABNT e 2,0 mm no caso do DNER.

Para facilitar a análise, os resultados dos ensaios de caracterização das amostras são apresentados nas Tabelas 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10. Os valores em vermelho nas tabelas representam valores médios e não valores determinados em ensaios.

Na Figura 5.5 são apresentadas as curvas granulométricas das amostras deformadas.

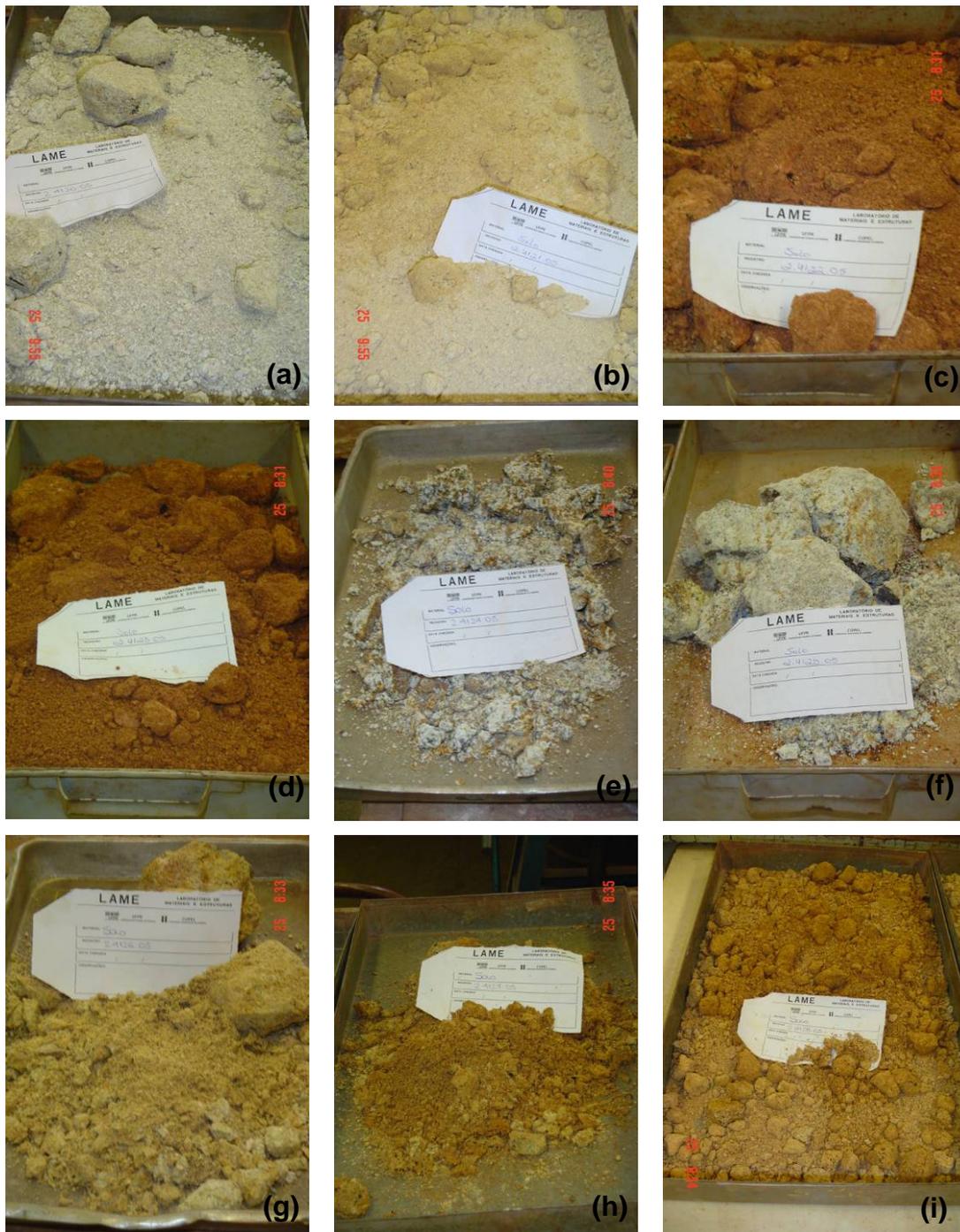


Figura 5.4 – Amostras deformadas coletadas no talude. (a) 2.4520.05 Branco. (b) 2.4521.05 Amarelo. (c) 2.4522.05 Vermelho. (d) 2.4523.05 Vermelho. (e) 2.4524.05 Branco. (f) 2.4525.05 Branco. (g) 2.4526.05 Amarelo. (h) 2.4527.05 Amarelo. (i) 2.4528.05 Laranja.

Tabela 5.6 – Resultados dos Ensaios de Caracterização do Solo Marrom.

Cor	Amostra	Profundidade (m)	Umidade e Natural (%)	Massa Específica			Peso Específico		Limites de Atterberg		IP	Índice de atividade de Skempton	Índice de vazios	Grau de Saturação (S %)	Fração (%)			
				Real dos grãos (g/cm ³)		Seco (kN/m ³)	Natural (kN/m ³)	LL	LP	Pedregulho					Areia	Silte	Argila	
				DNER (g/cm ³)	ABNT (g/cm ³)													
	2.4101.05	1,5	26,7	2,690	2,701			41	26	15	1,25			0	34	54	12	
	2.4102.05	1,3	26,7	2,690	2,733			42	29	13	0,57			0	38	39	23	
	2.4115.05	1,1	24,3	2,714	2,706	19,97	16,07	46	30	16	0,70	0,65	98,71	1	33	43	23	
	2.4118.05	1,6	17,1	2,692	2,701	16,61	14,18	37	33	4	0,16	0,87	52,20	0	35	40	25	
	2.4105.05	1,5	21,9	2,676	2,701	14,45	11,85	47	32	14	0,61	1,23	47,09	1	33	43	23	
	2.4117.05	1,5	31,4	2,690	2,701	18,11	13,78	38	26	12	0,52	0,92	90,20	0	38	39	23	
	2.4117.05	1,5	24,6	2,690	2,701	16,13	12,94					1,05	62,26					
	2.4106.05	1,6	23,6	2,690	2,701	14,77	11,95					1,22	51,36					
	2.4354.05	1,3	23,1	2,690	2,701	17,58	14,28					0,86	71,59					
Marrom	2.4110.05	1,7	26,3	2,690	2,701	18,29	14,48					0,83	83,97					
	2.4116.05	1,5	24,8	2,690	2,701	18,77	15,04					0,76	86,30					
	2.4109.05	1,7	15,1	2,690	2,701	14,31	12,43					1,13	35,36					
	2.4498.05	2,0	25,4	2,690	2,694	18,54	14,79	59	39	19,5	0,87	0,79	85,25	0	38	39	23	
	2.4498.05	2,0	21	2,690	2,694	18,36	15,18	59	39	19,5	0,87	0,74	74,87	0	38	39	23	
	2.4240.05	2,2	22,7	2,690	2,701	18,80	15,32					0,73	82,45					
	2.4240.05	2,2	22,7	2,690	2,701	19,69	16,05					0,65	92,38					
	2.4240.05	2,2	22,7	2,690	2,701	18,50	15,08					0,76	79,45					
	2.4014.07	3,0	25,6	2,690	2,652	17,72	15,70	52	35	17	0,83	0,67	100,00	0,9	53,3	25,3	20,5	
	2.4021.07	3,0	26,5	2,690	2,658	18,11	14,32	52	30	22	0,67	0,83	83,40	0,4	40,9	25,7	33,0	
Média		1,7	23,7	2,690	2,701	17,69	14,32	47	32	15	0,71	0,86	75,18	0	38,0	39,0	23,0	
Desvio padrão			3,6	0	0	1,8	1,4	8,3	4,9	4,9	0,3	0,2	18,9	0,5	5,9	8,3	5,1	

Tabela 5.7 – Resultados dos Ensaios de Caracterização do Solo Vermelho.

Cor	Amostra	Profundidade (m)	Umidade Natural (%)	Massa Específica			Peso Específico		Limites de Atterberg		IP	Índice de atividade de Skempton	Índice de vazios	Grau de Saturação (S %)	Fração (%)		
				DNER (g/cm ³)	Real dos grãos (g/cm ³)	ABNT (g/cm ³)	Natural (kN/m ³)	Seco (kN/m ³)	LL	LP					Pedregulho	Areia	Argila
Vermelho	2.4523.05	2,0	28,6	2,733	2,659			44	36	8	1,60			1	48	46	5
	2.4523.05	2,5	28,6	2,789	2,790			46	33	13	1,18			0	37	52	11
	2.4523.05	2,8	28,6	2,735	2,725			44	35	9	1,11			0	39	52	9
	2.4523.05	2,0	24,2	2,738	2,725	17,52	14,11					0,90	72,09				
	2.4523.05	2,5	30,8	2,717	2,725	14,90	11,39	43	35	8	1,00	1,34	61,22	0	23	69	8
	2.4523.05	1,8	38,1	2,738	2,725	15,92	11,53					1,32	77,07				
	2.4523.05	2,0	26,8	2,738	2,725	14,54	11,47					1,34	53,71				
	2.4523.05	2,5	29,4	2,713	2,725	13,90	10,74	45	34	11	1,22	1,48	52,88	0	29	62	9
	2.4523.05	3,1	30,6	2,738	2,725	14,17	10,85	41	38	3		1,47	55,76				
	2.4523.05	3,2	29,7	2,738	2,725	14,83	11,44					1,34	59,25				
	2.4523.05	3,5	25,6	2,738	2,725	15,85	12,62					1,12	61,08				
	2.4523.05	2,2	27,4	2,738	2,725	14,98	11,76					1,28	57,41				
2.4523.05	2,2	28,4	2,738	2,725	15,01	11,69					1,29	58,89					
2.4523.05	2,5	23,2	2,738	2,725	15,21	12,34					1,17	53,08					
Média		2,5	28,6	2,738	2,725	15,17	11,81	44	35	9	1,22	1,28	60,22	0	35	56	8
Desvio padrão			3,5	0	0	1	0,9	1,8	1,7	3,4	0,2	0,2	7,8	0,4	9,6	9,2	2,2

Tabela 5.8 – Resultados dos Ensaios de Caracterização do Solo Laranja.

Cor	Amostra	Profundidade (m)	Umidade Natural (%)	Massa Específica			Peso Específico		Limites de Atterberg		Índice de atividade de Skempton	Índice de vazios	Grau de Saturação (S %)	Fração (%)			
				Real dos grãos (g/cm ³)	DNER (g/cm ³)	ABNT (g/cm ³)	Natural (kN/m ³)	Seco (kN/m ³)	LL	LP				Pedregulho	Areia	Silte	Argila
	2.4528.05	6,8	32,2	2,793	2,791				37	np	np			2,0	49	41	8
	2.4043.05	7,3	32,2	2,74	2,782												
	2.4017.05	6,9	36,6	2,747	2,787	15,53	11,37					1,39	71,57	0	58	35	7
	2.4069.05	6,8	31,9	2,74	2,787	14,66	11,12					1,44	60,12	0	57	35	8
	2.4090.05*	6,7	30,3	2,736	2,787	13,97	10,72		37	np	np	1,53	53,76	0	52	42	6
	2.4092.05*	6,8	26,9	2,74	2,787	13,42	10,58					1,56	46,64				
	2.4040.05	7,3	36,6	2,74	2,787	17,31	12,67		39	36	3	1,14	87,08	3,0	28	62	7
	2.4091.05*	6,7	35,6	2,74	2,787	15,14	11,16					1,43	67,56				
	2.4093.05*	6,8	31,6	2,699	2,787	18,10	13,75		39	29	10	0,96	88,90	1,4	49	43	7
	2.4094.05*	7,2	26,9	2,723	2,787	17,4	13,71		31	np	np	0,97	74,89				
Laranja	2.4345.05*	6,8	31,5	2,74	2,787	15,28	11,62					1,33	64,09				
	2.4005.05	6,8	31,6	2,74	2,787	14,26	10,84					1,50	57,07				
	2.4005.05	6,8	31,6	2,74	2,787	17,49	13,29					1,04	82,40				
	2.4018.05	7,0	36,0	2,74	2,787	16,17	11,89					1,28	76,21				
	2.4017.05	6,9	36,4	2,747	2,787	15,82	11,60					1,34	73,74				
	2.4095.05*	7,2	29,7	2,74	2,787	18,90	14,58					0,86	93,62				
	2.4069.05	6,8	31,9	2,74	2,787	14,67	11,12					1,44	60,13				
	2.4227.05	6,4	29,4	2,74	2,787	16,55	12,79					1,12	71,18				
	2.4018.05	7,0	36,0	2,74	2,787	17,24	12,67					1,14	85,68				
	2.4220.05	5,7	32,3	2,74	2,787	15,40	11,64					1,33	65,90				
Média		6,6	32,2	0	0	15,96	12,08	36	33	np	np	1,26	70,79	1,0	49	43	7
Desvio padrão			3,1	0	0	1,5	1,2	3,5	4,9	-	-	0,2	12,8	1,4	12,2	11,1	0,8

* Amostras amarelo escuro

Tabela 5.9 – Resultados dos Ensaios de Caracterização das Amostras Amarela.

Cor	Amostra	Profundidade (m)	Umidade Natural (%)	Massa Específica			Peso Específico		Limites de Atterberg		IP	Índice de atividade de Skempton	Índice de vazios	Grau de Saturação (S %)	Fração (%)		
				Real dos grãos (g/cm ³)	DNER (g/cm ³)	ABNT (g/cm ³)	Natural (kN/m ³)	Seco (kN/m ³)	LL	LP					Pedregulho	Areia	Silte
	2.4527.05	7,2	23,2	2,776	2,792			34	33	1	0,20			1	50	44	5
	2.4526.05	7,5	23,2	2,715	2,750			36	np	np	np			0	45	47	8
	2.4521.05	9,0	23,2	2,701	2,620			32	27	5	2,50			2	56	40	2
	2.4072.05	8,7	18,9	2,700	2,711			36	34	2	0,29			0	59	34	7
	2.4049.05	9,2	23,2	2,726	2,682			35	30	5	1,00			0	48	47	5
	2.4077.05	6,9	23,2	2,753	2,711			35	30	5	0,71			0	51	42	7
	2.4097.05	7,0	29,8	2,738	2,711			35	30	5	0,71			0	51	42	7
	2.4021.05	8,9	20,2	2,677	2,711		18,86	36	33	3	0,43	0,68	77,99	2	54	37	7
Amarelo	2.4025.05	9,1	20,9	2,726	2,711		20,87					0,55	102,23				
	2.4075.05	8,8	23,8	2,726	2,711		16,69					0,98	64,91				
	2.4078.05	7,0	23,9	2,726	2,711		17,12					0,93	68,56				
	2.4342.05	6,4	15,0	2,726	2,711		18,31					0,68	59,23				
	2.4211.05	7,5	29,1	2,726	2,711		18,06					0,91	85,62				
	2.4343.05	6,9	24,6	2,726	2,711		17,28					0,92	71,04				
	2.4021.05	8,9	17,3	2,726	2,711		16,51					0,89	51,57				
	2.4343.05	6,9	24,6	2,726	2,711		17,32					0,92	71,46				
	2.4100.05	6,9	30,0	2,726	2,711		16,83					1,06	75,47				
	Média		7,8	23,3	2,725	2,711		17,785	35	30	4	0,83	0,85	72,81	1	52	42
Desvio padrão			4,1	0	0		1,3	1,4	3,9	1,7	0,8	0,2	14,1	0,9	4,5	4,6	1,9

Tabela 5.10 – Resultados dos Ensaios de Caracterização das Amostras Branca.

Cor	Amostra	Profundidade (m)	Umidade Natural (%)	Massa Específica		Peso Específico		Limites de Atterberg		Índice de atividade de Skempton	Índice de vazios	Grau de Saturação (S %)	Fração (%)				
				Real dos grãos (g/cm ³)	DNER (g/cm ³)	Natural (kN/m ³)	Seco (kN/m ³)	LL	LP				Pedregulho	Areia	Silte Argila		
Branco	2.4525.05	9,5			2,647	2,674			34	27	7		1	47	44	8	
	2.4520.05	10,0			2,736	2,637			31	np	np		2	58	40	0	
	2.4524.05	11,0			2,714	2,685			26	np	np		8	77	15	0	
	2.4002.05	8,9			2,693	2,685							5	53	36	6	
	2.4011.05	11,1			2,714	2,744							1	51	43	5	
	2.4016.05	11,1			2,735	2,685							1	64	28	7	
	2.4055.05	11,2			2,714	2,685							1	53	40	6	
	2.4006.05	11,0	14,4		2,713	2,685	18,80	16,44	34	30	4	0,57	62,42	1	60	32	7
	2.4030.05	11,1	20,9		2,737	2,685	18,94	15,67	33	29	4	0,57	79,70	1	60	32	7
	2.4033.05	10,9	13,1		2,738	2,685	22,12	19,56	31	22	9	1,29	96,80	2	61	30	7
	2.4038.05		14,5		2,714	2,685	20,34	17,76					0,49				
	2.4038.05		14,3		2,714	2,685	18,68	16,34					0,62				
	2.4088.05		18,5		2,714	2,685	20,64	17,42					0,52				
	2.4202.05		10,7		2,714	2,685	21,00	18,97					0,40				
2.4071.05		16,6		2,714	2,685	19,03	16,32					0,62					
2.4037.05		10,0		2,714	2,685	21,69	19,72					0,34					
2.4035.05	11,1	12,3		2,714	2,685	20,11	17,91					0,48					
		10,6	14,5		2,714	2,685	20,14	17,61	32	27	6		1	57	35	7	
			3,38		0,02	0,02	1,24	1,44	3,02	3,56	2,45		0,34	2,27	7,96	8,24	2,81

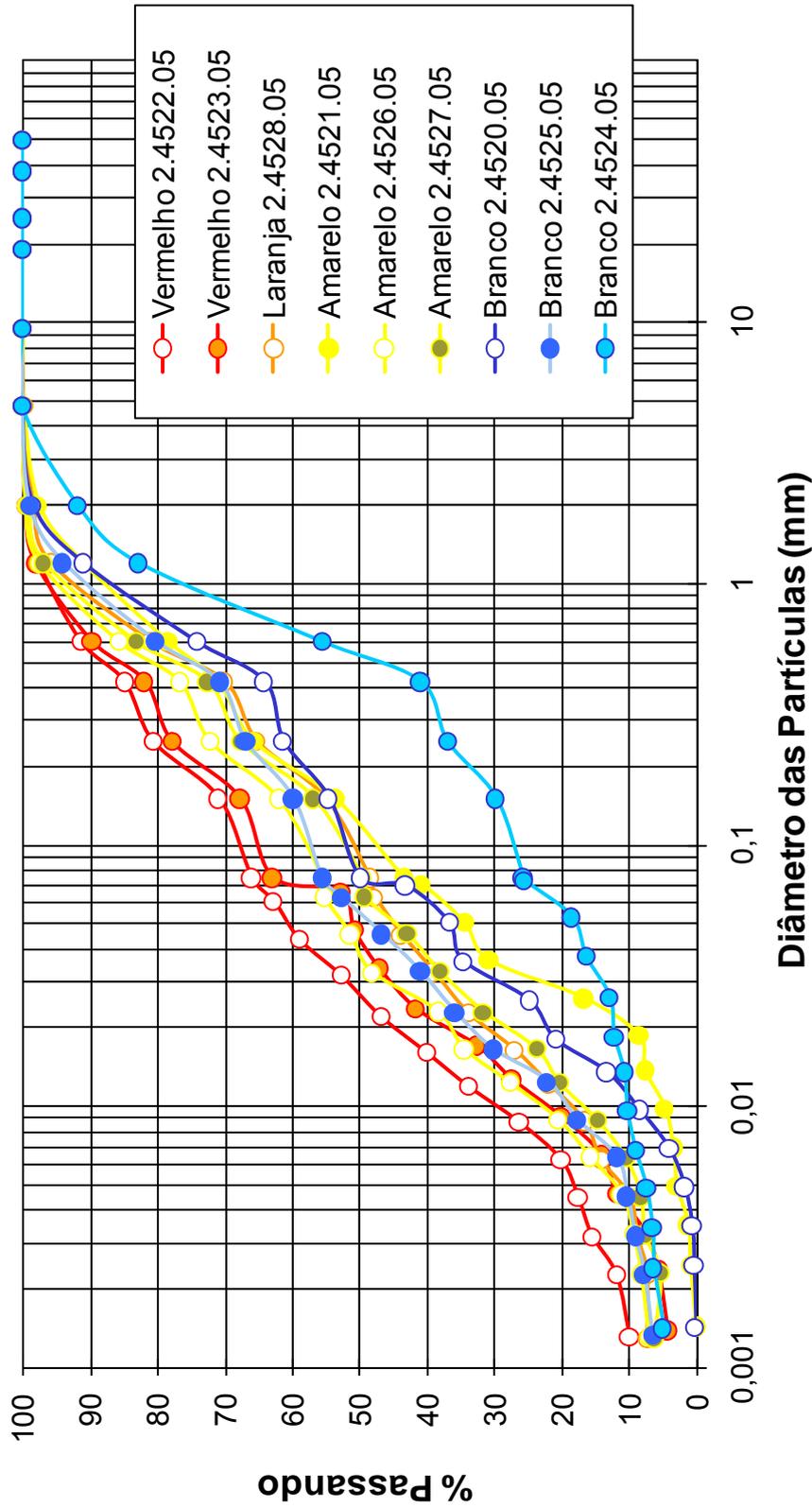


Figura 5.5 – Curvas granulométricas das amostras deformadas do talude.

Para o solo Marrom praticamente não há diferença entre a massa específica dos grãos determinada pelo método do DNER e pelo método da ABNT, em função do tamanho de partículas apresentado por esse solo. No entanto, há grande variação nos parâmetros plásticos do solo, sendo que o limite de liquidez apresenta na média o valor de 47, mas um desvio padrão de 8,3 e o limite de plasticidade apresenta o valor médio de 32 com um desvio padrão de 4,9. Essa variação provoca também uma grande dispersão no índice de atividade que tem em média o valor de 0,71, mas com dispersão de 0,3.

O solo Vermelho tem as características plásticas mais homogêneas, com desvio padrão inferior a 2. A massa específica para esse solo é igual a 2,738 quando determinada pelo método do DNER e 2,725 quando determinada pelo método da ABNT. Os valores são próximos e consistentes, uma vez que as partículas de tamanho menor, analisadas pelo DNER, normalmente apresentam massa específica maior. Nota-se maior dispersão neste solo nas quantidades de silte e areia, com 56% e 35%, respectivamente e um desvio padrão acima de 9.

O solo Laranja também apresenta grande dispersão nos teores de silte e areia. Esse solo apresenta 49% de areia na média com um desvio padrão de 12,2 e 43% de silte para um desvio padrão de 11,1. A maioria das amostras Laranja é não plástica. Apenas duas amostras têm limite de plasticidade. A amostra 2.4040.05 apresenta limite de plasticidade de 36%, mas é a única amostra que tem teor de areia inferior a 30%. Para a outra amostra 2.4093.05 que também apresentou limite de plasticidade não foi realizado ensaio de granulometria.

Os índices físicos do solo Amarelo apresentam baixo desvio padrão. Chama à atenção nesse solo a amostra 2.4521.05 que apresenta índice de atividade de 2,5, mas seu teor de argila é bastante baixo, apenas 2%.

O solo Branco tem os valores de limite de liquidez e de plasticidade bastante próximos e algumas amostras apresentam-se não plásticas. A maior variação neste solo está nos teores de areia e silte que apresentam desvio padrão em torno de oito. O solo Branco tem, em média, 58% de areia e 34% de silte em sua composição

Para melhor visualização e comparação dos resultados, os dados apresentados nas tabelas são reproduzidos nas figuras a seguir. Na Figura 5.6 é mostrada a variação dos teores de umidade natural, limite de liquidez e limite de plasticidade dos solos ao longo da profundidade do talude. A umidade natural é representada por um traço, o limite de liquidez é representado por um quadrado e o limite de plasticidade por um "X". Em relação à plasticidade de solos

residuais, a variação dos limites de liquidez e de plasticidade está relacionada à fração fina do solo residual e sua mineralogia. Em rochas ácidas, como os granitos e os gnaisses, o solo residual jovem tende a ser não plástico (Souza Neto *et al.*, 2001). No topo do talude o limite de liquidez situa-se em torno de 40% e está em torno de 30% na profundidade de 11 metros. O limite de plasticidade apresenta o valor em torno de 30% para o solo Marrom e para o solo Branco aproxima-se de 20%. Algumas amostras dos solos Laranja, Amarelo e Branco são não plásticas. Observa-se que praticamente todas as amostras coletadas apresentam-se com teores de umidade abaixo do limite de plasticidade do solo.

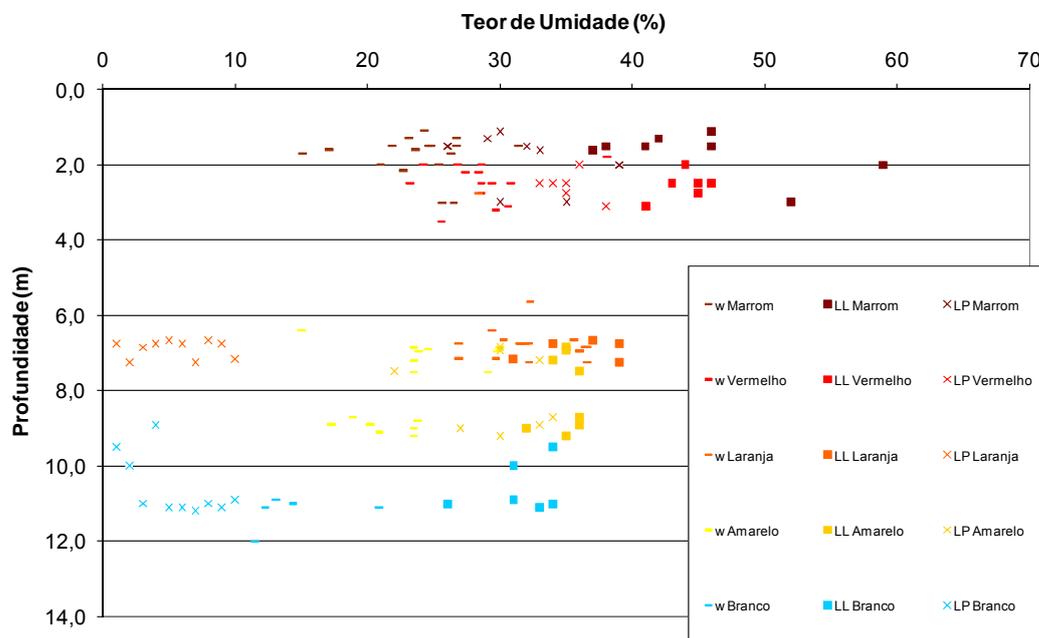


Figura 5.6 – Variação do teor de umidade natural, limite de liquidez e limite de plasticidade ao longo da profundidade do talude.

A Figura 5.7 e a Figura 5.8 apresentam a variação da massa específica natural e da massa real dos grãos dos solos ao longo do talude. De modo geral o solo Branco apresenta uma massa natural mais elevada que os demais. Dentro das cinco categorias de solo há uma grande variação da massa específica natural. A massa real dos grãos apresenta menor variação, e o solo laranja apresenta valores um pouco superiores.

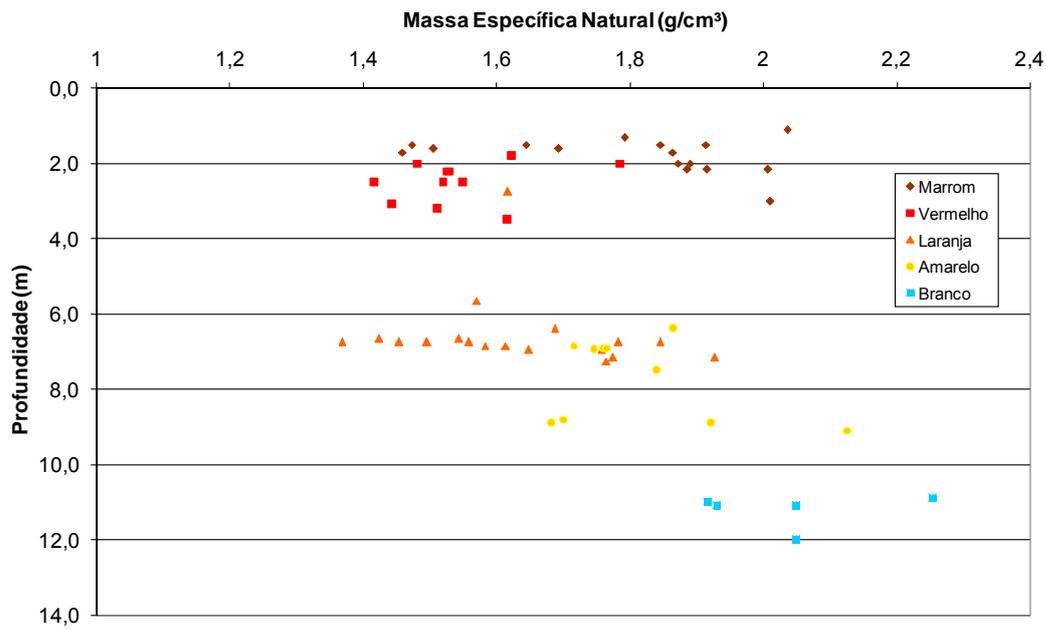


Figura 5.7 – Variação da Massa Específica Natural com a profundidade do talude.

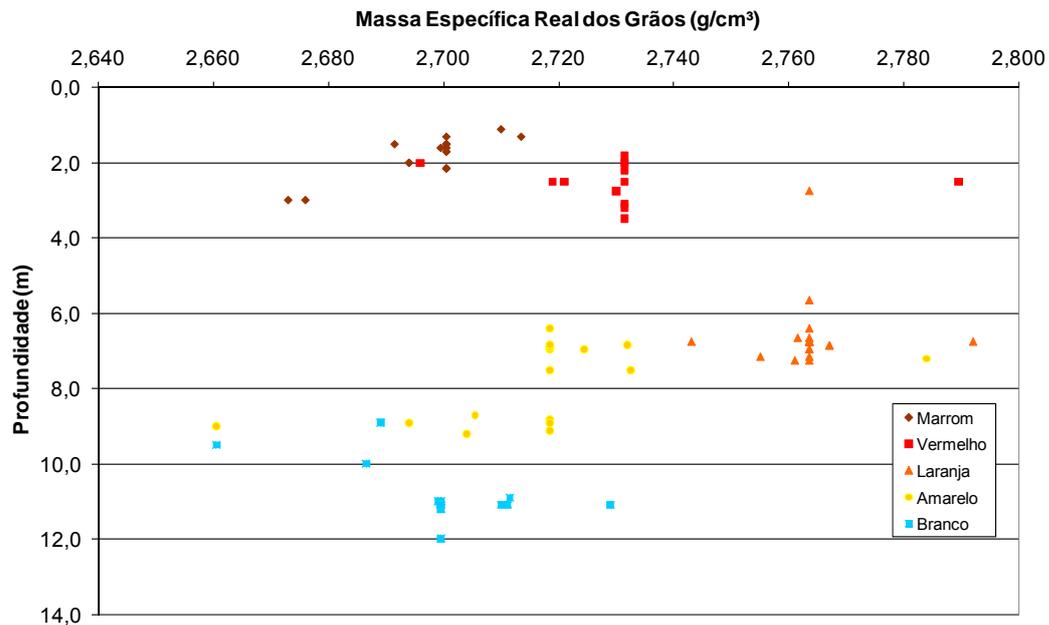


Figura 5.8 – Variação da Massa Específica Real dos Grãos com a profundidade do talude.

Entre as características dos solos residuais pode-se mencionar a presença de ligações entre grãos, elevados índices de vazios, uma extensa faixa de densidades, bem como estruturas abertas e permeáveis. No perfil, em geral, o

peso específico tende a aumentar com a profundidade e, conseqüentemente, o índice de vazios tende a diminuir.

No perfil estudado, o índice de vazios tem o menor valor na profundidade de 11 metros, solo Branco, em média 0,5. Esse parâmetro cresce com o decréscimo da profundidade, atingindo seu maior valor nos solos Laranja e Vermelho, próximo de 1,5. Para o solo próximo ao topo do talude o valor do índice de vazios volta a decrescer, atingindo valores até de 0,6 (Figura 5.9). O aumento do índice de vazios com o decréscimo da profundidade pode estar relacionado com a intemperização do material. Esse fato ocorre do material branco ao material de cor laranja. No material vermelho nota-se um pequeno decréscimo do índice de vazios, o que fica mais marcado no solo marrom. A deposição de óxidos, principalmente de ferro e alumínio pode ser responsável por esse decréscimo nos vazios dos solos (ver item 5.2.4).

Em relação à variação granulométrica ao longo do perfil, função da granulometria e mineralogia da rocha matriz, solos residuais provenientes de rochas ígneas e metamórficas tendem a apresentar maior quantidade de argila com a redução da profundidade (Souza Neto *et al.*, 2001). A Figura 5.10 apresenta as variações das frações pedregulho, areia, silte e argila com a profundidade. As frações pedregulho e areia diminuem à medida que diminui a profundidade, enquanto que as frações argila e silte aumentam. Rochas compostas por minerais ferromagnesianos (biotita, olivina, piroxênios) e feldspatos oferecem condições para o desenvolvimento de solos argilosos, enquanto que aquelas com significativa porcentagem de minerais ricos em sílica produzem solos de textura arenosa, que é o caso do perfil estudado. O solo Marrom, mais intemperizado, apresenta teor médio de argila de 23%.

Ao longo do talude estudado, a plasticidade mostra-se dependente do teor de argila e silte. Esse aspecto é ilustrado com os dados da Figura 5.11, que sugerem uma relação entre os limites de liquidez e plasticidade e a soma das porcentagens de argila e silte dos solos.

A distribuição do índice de atividade dos solos estudados é mostrada na Figura 5.12. Não é possível discernir uma tendência ao longo da profundidade, sendo a média dos solos igual a 0,87. Para valores de índice de atividade inferiores a 0,75 os solos são considerados inativos e acima de 1,25 de atividade alta. Apenas uma amostra do solo Vermelho e uma amostra do solo Amarelo encontram-se nessa classificação de alta atividade. Solos tropicais siltosos que contêm mica e/ou caulinita apresentam alguma plasticidade e devido ao baixo teor de argila apresentam elevado valor de índice de atividade (Futai, 2002). É o

que ocorre para as amostras com índice de atividade superior a 1,25. Ambas apresentam teor de argila muito pequeno (2% para o solo Amarelo e 5% para o solo Vermelho), então a fração argila não é preponderante e não deve influenciar o comportamento desses solos.

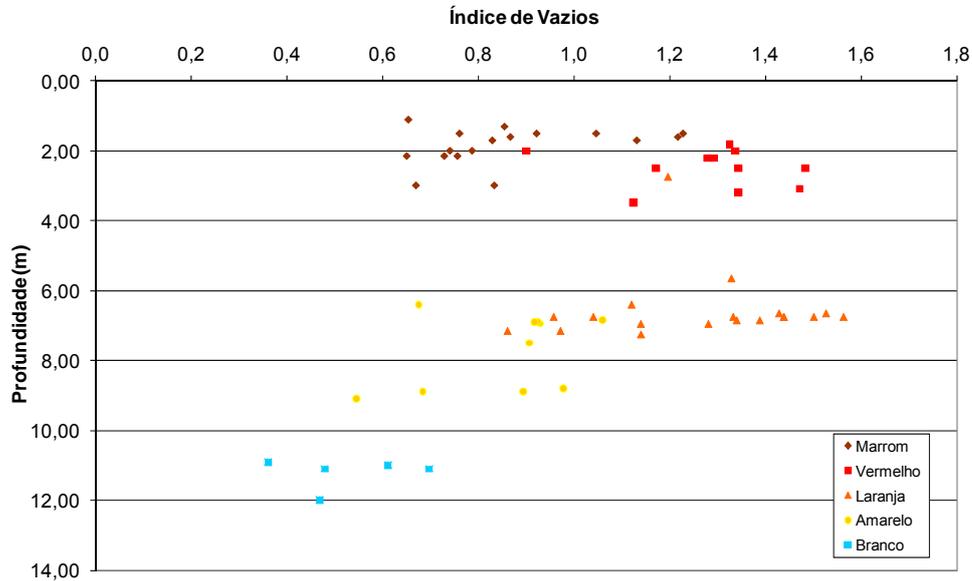


Figura 5.9 – Variação do Índice de Vazios com a profundidade do talude.

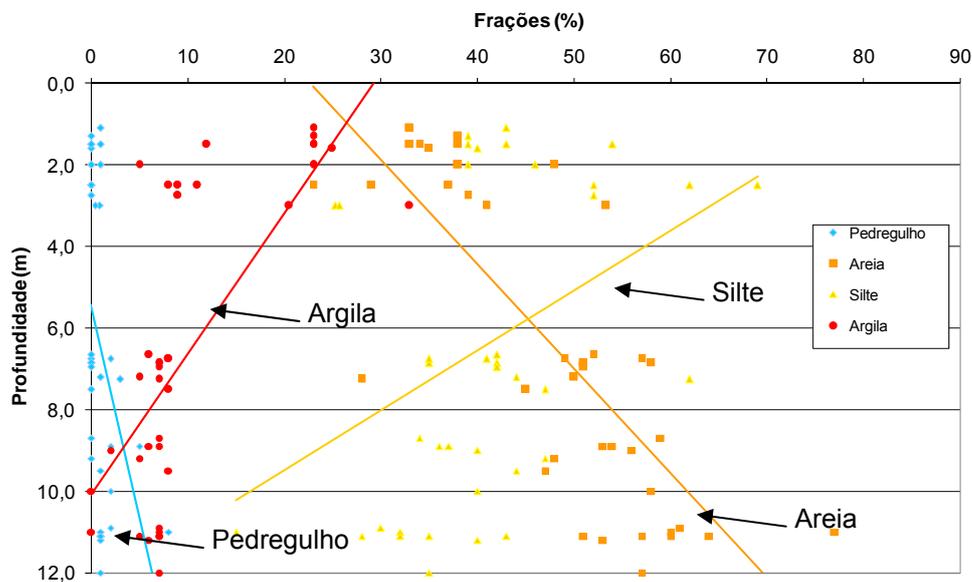


Figura 5.10 – Variação das frações pedregulho, areia, silte e argila com a profundidade do talude.

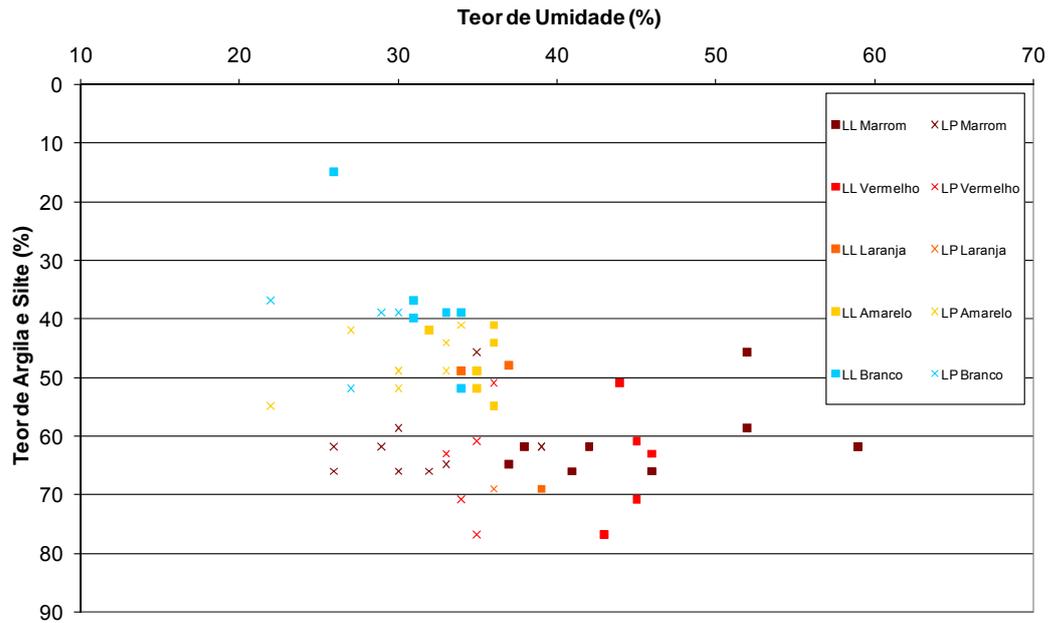


Figura 5.11 – Relação entre os teores de argila e silte e os limites de liquidez e plasticidade.

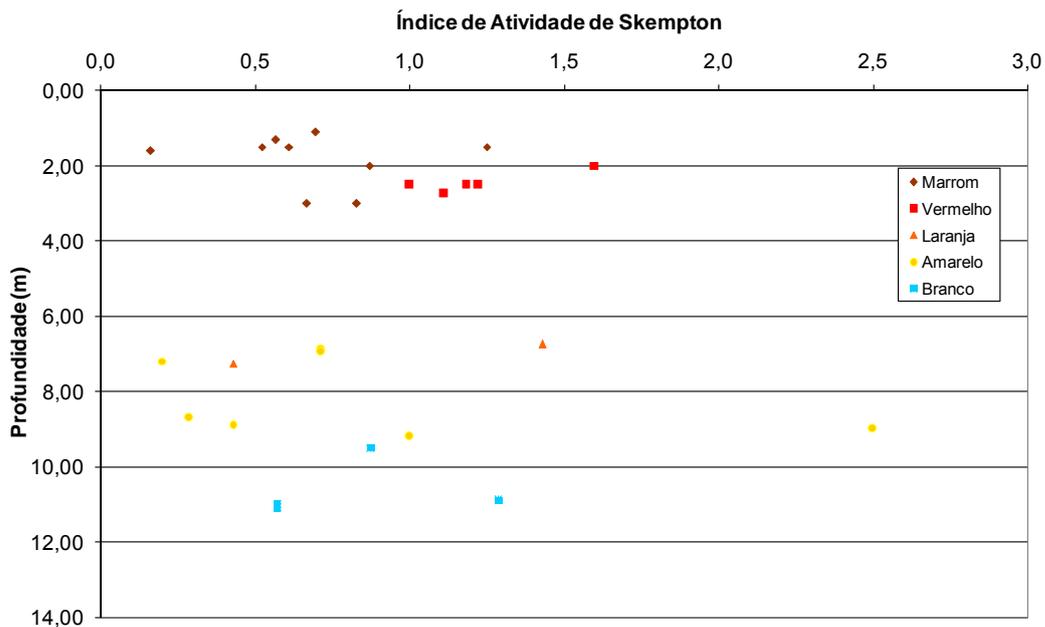


Figura 5.12 – Variação do índice de atividade de Skempton com a profundidade do talude.

A granulometria de solos residuais pode fornecer características do seu grau de intemperismo, quanto maior a quantidade de partículas finas mais intemperizado o solo se encontra. Nas figuras 5.13, 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam-se as curvas granulométricas dos solos de cor branca, amarela, laranja, vermelha e marrom.

Observa-se que o diâmetro efetivo para 50% das partículas menores que esse tamanho, ou d_{50} , para o solo Branco varia entre 0,055 mm e 0,5 mm. O d_{50} igual a 0,5 mm refere-se à amostra 2.4524.05, amostra que apresenta a maior coordenada x de retirada, ou seja, é a amostra coletada mais à direita do andaime no talude. Essa amostra era a mais próxima do ponto onde havia afloramentos de rocha. Desconsiderando essa amostra, o d_{50} para o solo Branco varia de 0,055 mm à 0,18 mm. As amostras de cor branca apresentam menos de 10% de argila.

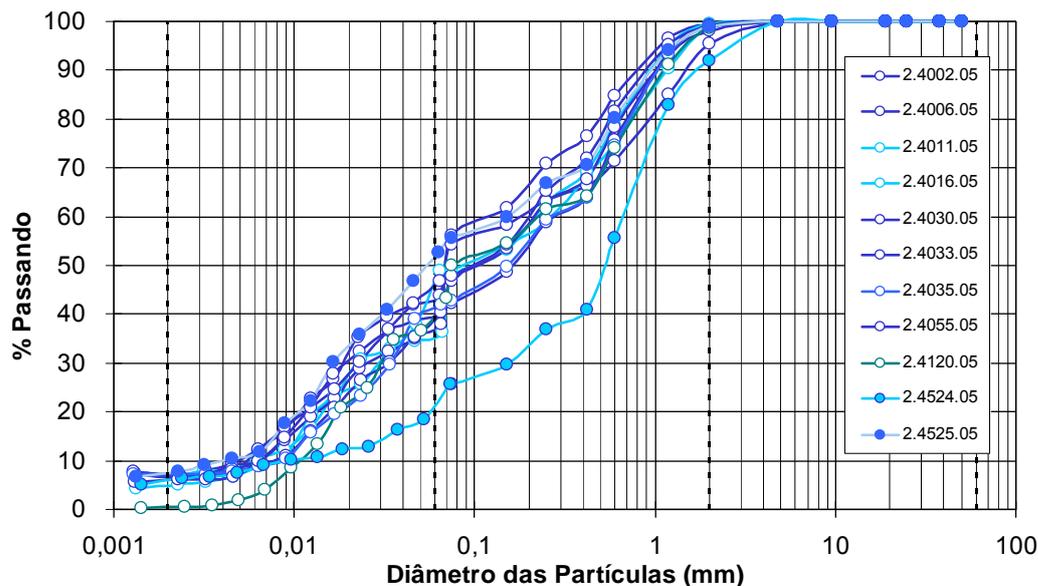


Figura 5.13 – Curvas granulométricas de solos brancos.

Conforme descrito no Capítulo 4 – Local do Estudo, o intemperismo no talude não ocorre apenas na direção vertical, mas também na direção horizontal. Os solos que se encontravam a direita do observador do talude mostravam-se menos intemperizados que os que se encontravam a esquerda do observador. Inclusive, ao lado direito era possível observar algumas rochas aflorantes. Na Figura 5.14 são apresentadas as localizações das amostras retiradas do solo de cor branca. Esta figura foi produzida a partir da sobreposição da localização de cada amostra em uma foto retirada do talude.

Conforme visualizado na figura, a amostra deformada 2.4524.05 foi retirada de um local bem mais à esquerda das amostras 2.4520.05 e 2.4525.05. Próximas à amostra 2.4524.05 estavam as amostras 2.4121.05 e 2.4123.05.

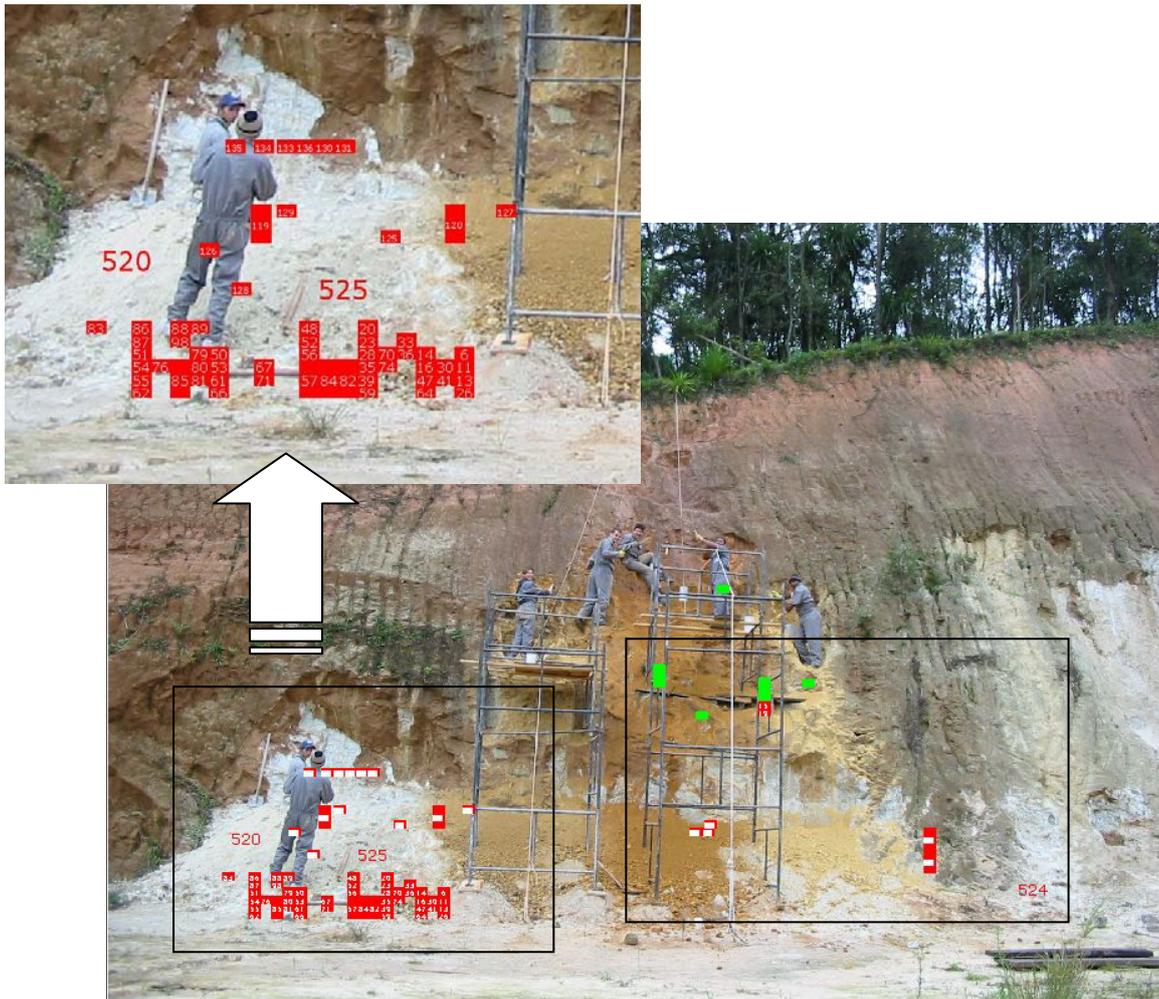
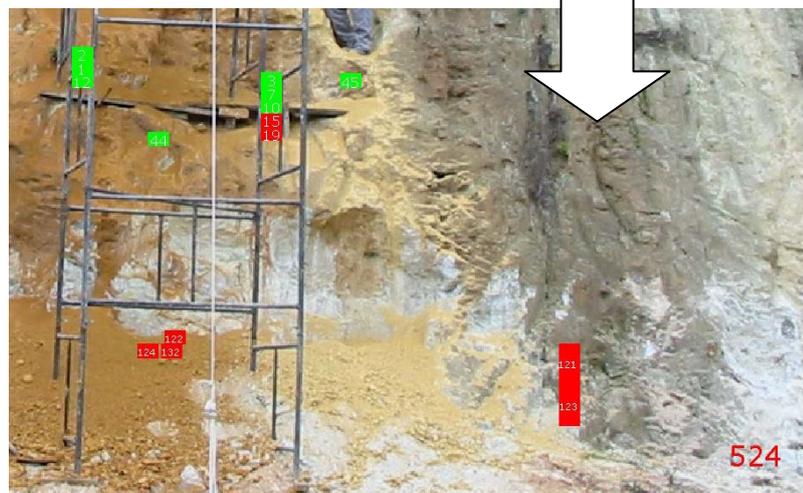


Figura 5.14 – Localização das amostras de cor branca (em vermelho) e transição branco – amarelo (em verde) na primeira coleta.



Na Figura 5.15 são mostradas curvas granulométricas de solos representativos da cor amarela. Este solo apresenta-se acima do solo branco no talude. A variação do diâmetro de partículas d_{50} para estes solos está entre 0,04 e 0,09 mm.

Curvas granulométricas de solos de cor laranja estão apresentadas na Figura 5.16. Os solos de cor laranja são bastante heterogêneos, a presença de veios pretos pode ser mais ou menos ocorrente, dependendo da amostra coletada. O diâmetro d_{50} varia entre 0,02 e 0,3 mm. Também nos solos amarelos e laranjas a quantidade de argila é inferior a 10%.

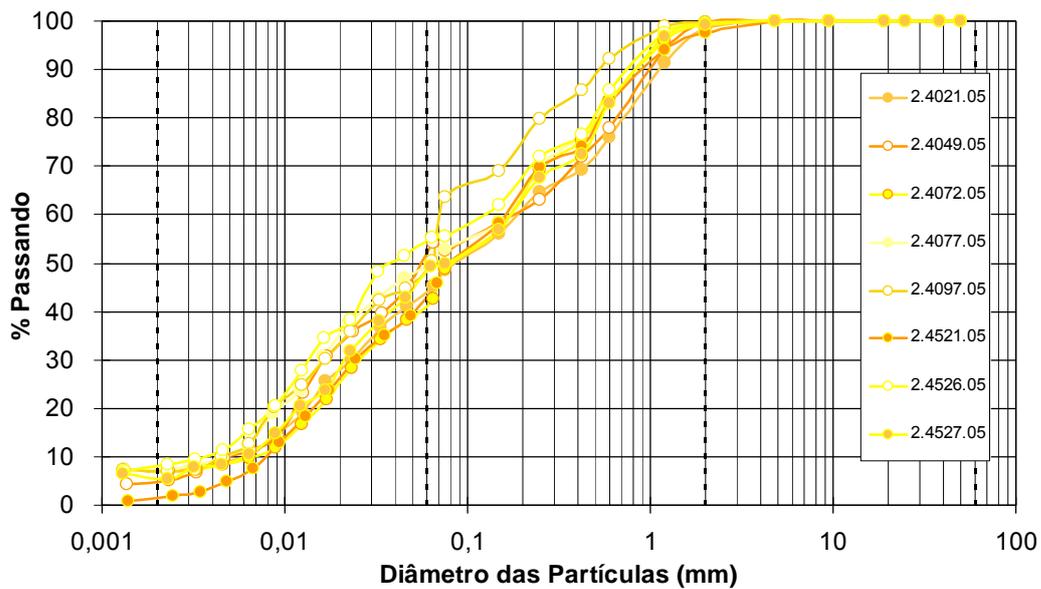


Figura 5.15 – Curvas granulométricas de solos amarelos.

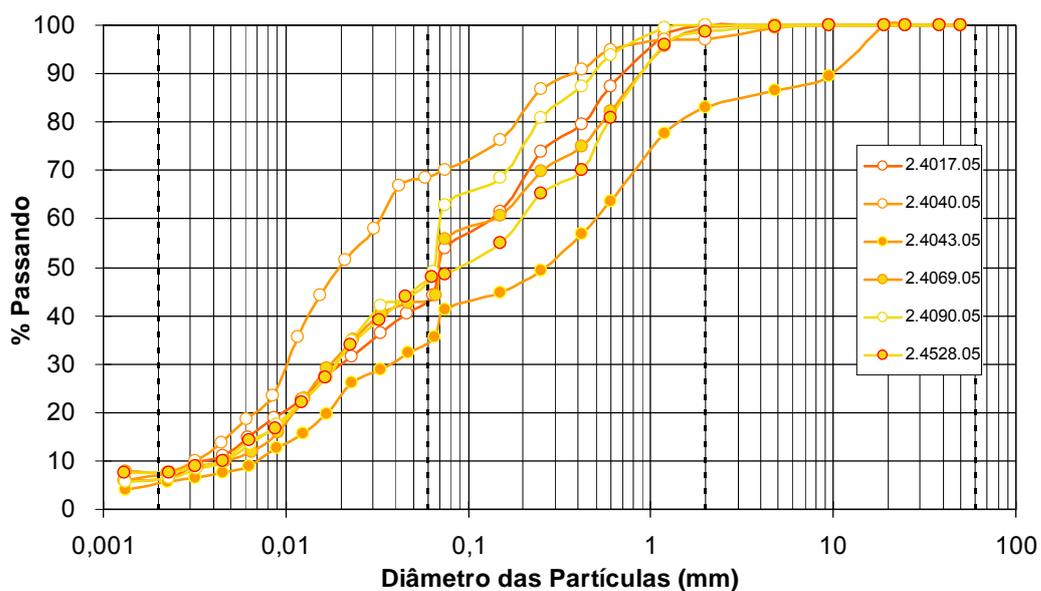


Figura 5.16 – Curvas granulométricas de solos alaranjados.

Os solos de cor vermelha e de cor marrom apresentam-se mais intemperizados que os anteriores e seus grãos são mais finos. O diâmetros d_{50} para os solos de cor vermelha variam entre 0,015 e 0,42 mm (Figura 5.17) e para os solos de cor marrom variam entre 0,009 e 0,02 mm (Figura 5.18). Algumas amostras dos solos de cor vermelha apresentam teor de argila superior a 10%. Para os solos de cor marrom a quantidade de argila pode superar 20%.

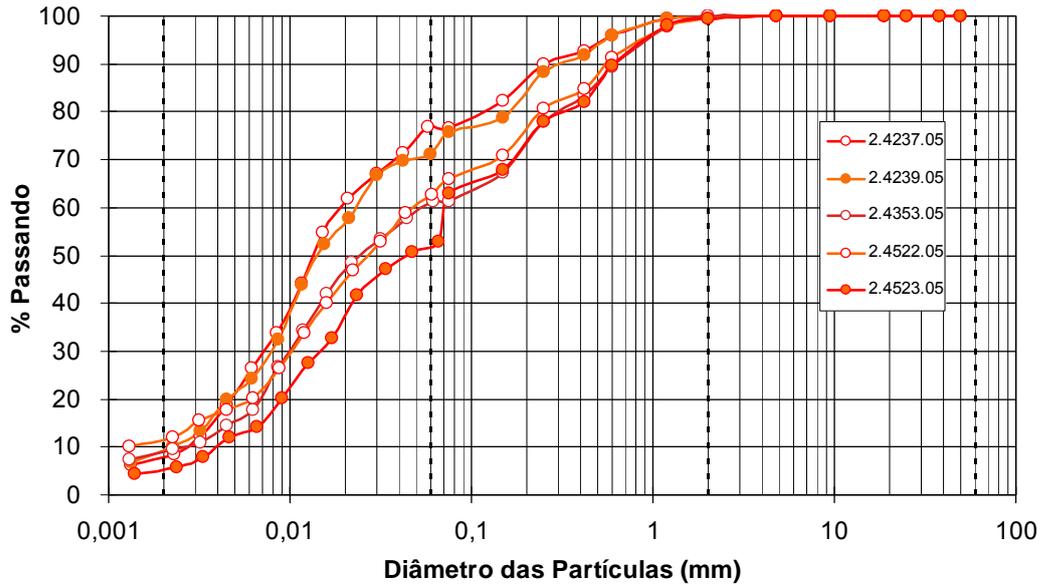


Figura 5.17 – Curvas granulométricas de solos Vermelhos.

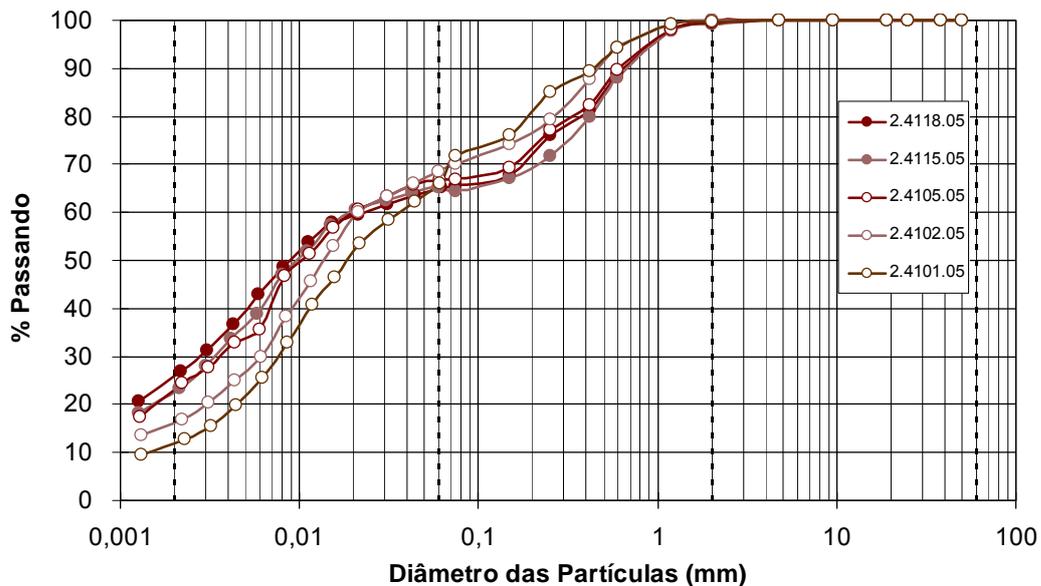


Figura 5.18 – Curvas granulométricas de solos Marrons.

Na Figura 5.19 observa-se a posição dos solos na Carta de Plasticidade. Praticamente todas as amostras ensaiadas dos solos Branco, Amarelo, Laranja e Vermelho estão abaixo da linha A. Apenas o solo Marrom apresenta-se à direita da Linha B com as amostras retiradas dos blocos 2.4498.05, 2.4014.07 e 2.4021.07.

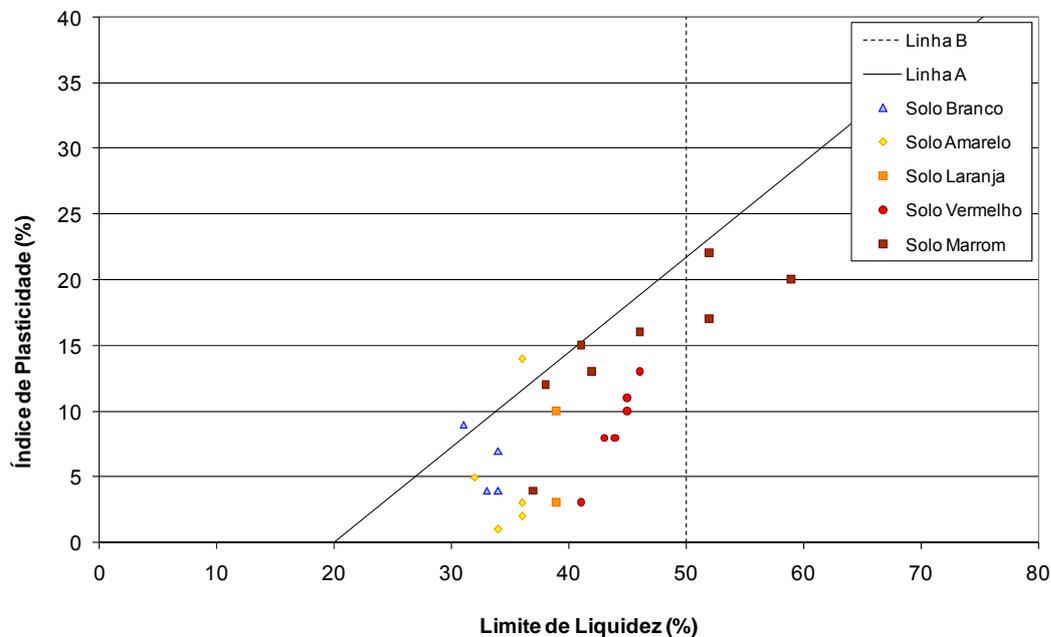


Figura 5.19 – Posição dos solos na Carta de Plasticidade.

A posição dos solos Branco, Amarelo, Laranja e Vermelho na Carta de Plasticidade equivale à classificação ML, ou seja, siltes inorgânicos, areias finas e areias finas siltosas ou argilosas com baixa plasticidade.

O solo Marrom, em quase a totalidade das amostras ensaiadas, pode ser classificado como CL, descritas como argilas inorgânicas de baixa a média plasticidade, argilas arenosas ou argilas siltosas. As amostras 2.4498.05, 2.4014.07 e 2.4021.07 posicionaram-se à direita da linha B o que equivale a um solo CH, argilas inorgânicas de alta plasticidade. Curiosamente essas amostras foram retiradas do poço aberto no topo do talude. As amostras retiradas da face do talude apresentam limite de liquidez inferior a 50%. Assim, as amostras coletadas do poço são mais plásticas do que as amostras coletadas da face.

Há autores que discutem a validade dos limites de Atterberg (limite de plasticidade e de liquidez) para a caracterização de solos tropicais (Bastos, *apud* Bevilaqua, 1991 *et al.*, 2004). Entre as principais questões discutíveis envolvendo esses ensaios, têm-se: os métodos de preparação das amostras, relacionados ao grau de secagem e destorroamento; e a pouca valia dos dados

de limites de consistência para solos saprolíticos grossos, para os quais a percentagem da fração mais fina ensaiada é pequena em relação ao todo.

Vargas (1988) propõe uma adaptação da classificação USCS para os solos tropicais. Os solos são classificados em “baixa compressibilidade” quando o limite de liquidez é inferior a 50% ou de “alta compressibilidade” quando o limite de liquidez é superior a 50%. O índice de atividade de Skempton é utilizado na identificação da natureza micácea ou caulínica da mineralogia das frações silte e argila. Vários pesquisadores têm testado a proposta de Vargas (1988) obtendo êxito para solo lixiviados ricos em caulinita e para solo micáceos. No entanto, solos expansivos e solos saprolíticos compostos por mica e feldspato não são bem descritos por essa metodologia (Futai, 2002). Ainda, Souza Neto (2000 *apud* Futai, 2002) relata a classificação de solos de comportamentos diferentes no mesmo grupo.

Ainda não existe uma classificação satisfatória para os solos residuais. As classificações tradicionais nem sempre conseguem distinguir solos tropicais nitidamente diferentes e também não fornecem informações para a engenharia de solos. A estrutura do solo e a mineralogia influenciam nos resultados de caracterização e podem definir o comportamento dos solos, mas não são consideradas na classificação.

5.2.2. Porosimetria de Mercúrio

Para determinar o tamanho, quantidade e distribuição dos espaços porosos dos solos estudados foram realizados ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio. Os ensaios foram executados nos solos Branco, Amarelo, Laranja, Vermelho e Marrom, como parte da dissertação de mestrado de Oliveira (2006). Os ensaios de porosimetria fornecem basicamente duas curvas, a curva de volume acumulado e um histograma de frequência contínuo dos diversos diâmetros de poros constituintes da estrutura do solo. Com a primeira é possível obter-se, para um determinado diâmetro de poro, as percentagens, em relação ao volume de vazios total da amostra, dos poros de diâmetro maior ou menor do que o considerado. Já a segunda curva, curva de $dv/d(\log d)$, uma espécie de derivada da curva anterior, fornece os intervalos de diâmetros de poros que aparecem com mais frequência na estrutura do solo.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório da Fundação de Apoio à Física e à Química da Universidade de São Carlos. Foi utilizado porosímetro *Micromeritics PoreSizer 9320*. Com este equipamento é possível investigar poros

de diâmetro a partir de 0,7 mm, a uma pressão de aproximadamente 0,0017 MPa (0,17 atm) até poros de 0,000006 mm ou 60 ângstrons de diâmetro, que correspondem a uma pressão de 212 MPa (2000 atm).

Na Figura 5.20 é apresentada a distribuição cumulativa dos diâmetros dos poros. A Figura 5.20 mostra claramente que o volume de poros é inversamente proporcional à profundidade da camada, ou seja, quanto mais profunda a camada (solo Branco) menor a quantidade de poros. Isto apenas não se aplica ao solo Marrom, o mais intemperizado, cuja quantidade total de vazios apresentada é muito próxima da encontrada no solo Branco. Observa-se também que para o solo Marrom a curva de distribuição de poros mostra dois patamares bem definidos nos volumes acumulados de 0,20 e 0,05 mL/g caracterizando a forma de “sela”. Para os demais solos o formato da curva de distribuição de poros é a de um “S” invertido.

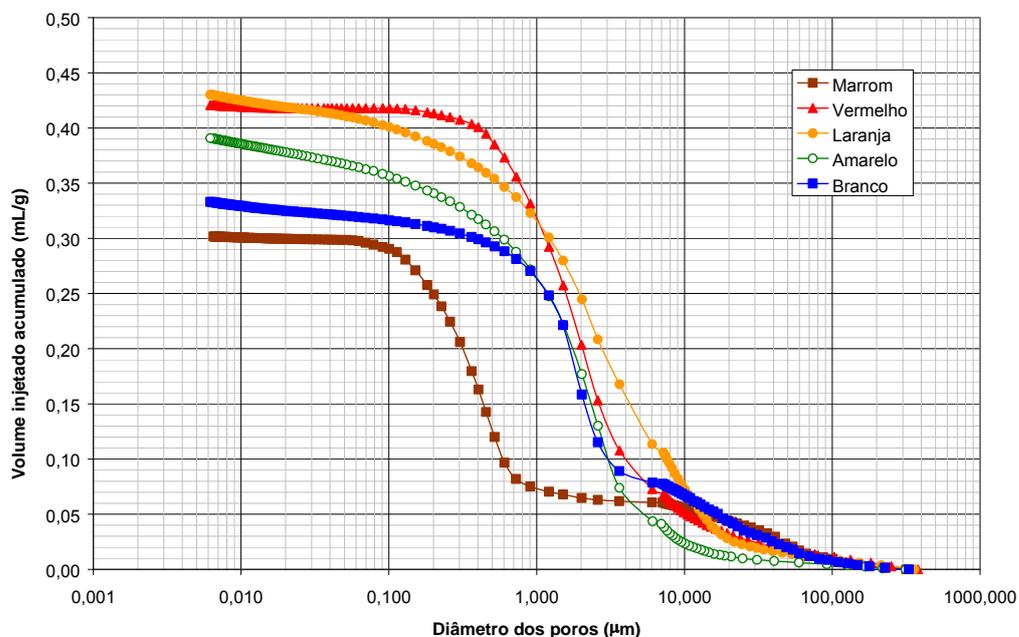


Figura 5.20 – Distribuição acumulativa dos diâmetros dos poros (Oliveira, 2006).

A Tabela 5.6 apresenta os valores de porosidade total obtidos para os solos nos ensaios de porosimetria. A porosidade total é obtida multiplicando-se o volume total injetado na amostra por grama de solo pelo peso específico seco do solo.

Tabela 5.6 – Porosidade por injeção de mercúrio.

Solo	Porosidade total por Hg (%)
Marrom	30,17
Vermelho	42,07
Laranja	43,01
Amarelo	39,09
Branco	33,29

Na Figura 5.21 apresenta-se a distribuição incremental dos diâmetros dos poros com a classificação da IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada) para micro-poros, meso-poros e macro-poros.

A classificação dos espaços porosos ainda não é um consenso entre os diferentes autores. A Tabela 5.7 apresenta três diferentes classificações encontradas na literatura da União Internacional de Química Pura e Aplicada (1982), Martinez (2003) e Delage *et al* (1996 *apud* Martínez, 2003).

A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC, 1982) propõe a seguinte relação:

- Macro-poros – poros de diâmetro maior que 0,5 μ m;
- Meso-poros – poros de diâmetro entre 0,2 μ m e 0,5 μ m;
- Micro-poros – poros menores que 0,2 μ m.

Por outro lado, Delage *et al.* (1996) classificam os poros como:

- Grandes – poros de diâmetro superior a 50 μ m;
- Médios – poros de diâmetro entre 0,5 μ m e 50 μ m;
- Pequenos – poros menores que 0,5 μ m.

Martinez (2003), analisando os resultados de ensaios de porosimetria de mercúrio em solos provenientes de três jazidas de solos residuais tropicais situadas no estado da Paraíba propôs uma terceira classificação, denominando de macroporos os poros com diâmetro superior a 4 μ m e de mesoporos os de diâmetro inferior a 4 μ m.

A partir dos resultados mostrados na Figura 5.21, é possível obter a percentagem volumétrica de microporos, mesoporos e macroporos presentes nos solos de acordo com as propostas da IUPAC (1982), Delage *et al.* (1996) e Martinez (2003) (ver Tabela 5.8).

Tabela 5.7 – Classificação dos espaços porosos.

	IUPAC	Delage et al. (1996 apud Martínez, 2003)	Martínez (2003)
Macroporos	$\Phi > 0,5 \mu\text{m}$	$\Phi > 50 \mu\text{m}$	$\Phi > 4 \mu\text{m}$
Mesoporos	$\Phi > 0,2 \mu\text{m}$ $\Phi < 0,5 \mu\text{m}$	$\Phi > 0,5 \mu\text{m}$ $\Phi < 50 \mu\text{m}$	$\Phi < 4 \mu\text{m}$
Microporos	$\Phi < 0,2 \mu\text{m}$	$\Phi < 0,5 \mu\text{m}$	--

Tabela 5.8 – Distribuição de poros em percentagem.

Solo	Micro (%)			Meso (%)			Macro (%)	
	IUPAC	Delage et al. (1996)	Martínez (2003)	IUPAC	Delage et al. (1996)	Martínez (2003)	IUPAC	Delage et al. (1996)
Marrom	15,6	54,0	79,3	42,4	38,5	20,7	42,0	7,5
Vermelho	1,8	7,8	75,6	6,0	87,9	24,4	92,2	4,3
Laranja	10,4	17,4	62,9	7,0	79,3	37,1	82,6	3,3
Amarelo	12,7	21,1	85,7	8,4	77,1	14,6	78,9	1,8
Branco	6,9	11,8	73,7	4,9	82,3	26,3	88,2	5,9

Observa-se que para os solos estudados, a classificação que melhor se aplica é a da IUPAC - União Internacional de Química Pura e Aplicada. Isto porque apenas com esta classificação é possível diferenciar o comportamento do solo Marrom dos demais. Nota-se que no solo Marrom existe uma maior concentração de mesoporos enquanto nos demais ocorre a predominância de macroporos. Para o solo Marrom observa-se a ocorrência de três famílias de poros. A primeira família de poros, no limite entre mesoporos e microporos, apresenta diâmetro aproximadamente igual a $0,45 \mu\text{m}$, e a segunda e a terceira, na região dos macroporos, de diâmetros aproximados iguais a 50 e $110 \mu\text{m}$. A primeira família de poros apresenta valor de pico bem maior que as outras duas.

Os solos Amarelo, Laranja e Vermelho apresentam duas famílias de picos, sendo o pico mais pronunciado na região de diâmetro dos poros de $2 \mu\text{m}$. O solo Branco apresenta três famílias de poros, a primeira com diâmetro em torno de $2 \mu\text{m}$, a segunda em torno de $10 \mu\text{m}$ e a terceira em torno de $50 \mu\text{m}$.

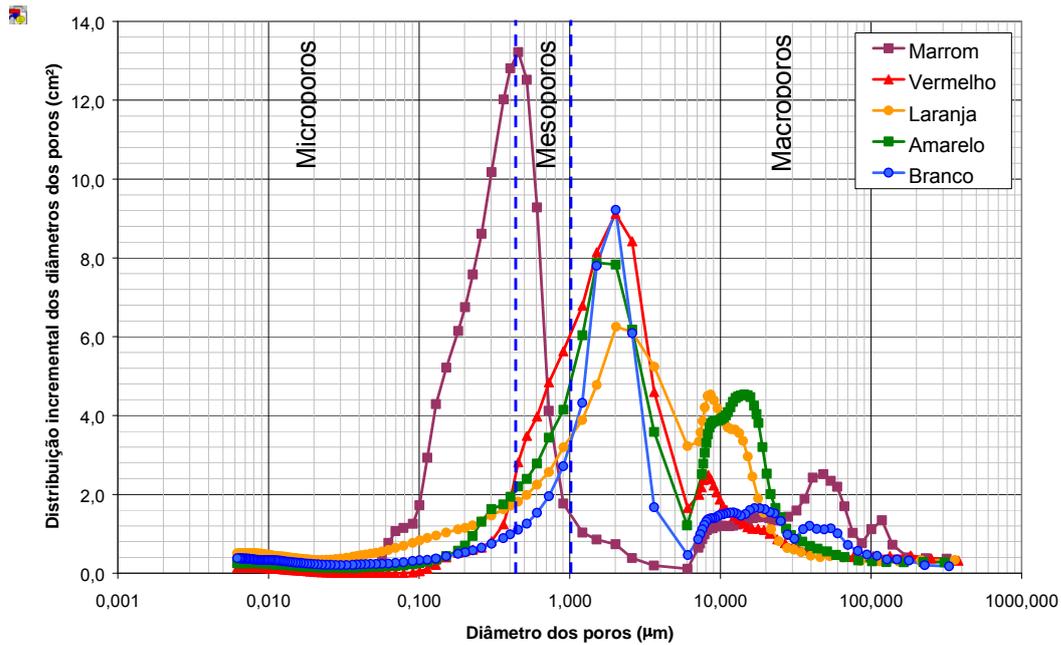


Figura 5.21 – Distribuição incremental dos diâmetros dos poros – (Classificação dos espaços porosos segundo IUPAC) (Oliveira, 2006).

O ensaio de porosimetria de mercúrio tem estreita relação com a curva característica dos solos. A curva de volume acumulado versus diâmetro dos poros pode ser transformada em uma curva característica do solo (Tibana, 1991). A comparação entre as curvas características dos solos obtidas através do ensaio de porosimetria e do método do papel filtro é discutida no Capítulo 6.

5.2.3. Caracterização de Amostras Compactadas

Com o intuito de analisar o comportamento dos solos residuais compactados foram misturadas amostras retiradas do talude nas formas deformada e indeformada dos cinco grupos estudados - Branco, Amarelo, Laranja, Vermelho e Marrom. O objetivo foi maximizar a quantidade de amostra disponível. Não foi considerada preponderante a quantidade de cada amostra individual na combinação de solos, todas as amostras foram misturadas e o produto final foi homogeneizado. A mistura resultou em cerca de 60 kg de amostra de cada categoria.

Essas amostras combinadas receberam nova numeração de registro, foram caracterizadas, e o resultado é apresentado na Tabela 5.9. A massa específica real dos grãos foi determinada de acordo com a ABNT (1984) e a granulometria foi realizada com o defloculante hexametáfosfato (*hmfosfato*) e

com apenas água. Observa-se uma queda acentuada na quantidade de finos nos solos Vermelho e Marrom para os ensaios realizados sem defloculante. Os valores de massa específica seguem a mesma tendência já observada nos ensaios realizados para as outras amostras coletadas, assim como os valores de LL e LP.

Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios de caracterização das amostras compactadas.

Solo	Massa Específica Real dos Grãos (g/cm ³)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL (%)	LP (%)
		hmfosfato água	hmfosfato água	hmfosfato água		
Branco 2.4056.07	2,699	2,7	48	46,6	35	23
		0,5	50,2	46,6		
Amarelo 2.4058.07	2,749	4	46	44,7	36	27
		3	49	44		
Laranja 2.4057.07	2,741	8,9	48,3	41,8	37	27
		9	49	41		
Vermelho 2.4059.07	2,807	12	53	33,2	41	26
		0,5	66,3	32		
Marrom 2.4060.07	2,739	35	21	44	47	29
		2,2	50,9	46,1		

Nas figuras 5.22 a 5.26 são comparadas as curvas granulométricas realizadas com defloculante hexametáfosfato com as curvas granulométricas realizadas com apenas água para as amostras de cada cor.

O solo Branco praticamente não teve sua granulometria alterada pela ação do defloculante (Figura 5.22). Isto se deve à pequena quantidade de partículas finas e de aglomerados (conjunto de partículas cimentadas ou floculadas) existentes nesse solo. A mesma observação vale para o solo Laranja, conforme pode ser verificado pela Figura 5.24. O solo Amarelo apresentou alteração, em torno de 15%, nas partículas de tamanho entre 0,02 e 0,03 mm (Figura 5.23).

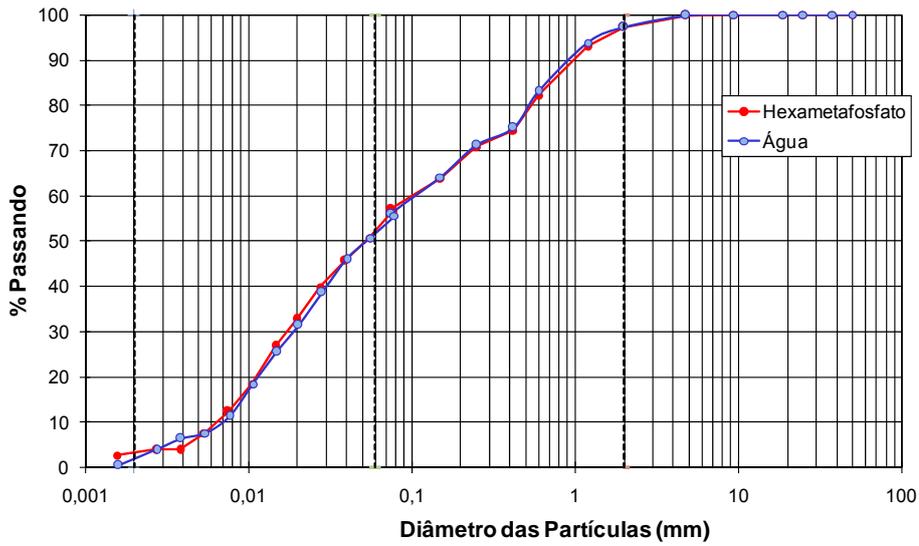


Figura 5.22 – Curva granulométrica do solo Branco.

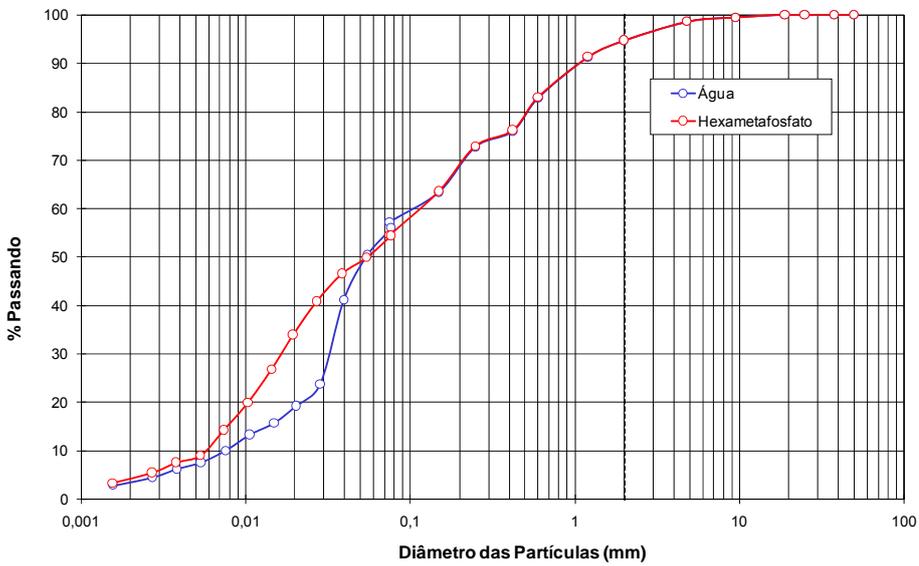


Figura 5.23 – Curva granulométrica do solo Amarelo.

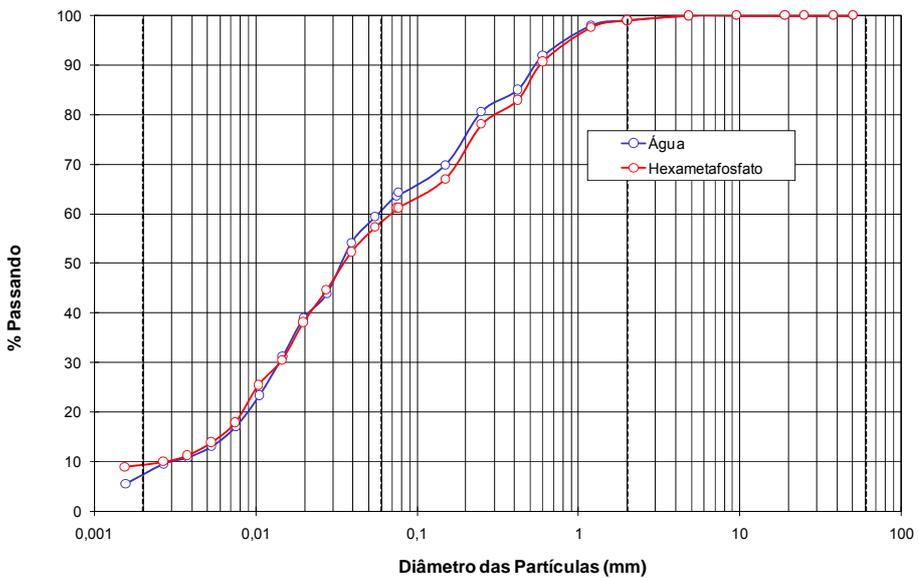


Figura 5.24 – Curva granulométrica do solo Laranja.

A granulometria dos solos Vermelho e Marrom foi bastante alterada pela ação do defloculante. A granulometria realizada com água não identifica partículas inferiores a 0,01 mm no solo Vermelho e apenas 8% dessas partículas no solo Marrom. Com o defloculante, as partículas inferiores a 0,01 mm são 35% no solo Vermelho e quase 50% no solo Marrom.

As curvas granulométricas indicam ainda que praticamente toda a fração argila ($\% < 0,002$) está floculada nos solos Vermelho e Marrom. Compostos húmicos ou organo-metálicos, cimentos minerais, ligações eletrostáticas, concentração de eletrólitos no fluido intersticial e a umidade são ligantes que participam da aglomeração de partículas (Bryan, 2000).

A aglomeração de partículas pode ser interpretada como coesão nos solos. Essa aglomeração aumenta a resistência ao cisalhamento, além de fornecer ao solo resistência à tração, diminuindo o possível destacamento das partículas. A resistência à compressão não confinada e a resistência à tração serão estudadas no Capítulo 7.

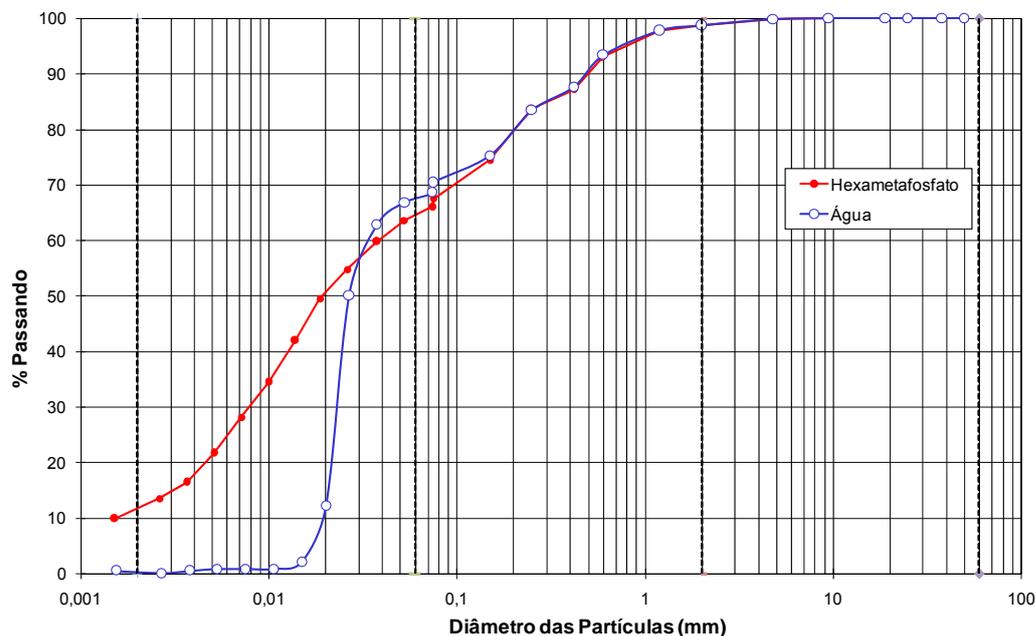


Figura 5.25 – Curva granulométrica do solo Vermelho.

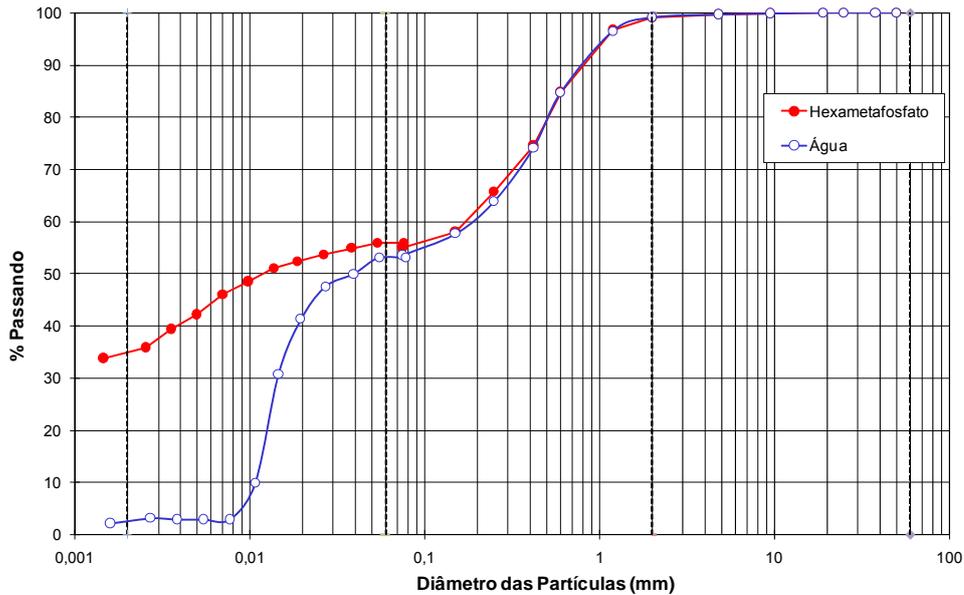


Figura 5.26 – Curva granulométrica do solo Marrom.

Seguindo as recomendações da NBR 7182 foi obtida a curva de compactação dessas amostras. Não foi realizada secagem prévia dos solos para o início do ensaio. As amostras foram compactadas no cilindro Proctor, de volume igual a 1000 cm^3 , em três camadas, com aplicação de 26 golpes por camada. Na Figura 5.27 está apresentada a curva de compactação obtida para o solo Branco juntamente com as curvas de igual saturação para 70%, 80% e 90%. Neste ensaio as coordenadas correspondentes à umidade ótima são densidade seca máxima de $1,79 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade gravimétrica de 16%.

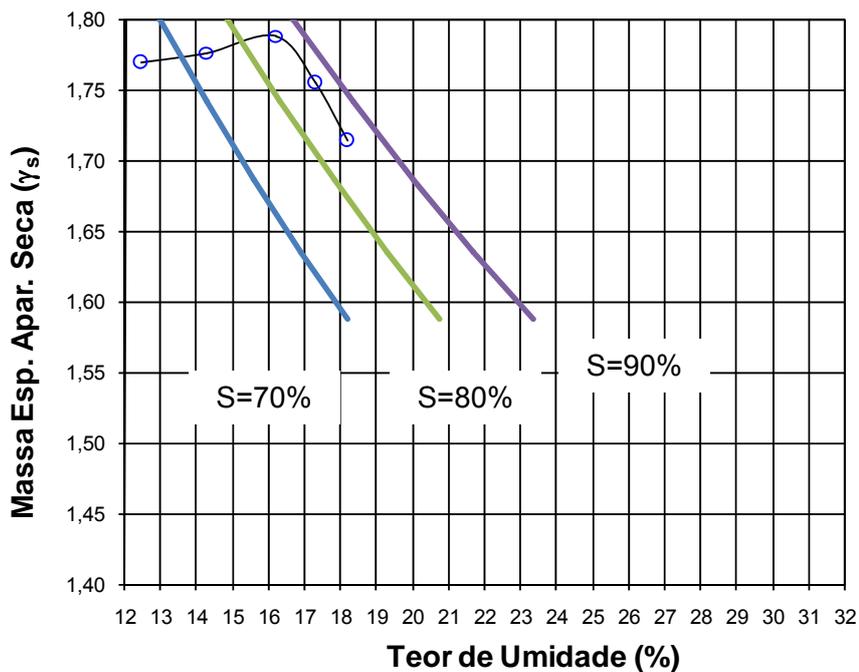


Figura 5.27 – Curva de compactação do solo Branco.

Na Figura 5.28 e na Figura 5.29 estão apresentadas as curvas de compactação dos solos Amarelo e Laranja, respectivamente. Também estão representadas as curvas de igual saturação para 70%, 80% e 90%. Os parâmetros ótimos para o solo Amarelo são $1,73 \text{ g/cm}^3$ para o peso específico e 19% de teor de umidade. Os parâmetros ótimos para o solo Laranja são $1,57 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica e 23% de teor de umidade.

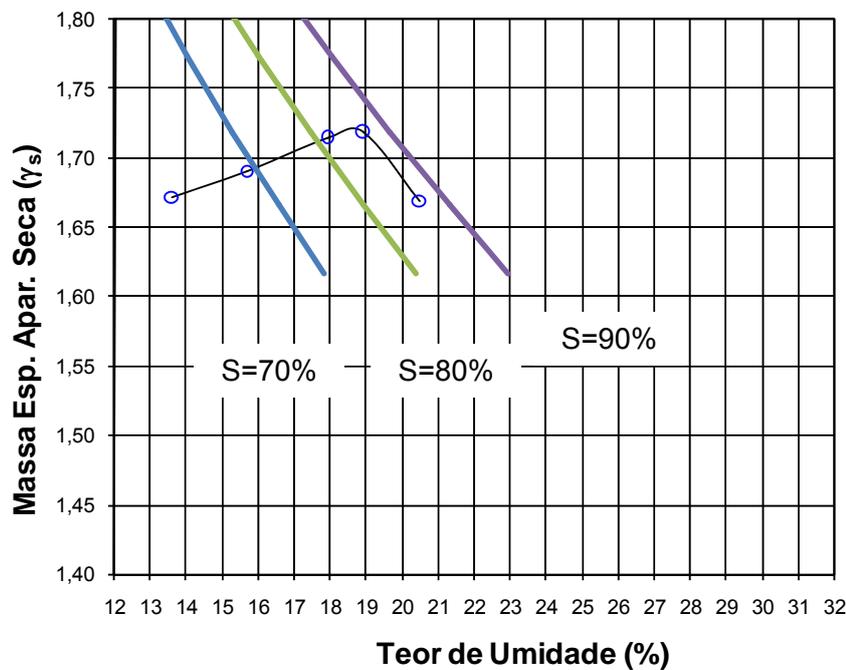


Figura 5.28 – Curva de compactação do solo Amarelo.

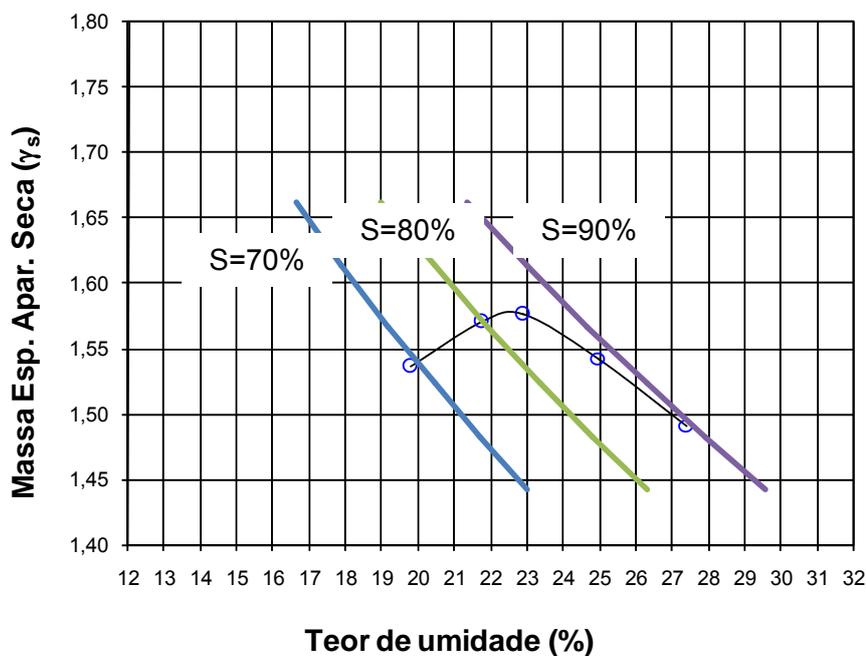


Figura 5.29 – Curva de compactação do solo Laranja.

Os resultados obtidos para o solo Vermelho e para o solo Marrom estão apresentados na Figura 5.30 e na Figura 5.31. A massa específica aparente seca máxima para o solo Vermelho é $1,53 \text{ g/cm}^3$ e para o solo Marrom é $1,56 \text{ g/cm}^3$. O teor de umidade ótimo é de 24% tanto para o solo Vermelho quanto para o solo Marrom.

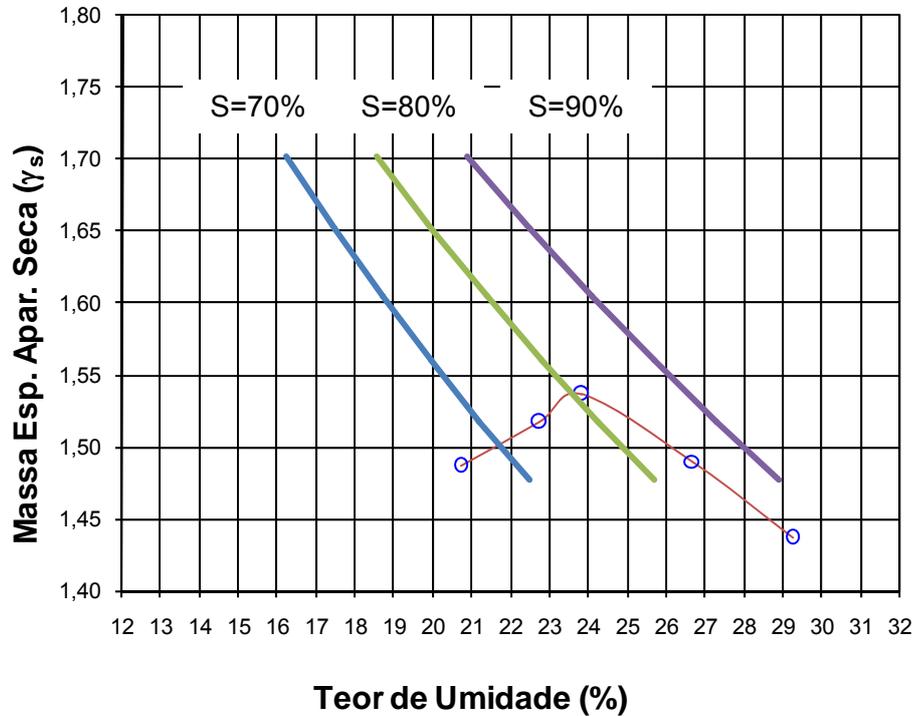


Figura 5.30 – Curva de compactação do solo Vermelho.

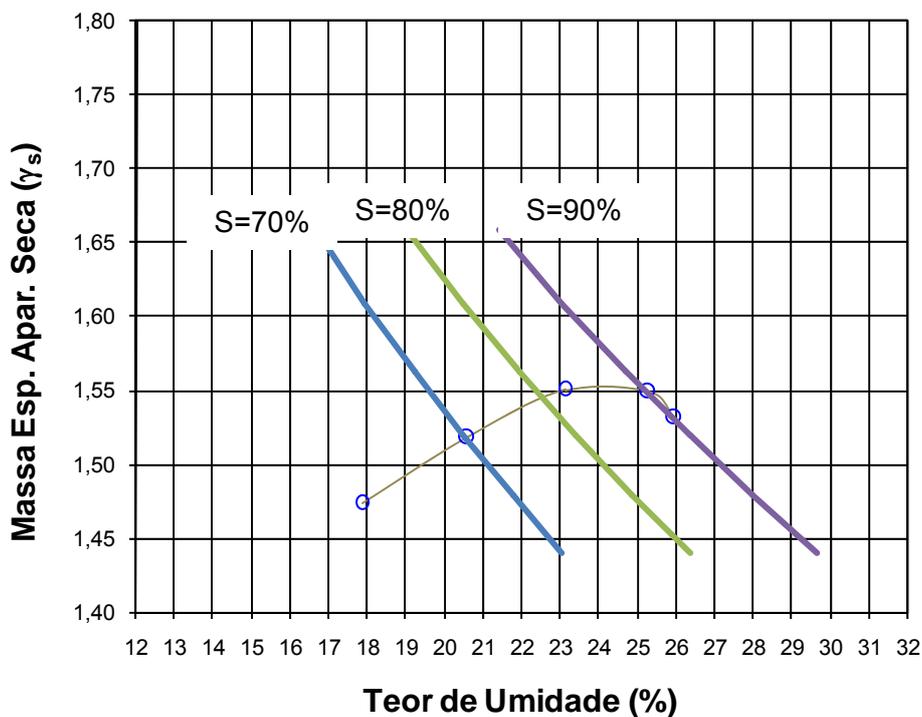


Figura 5.31 – Curva de compactação do solo Marrom.

A Figura 5.32 apresenta as curvas de compactação dos cinco solos. Observa-se que do solo Branco ao solo Vermelho há um aumento do teor de umidade ótimo e uma diminuição da massa específica aparente seca do material compactado. O solo Marrom apresenta o mesmo teor de umidade ótimo que o solo Vermelho, porém uma massa específica seca levemente superior.

Os solos podem ser divididos em dois grupos devido ao seu comportamento. Os solos Branco e Amarelo apresentam comportamento similar, com menor teor de umidade e massa específica seca superior aos solos Laranja, Vermelho e Marrom. De maneira geral, quanto maior o teor de argila de um solo menor a sua densidade seca máxima e maior seu teor de umidade ótimo. Os solos Branco e Amarelo apresentam teor de argila de 2,7 e 4%, respectivamente. Enquanto que os solos Laranja, Vermelho e Marrom apresentam teor de argila de 8,9%, 12% e 35% de acordo com o ensaio de granulometria com defloculante.

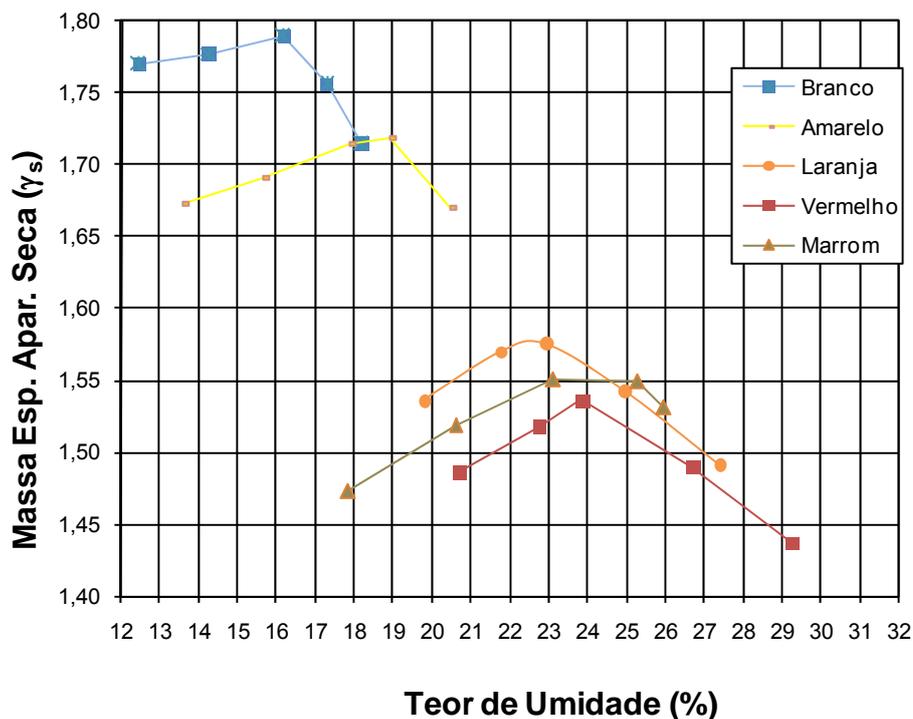


Figura 5.32 – Curvas de compactação dos solos estudados.

5.2.4. Caracterização Química

A investigação química dos sedimentos pode ser utilizada como indicador das variações naturais das litologias (intemperismo), dos focos de poluição industrial, agrícola e doméstica ou de jazidas minerais. No presente trabalho a caracterização química tem por objetivo principal caracterizar o perfil de solo estudado e auxiliar na análise da investigação mecânica e hidráulica.

A disponibilidade dos elementos no meio depende de o mesmo ser ácido, neutro ou alcalino. O termo pH (potencial hidrogênico) se refere à alcalinidade ou acidez de um meio qualquer ou solução aquosa. A escala de pH varia de 1 a 14. A acidez aumenta dos valores 7 até 1 e a alcalinidade de 7 até 14.

A acidez total deve-se à presença dos íons H^+ e Al^{+3} que estão nos pontos de troca não ocupados por bases trocáveis. A soma dos íons H^+ e Al^{+3} é denominada acidez total. Quanto maior for o valor da acidez total, maior será a acidez do solo (Mineropar, 2005). Para fins de agronomia o ideal é que o solo apresente acidez total igual a zero.

A determinação da alcalinidade e da acidez dos solos é realizada de uma forma relativamente simples, com o uso de medidores de pH. Para tal determinação os solos foram secos ao ar, destorroados e passados na peneira # 40. Posteriormente foram misturados com água destilada na razão solo/água de 1:2,5 (razão em volume) e homogeneizados por uma hora. O valor do pH foi determinado com o aparelho pH/Conductivity Meter da WCW Multiline P3. Os valores obtidos para o pH em água estão sumarizados na Tabela 5.10. Como pode ser observado, o valor do pH aumenta à medida em que o solo é menos intemperizado e a acidez total diminui. Mais ácido é o solo quanto maior for a quantidade de H^+ retido no complexo de troca. O Alumínio também age como um elemento acidificante e ativa o H^+ . Os íons básicos, tais como Ca^{+2} e Mg^{+2} , tornam o solo menos ácido (Lopes, 1989). A acidez é comum em todas as regiões onde a precipitação é suficientemente elevada para lixiviar quantidades apreciáveis de bases permutáveis (como o cálcio e o magnésio) na água de drenagem. Elas são substituídas por elementos acidificantes como o hidrogênio, o manganês e o alumínio (Brady, 1989).

O grau de acidez ou de alcalinidade do solo é influenciado pelo material de origem. Os solos desenvolvidos de rochas de origem básica (basalto, diabásio, gabro) geralmente possuem valores de pH mais altos do que aqueles formados de rochas ácidas (granito, riolito).

O teor de carbono orgânico foi determinado através da oxidação da matéria orgânica com bicromato de potássio 0,4N (EMBRAPA, 1979). A única amostra que apresentou valor relevante de matéria orgânica foi o solo Marrom com 5,6 g/kg (Tabela 5.11). No restante do perfil o teor de matéria orgânica é inferior a 1 g/kg. A matéria orgânica também é responsável por acidificar o solo.

Tabela 5.10 – Valores de pH e Acidez Total.

<i>Amostra</i>	<i>Cor</i>	<i>pH</i>	<i>Acidez Total</i>
2.4498.05	Marrom	4,2	1,5
2.4401.05	Vermelha	4,8	1
2.4352.05	Laranja	5,5	0,5
2.4211.05	Amarela	5,5	0,5
2.4113.05	Branca	6,0	0,235

Tabela 5.11 – Matéria Orgânica.

Amostra	2.4116.05	2.4523.05	2.4522.05	2.4528.05	2.4527.05	2.4521.05	2.4525.05	2.4520.05
Cor	Marrom	Vermelho	Vermelho	Laranja	Amarelo	Amarelo	Branco	Branco
Matéria Orgânica (g/kg)	5,6	0,7	1,0	0,7	0,9	0,7	0,9	0,7

A determinação dos íons Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , Al^{+3} e H^+ foi feita através do ensaio de complexo sortivo, ensaio executado pela Embrapa (Tabela 5.), enquanto que a determinação dos óxidos presentes nos solos foi realizada por análises químicas totais através de ensaios de fluorescência de raios-X, ensaios executados no LAMIR Laboratório de Mineralogia da UFPR (Tabela 5.12). Estes fazem parte da dissertação de Oliveira (2006). Através de ensaios de fluorescência de raios-X foi possível determinar os teores de Sílica (SiO_2), Alumínio (Al_2O_3), Titânio (TiO_2), Ferro (Fe_2O_3), Cálcio (CaO), Magnésio (MgO), Sódio (Na_2O) e Potássio (K_2O) a partir da confecção de pastilhas prensadas de material pulverizado.

A partir do ensaio de complexo sortivo tem-se que o teor de cálcio no perfil só é relevante nos solos Amarelo e Branco. No ensaio de fluorescência por raios-X observa-se a ocorrência de CaO também nos solos Branco e Amarelo. O cálcio forma um grande número de silicatos, carbonatos e fosfatos. No entanto, minerais de cálcio intemperizam-se facilmente por efeito da drenagem natural em ambientes moderadamente ácidos. O cálcio dissolvido é cristalizado dentro dos sedimentos ou precipitado a partir de soluções na forma de calcita, aragonita, dolomita, fosfatos e principalmente apatita (Mineropar, 2005). O cálcio

presente nas camadas mais inferiores do perfil foi lixiviado nas camadas superiores (Marrom, Vermelho), por isso não é mais detectado.

O mesmo comportamento do cálcio ocorre com o magnésio. O magnésio é um elemento comum em rochas máficas e ultramáficas. Nos granitos a ocorrência de magnésio é de apenas 0,5%. Nas rochas é o constituinte maior de muitos minerais, podendo estar presente em silicatos, óxidos e carbonatos. Minerais de magnésio intemperizam-se facilmente e o magnésio dissolvido é removido principalmente dos minerais argilosos e carbonatados (Mineropar, 2005). No perfil estudado a ocorrência de magnésio é maior no solo Laranja.

No ensaio de complexo sortivo o elemento potássio não se sobressai, embora no ensaio de fluorescência por raios-X o K_2O esteja presente em todo o perfil e em maior quantidade nos solos Branco e Amarelo. Em rochas arenosas o potássio ocorre principalmente em feldspatos potássicos – bastante resistente ao intemperismo – micas e na glauconita (silicato hidratado de Fe e K) (Mineropar, 2005).

As quantidades de sódio encontradas no perfil, tanto pelo ensaio de complexo sortivo quanto pela fluorescência de raios-X, são um pouco inferiores às quantidades de potássio. A maior ocorrência é nos solos Branco e Amarelo. O sódio forma silicatos e, nas rochas, é principalmente incorporado nos feldspatos. Durante a diferenciação magmática, a composição dos plagioclásios muda de cálcica para sódica. Como resultado, rochas máficas (pobres em sílica) contêm principalmente Ca e as félsicas contêm Na. Nos granitos a ocorrência de sódio é em torno de 2,5%. Os plagioclásios ricos em sódio são resistentes ao intemperismo e mesmo os sedimentos arenosos contêm alguma quantidade do elemento (Mineropar, 2005).

Na Figura 5.33 é apresentada a variação dos compostos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e K_2O com a profundidade. Observa-se que a quantidade de sílica diminui do solo Branco ao solo Marrom enquanto que os teores de óxido de ferro e de alumínio aumentam. A quantidade de óxido de potássio é praticamente constante. Os óxidos de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibbsite) funcionam como agentes cimentantes, elevando a coesão entre as partículas e, conseqüentemente, modificando a estrutura do solo.

Tabela 5.17 – Propriedades químicas dos solos (Oliveira, 2006)

Amostra	Cor	Prof. (m)	Complexo sortivo				Valor S (Soma)	Al ³⁺	H ⁺	Valor T (Soma) (mE/100)	Superfície Específica (S.E.) (m ² /g)
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺					
2.4116.05	Marrom	1,10	0,70	0,08	0,01	0,8	2,70	2,90	6,39	49,87	
2.4523.05	Vermelho	2,00	0,20	0,09	0,02	0,3	2,00	1,80	4,11	32,08	
2.4522.05	Vermelho	2,50	0,60	0,10	0,01	0,7	2,00	1,00	3,71	28,95	
2.4528.05	Laranja	6,75	0,30	0,80	0,02	1,2	1,70	1,60	4,52	35,28	
2.4527.05	Amarelo	7,20	1,70	0,90	0,02	2,7	0,80	1,20	4,71	36,76	
2.4526.05	Amarelo	7,50	4,30	0,80	0,06	5,2	0,20	1,00	6,43	50,18	
2.4521.05	Amarelo	9,00	1,40	1,20	0,06	2,7	0,00	1,00	3,70	28,88	
2.4525.05	Branco	9,50	2,00	0,40	0,11	2,6	0,10	0,60	3,25	25,36	
2.4520.05	Branco	10,00	1,70	0,30	0,08	2,1	0,00	0,80	2,92	22,79	
2.4524.05	Branco	11,00	1,90	0,30	0,05	2,3	0,10	0,60	3,01	23,49	

Tabela 5.12 - Análises químicas totais por fluorescência de raios-X das diversas camadas de solo do perfil estudado (Oliveira, 2006).

Amostra	Cor	Profundidade (m)	Índices químicos em % de peso									
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
2.4113.05	Marrom	1,1	53,95	25,68	7,50	0,53	0,07	0,63	0,04	1,71	0,10	0,09
2.4523.05	Vermelho	2	54,46	25,06	8,23	0,59	0,07	0,74	0,05	1,65	0,15	0,10
2.4522.05		2,5	51,09	26,51	9,59	0,67	0,06	0,61	0,04	1,56	0,25	0,10
2.4528.05	Laranja	6,75	52,72	23,78	9,03	0,67	1,51	1,44	0,24	1,59	0,20	0,13
2.4527.05	Amarelo	7,2	59,79	20,51	5,84	0,56	3,38	1,15	1,42	1,70	0,10	0,08
2.4526.05		7,5	64,29	19,63	3,88	0,40	2,26	1,04	1,43	2,19	0,06	0,06
2.4521.05		9	71,14	16,10	2,92	0,32	1,93	0,66	1,55	1,39	0,03	0,05
2.4525.05	Branco	10,5	68,51	17,75	2,98	0,31	2,00	0,87	1,10	2,49	0,03	0,05
2.4520.05		10	69,07	17,00	2,87	0,33	2,19	0,75	1,63	2,35	0,03	0,05
2.4524.05		11	70,57	14,05	3,67	0,35	3,12	1,28	2,62	1,46	0,06	0,06

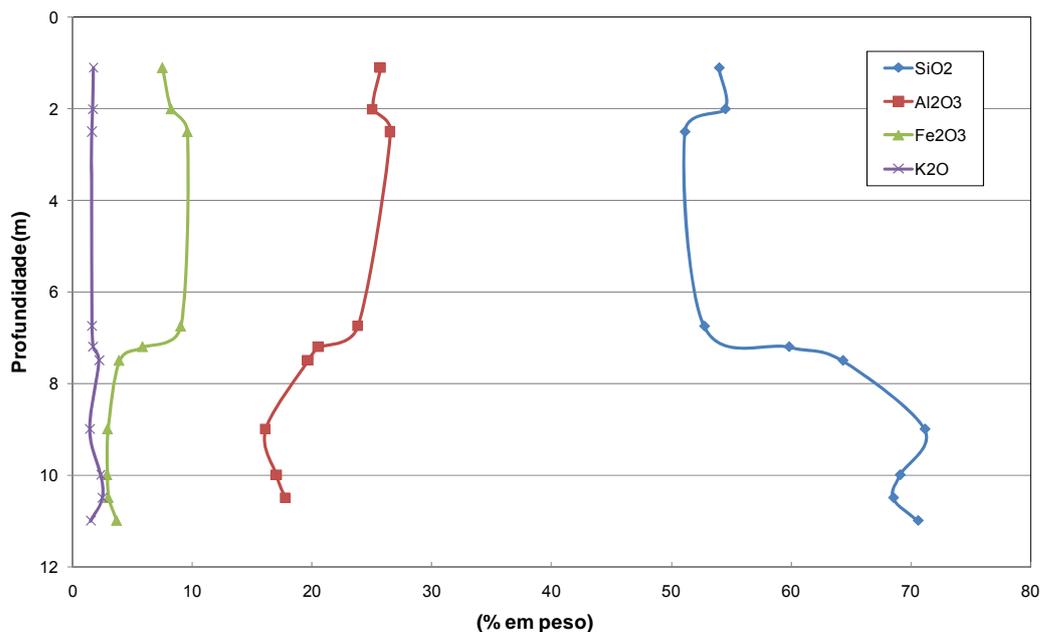


Figura 5.33 – Variação dos compostos SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e K₂O com a profundidade.

Os teores de Al⁺³, H⁺ e Al₂O₃ aumentam com o aumento do intemperismo no perfil (ver Tabela 5. e Tabela 5.12). O íon Al⁺³ (único íon estável do alumínio) é conhecido por formar ligações que resultam em óxidos. Durante o intemperismo de minerais primários, uma série de hidróxidos de cargas e composições variadas é formada (desde Al(OH)⁺² até Al(OH)₆⁻³), tornando-se integrantes das estruturas de argilominerais (Kabata-Pendias e Pendias, 1992 *apud* Mineropar, 2005).

A soma das concentrações de Ca⁺², Mg⁺², K⁺, Na⁺ denomina-se soma de bases (S). Se for somado ao valor de S as concentrações de Al⁺³ e H⁺ obtém-se o valor de capacidade de troca catiônica T (ou CTC). A capacidade de troca catiônica é utilizada para expressar a quantidade de cargas negativas no solo já ocupada por cátions.

A superfície específica (S.E.) é determinada a partir da capacidade de troca catiônica. O fator que converte o valor T para S.E. é 7,8043. Este fator está relacionado às dimensões da molécula de azul de metileno (EMBRAPA, 1979). Os resultados estão apresentados na Tabela 5. e na Figura 5.34. A superfície específica do solo é função direta do tamanho, forma e mineralogia dos grãos constituintes. Solos arenosos possuem superfície específica pequena enquanto que nos solos argilosos a superfície específica aumenta com a diminuição do tamanho dos grãos. De acordo com a Figura 5.34 a superfície específica para o solo Branco situa-se em torno de 25 m²/g e para o solo Marrom em torno de 50 m²/g. Observa-se que próximo dos 8 m de profundidade (solo Amarelo) os

ensaios químicos determinaram uma superfície específica alta. Isto pode ser consequência de uma maior intemperização neste local talvez em função de maior percolação de água.

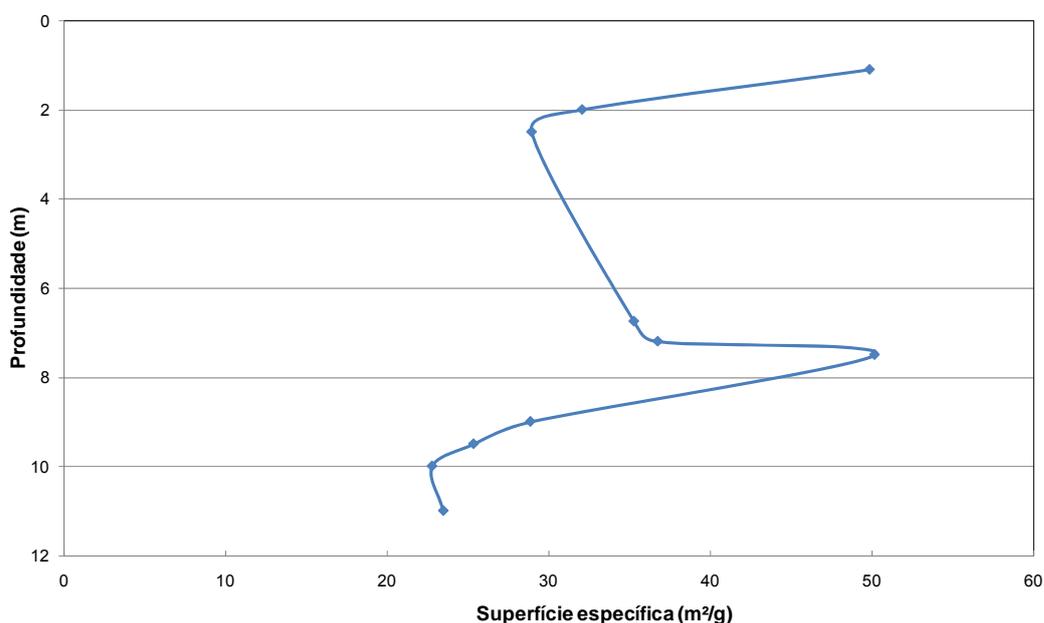


Figura 5.34 – Variação da superfície específica com a profundidade.

A determinação de ânions foi realizada através da técnica de cromatografia pela Embrapa. Foram analisadas três amostras do solo Branco, três amostras do solo Amarelo, uma amostra do solo Laranja, duas amostras do solo Vermelho e uma amostra do solo Marrom. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Resultado do ensaio de cromatografia.

Amostra	Cor	Fluoreto mg/l	Cloreto mg/l	Nitrito mg/l	Brometo mg/l	Nitrato mg/l	Fosfato mg/l	Sulfato mg/l
2.4116.05	Marrom	0,04	6,29	0,06	0,18	4,98	< 0,04	3,08
2.4523.05	Vermelho	0,00	7,72	0,00	0,03	1,01	0,00	2,19
2.4522.05	Vermelho	0,06	6,49	0,05	0,03	0,89	0,06	2,41
2.4528.05	Laranja	0,04	22,90	0,00	0,06	1,16	0,00	4,45
2.4527.05	Amarelo	0,22	13,48	0,00	0,07	1,32	0,00	4,70
2.4526.05	Amarelo	0,12	13,07	0,00	0,05	1,24	0,03	3,56
2.4521.05	Amarelo	0,00	16,62	0,00	0,00	2,02	0,00	4,00
2.4525.05	Branco	0,13	20,27	0,00	0,08	1,69	0,00	6,17
2.4520.05	Branco	0,00	19,92	0,00	0,05	4,43	0,00	21,00
2.4524.05	Branco	0,13	18,69	0,00	0,09	1,23	0,00	17,34

Para melhor visualização dos íons mais relevantes no perfil, os resultados de cromatografia para os íons cloreto, nitrato e sulfato são apresentados na Figura 5.35 em função da profundidade de coleta das amostras ensaiadas.

O cloro é o halogênico mais abundante na natureza. É um elemento altamente móvel durante os processos hidrotermais e supergênicos. Entretanto, o íon Cl^- e os complexos aniônicos de cloro são facilmente solúveis. Então a geoquímica do cloro é intrinsecamente relacionada à química de águas e aos depósitos evaporíticos (Mineropar, 2005).

As concentrações de cloro nas rochas são variáveis e não existem muitos minerais estáveis de cloro, mas é freqüente sua associação em minerais micáceos, apatita, hornblenda e alguns feldspatos (Mineropar, 2005). No solo Branco os teores chegam a 20 mg/l. Na profundidade de 8 m o teor de cloro aumenta consideravelmente, talvez transportado em água percolada.

Os sulfatos são sais moderadamente solúveis a muito solúveis, sendo que em água doce a saturação ocorre a 1500 mg/L e pode chegar até 7200 mg/L em águas salinas. Origina-se da oxidação do enxofre presente nas rochas e da lixiviação de compostos sulfatados (gipsita e anidrita). As águas subterrâneas apresentam geralmente teores de sulfatos inferiores a 100 mg/L (Primo, 2004). No perfil estudado os teores de sulfato são maiores no solo Branco, com pouco mais de 20 mg/L, e quase desaparecem nos solos mais superficiais, com menos de 5 mg/L.

Ao contrário de outros elementos químicos que são provenientes da decomposição das rochas, o nitrogênio alcança o solo sob a forma de material orgânico de origem vegetal e animal. A amonificação, que é a liberação de amônio (NH_4^+) de compostos nitrogenados, e a nitrificação, que é a oxidação do amônio, com formação de nitritos e nitratos são realizadas por dois tipos diferentes de bactérias. O nitrogênio é disponibilizado às plantas quase que totalmente sob a forma de nitratos. Assim, a quantidade de nitrato identificada nos ensaios químicos reflete a ação microbiana no solo. No solo mais superficial (Marrom) a quantidade de nitrato é superior aos demais.

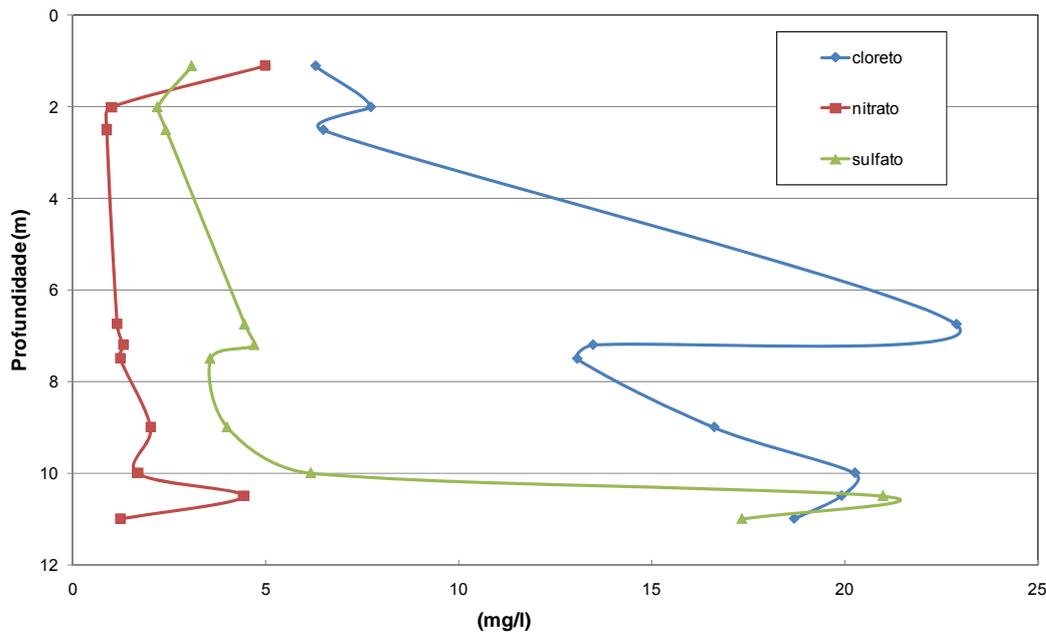


Figura 5.35 – Variação dos íons cloretos, nitratos e sulfatos com a profundidade.

5.2.5. Caracterização Mineralógica

Os solos residuais caracterizam-se por uma transformação gradual dos minerais primários, presentes na rocha mãe, em minerais secundários, argilo-minerais e oxi-hidróxidos de alumínio presentes nos solos mais intemperizados (Camapum de Carvalho, 2004). A caracterização mineralógica das diversas frações do solo pode contribuir para melhor entender seus diversos parâmetros. Em razão disto, a caracterização dos solos estudados inclui a realização de ensaios de difração de raios-X e microscopia ótica para identificar os minerais presentes em todo o perfil.

Os ensaios com a técnica de difratometria de raios-X, realizada em amostras de solos, foram conduzidos na PUC-Rio e no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – LAMIR, da UFPR. Foram analisadas as frações silte e argila dos solos. Uma descrição detalhada dos ensaios pode ser encontrada em Oliveira (2006). A seguir estão apresentados os difratogramas representativos das cinco camadas de solo.

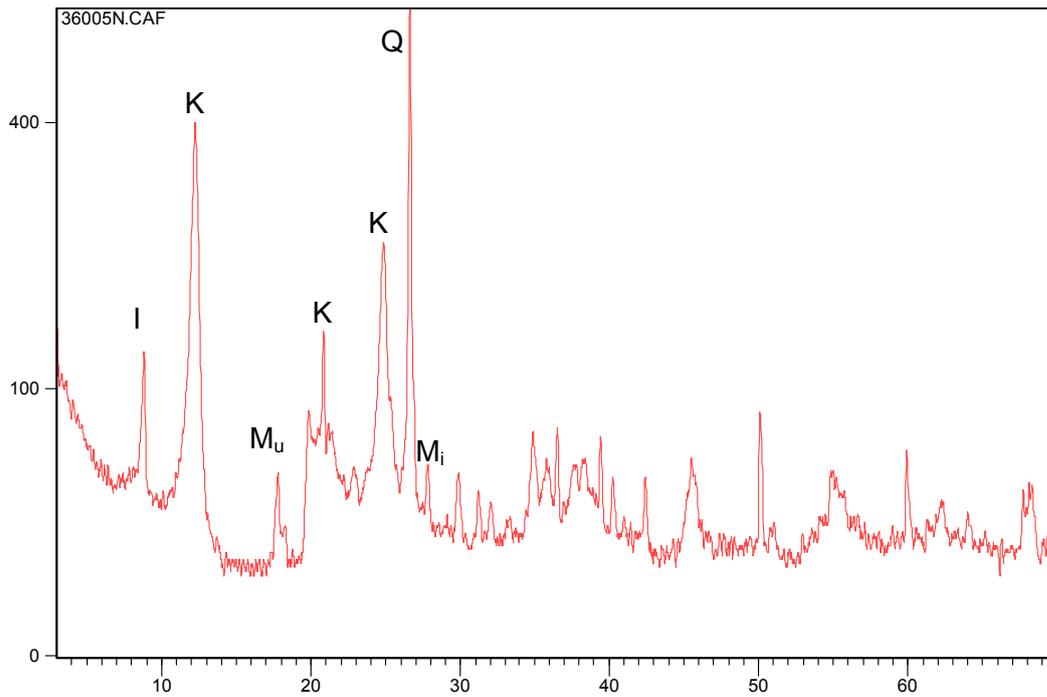


Figura 5.36 – Difratograma do Solo Marrom (fração silte amostra 2.4108.05) sem tratamento. I: ilita; K: caulinita; Mu: muscovita; Q: quartzo; Mi: Microclina (Oliveira, 2006).

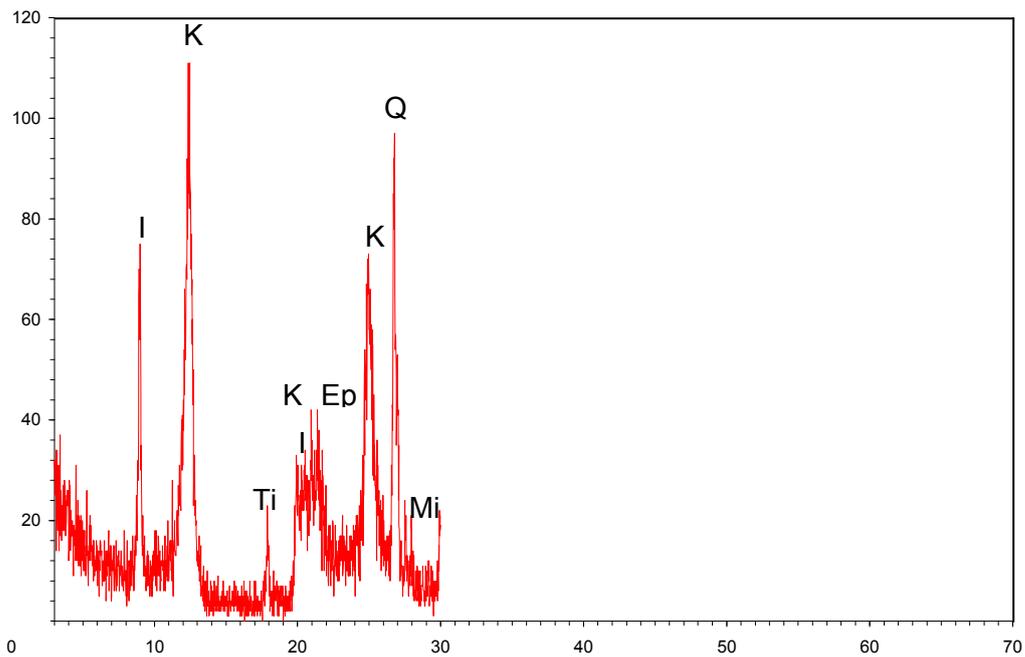


Figura 5.37 – Difratograma do Solo Vermelho (fração argila amostra 2.4523.05) sem tratamento. I: ilita; K: caulinita; Ti: titanita; Q: quartzo; Mi: Microclina; Ep: epídoto (Oliveira, 2006).

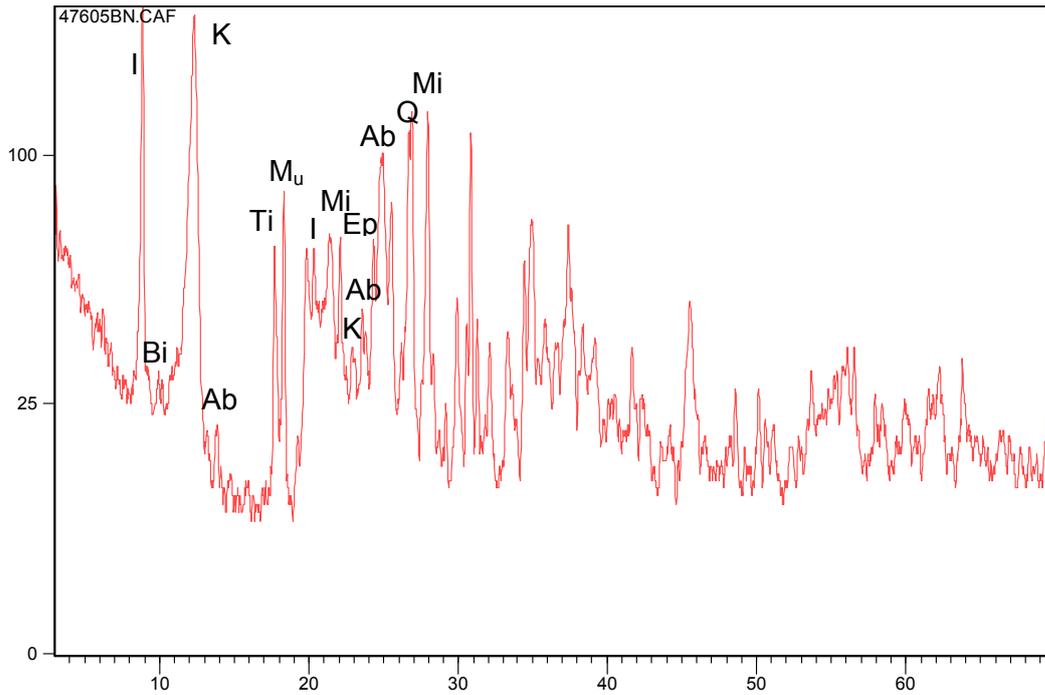


Figura 5.38 – Difratograma do Solo Laranja (fração silte amostra 2.4528.05) sem tratamento. I: ilita; K: caulinita; Ti: titanita; Q: quartzo; Mi: Microclina; Ep: epídoto; Mu: muscovita; Ab: albita; Bi: biotita (Oliveira, 2006).

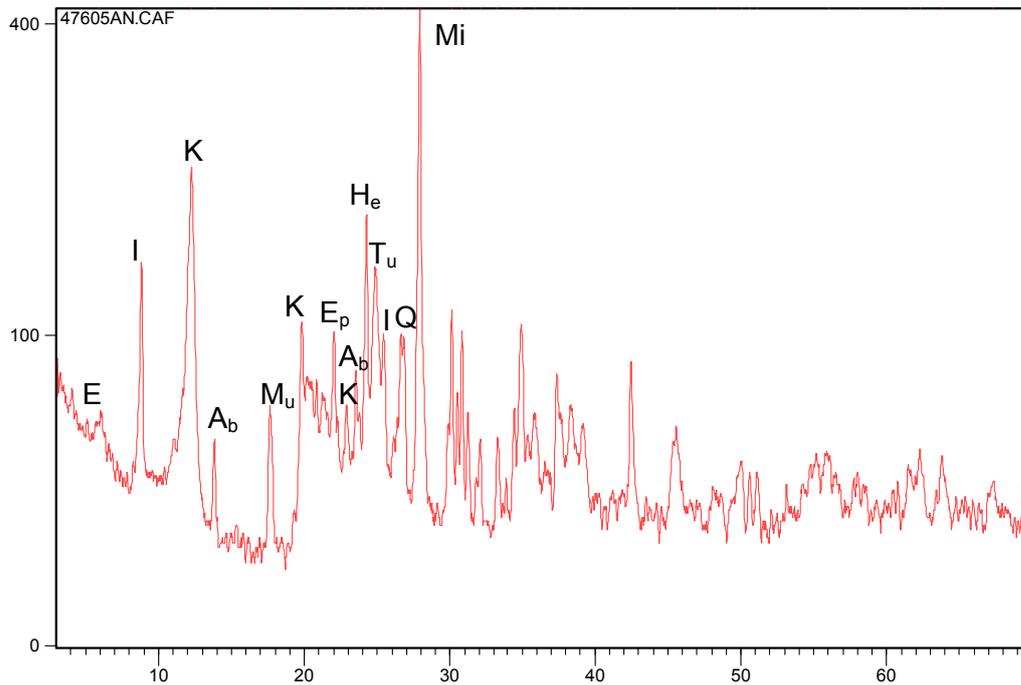


Figura 5.39 – Difratograma do Solo Amarelo (fração silte amostra 2.4521.05) sem tratamento. E: esmectita; I: ilita; K: caulinita; Ti: titanita; Tu: turmalina; Q: quartzo; Mi: Microclina; Ep: epídoto; Mu: muscovita; Ab: albita; Bi: biotita He: hematita (Oliveira, 2006).

Mi

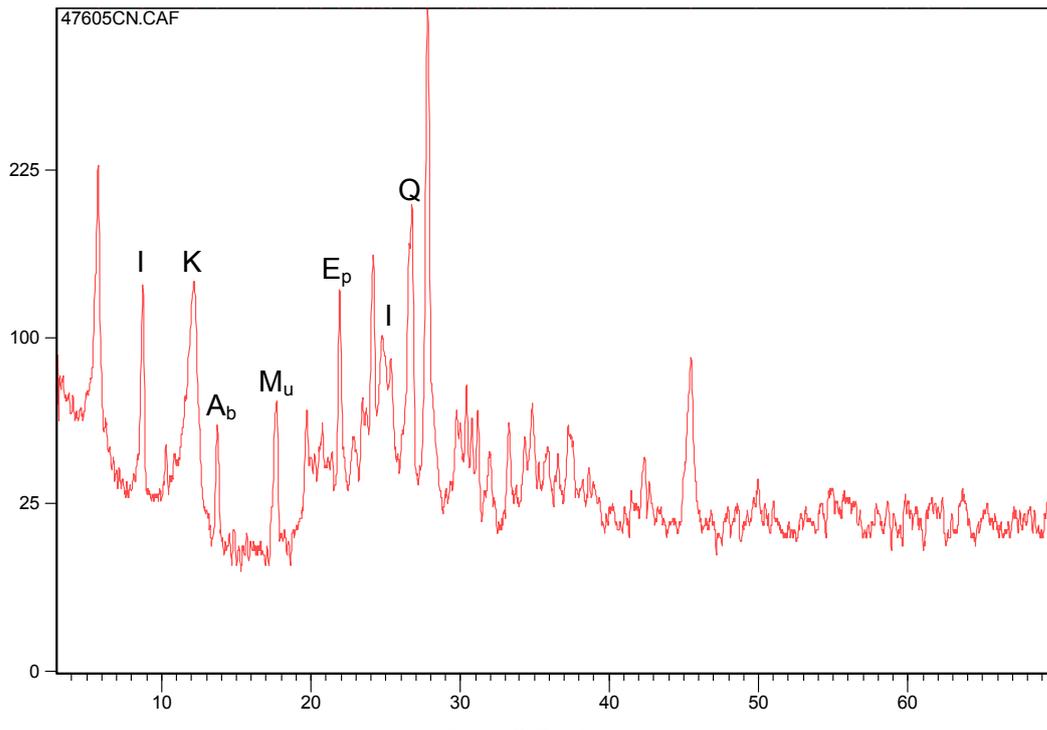


Figura 5.40 – Difratograma do Solo Branco (fração silte amostra 2.4524.05) sem tratamento. E: esmectita; I: ilita; K: caulinita; Q: quartzo; Mi: Microclina; Ep: epídoto; Mu: muscovita; Ab: albita (Oliveira, 2006).

Em um difratograma, picos estreitos, simétricos e bem definidos (mais intensos) caracterizam mineral com estrutura cristalina bem definida. No difratograma também podem ser identificados picos menos intensos, conforme foi observado. A Tabela 5.14 resume os resultados dos difratogramas realizados.

No caso de rochas ígneas e metamórficas ácidas brasileiras, os dados da literatura indicam o quartzo, o feldspato e as micas como os minerais mais comuns na fração grossa. Na fração argila, o mineral argílico predominante é a caulinita e os óxidos, especialmente nas camadas mais superficiais (Souza Neto *et al.*, 2001). São essas características que são observadas nos solos estudados.

Conforme observado por Oliveira (2006) a análise mineralógica do perfil de intemperismo revelou que o quartzo é o mineral de maior estabilidade química, seguindo-lhe o feldspato potássico (microclina) e a mica (muscovita).

Os minerais neoformados mais representativos pertencem ao grupo da caulinita, como produtos da alteração dos feldspatos e das micas, observando-se também a presença de ilita e hematita, provavelmente como produtos de alteração da biotita.

Tabela 5.14 – Minerais identificados por difratometria de raios-X (Oliveira, 2006).

<i>Amostras</i>	<i>Solo</i>	<i>Picos mais intensos</i>	<i>Picos menos intensos</i>
2.4108.05	Marrom	Caulinita Ilita Microclina Quartzo	Muscovita
2.4523.05	Vermelho	Caulinita Ilita Quartzo Titanita	Epidoto Microclina
2.4528.05	Laranja	Caulinita Ilita Quartzo	Albita Biotita Epidoto Microclina Muscovita Titanita
2.4521.05	Amarelo	Albita Caulinita Hematita Ilita Muscovita Turmalina	Epidoto Esmectita Quartzo
2.4524.05	Branco	Caulinita Ilita Microclina Muscovita Quartzo	Albita Biotita Epidoto Esmectita Hematita Turmalina

5.2.6. Caracterização Microestrutural

A compreensão dos mecanismos que controlam o comportamento dos solos muitas vezes requer um estudo de sua micro-estrutura. Trabalhos desenvolvidos na década de 1970 (por exemplo, Collins e McGown, 1974; Mitchell, 1976) mostraram que os diferentes tipos de arranjos e interações entre as partículas podem ser relacionados – ao menos qualitativamente – a propriedades de engenharia dos solos. A análise microscópica de solos permite identificar a micro-estrutura e a composição das partículas.

Com o intuito de complementar as análises físicas já disponíveis e o estudo da mineralogia dos solos, foram analisadas sob microscópio óptico amostras indeformadas de solo de quatro diferentes profundidades (Oliveira, 2006). As análises foram realizadas no microscópio petrográfico, também conhecido como microscópio óptico polarizante, do DCMM – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. As fotografias foram obtidas

fazendo-se atravessar luz polarizada por lâminas finas do material na condição indeformada. Essas lâminas foram obtidas por desbaste mecânico de amostras previamente secas e lentamente impregnadas com resina epóxi, o que resulta numa espessura final de cerca de 30 μm . Foram analisadas amostras de solo indeformadas, representativas do solo Branco, Amarelo, Laranja e Marrom com aumento de 25 vezes. Com o auxílio de técnicas de processamento e análise digital de imagem, a micromorfologia é capaz de fornecer resultados de porosidade com precisão elevada. A descrição detalhada das análises pode ser obtida em Oliveira (2006).

As figuras a seguir apresentam os dados de morfologia dos poros, de mineralogia do solo e de sua microestrutura. Podem-se verificar no perfil modificações principalmente em relação à estrutura do solo e à porosidade. Através da análise das amostras de diferentes profundidades observa-se que há um elevado percentual de macroporos nos solos mais intemperizados. Os vazios são representados por vários tons de azul. O solo Marrom apresenta macroporos e grande quantidade de óxidos precipitados (Figura 5.41).

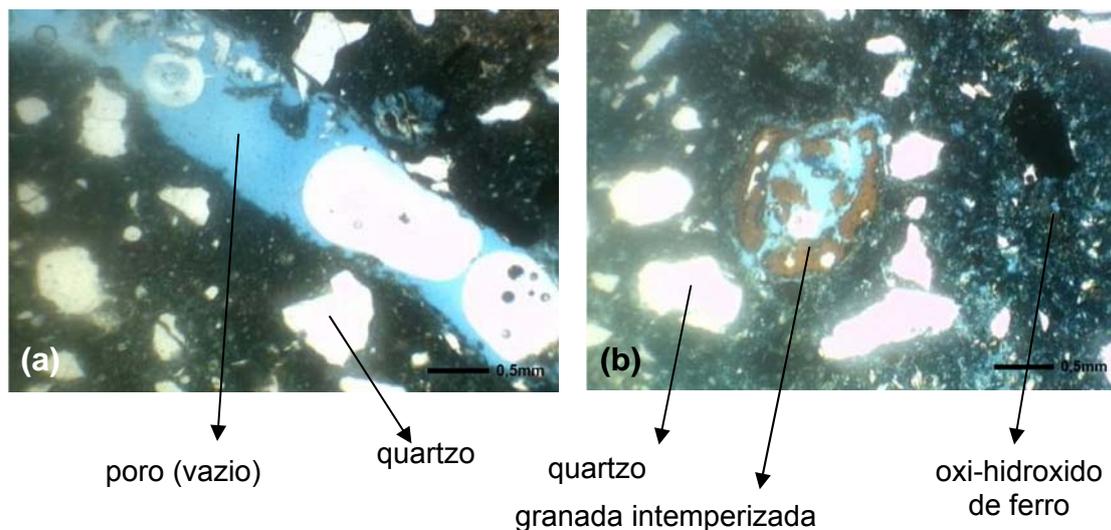


Figura 5.41 – Fotomicrografia do solo Marrom. Aumento de 25 vezes. Luz plana. (a) Macroporo (1 mm) em forma de canal. (b) Óxidos precipitados.

O solo Laranja apresenta diâmetro de poros menores comparados aos do solo Marrom. Também observa-se a grande quantidade de microporos, bem como quartzos possivelmente recristalizados alinhados e óxidos de ferro precipitados formando faixas, fato evidenciado macroscopicamente no solo Laranja pelos veios pretos (Figura 5.42).

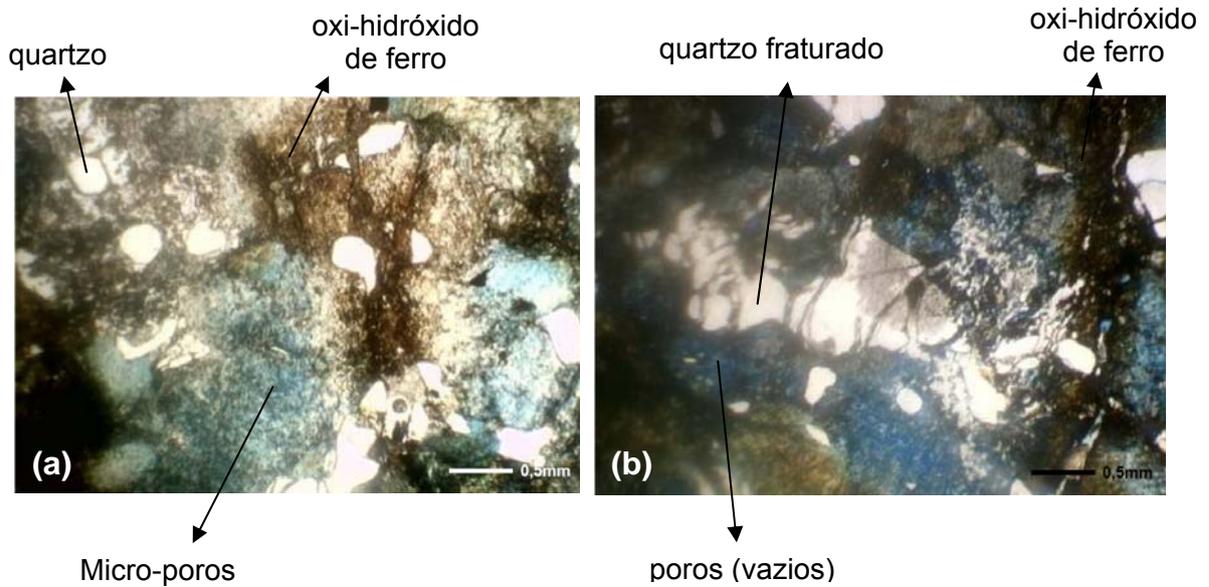


Figura 5.42 – Fotomicrografia do solo Laranja. Aumento de 25 vezes. Luz plana. (a) Microporos. (b) Microporos, bem como quartzos possivelmente recristalizados alinhados e óxidos de ferro precipitados formando faixas.

No solo Amarelo (Figura 5.43) visualizam-se plagioclásio e epidoto muito alterados e quartzo fraturado. Isto confirma que o solo Amarelo se encontra menos intemperizado que o Laranja já que, no solo Laranja (Figura 5.42), as formas dos minerais já não são mais bem determinadas.

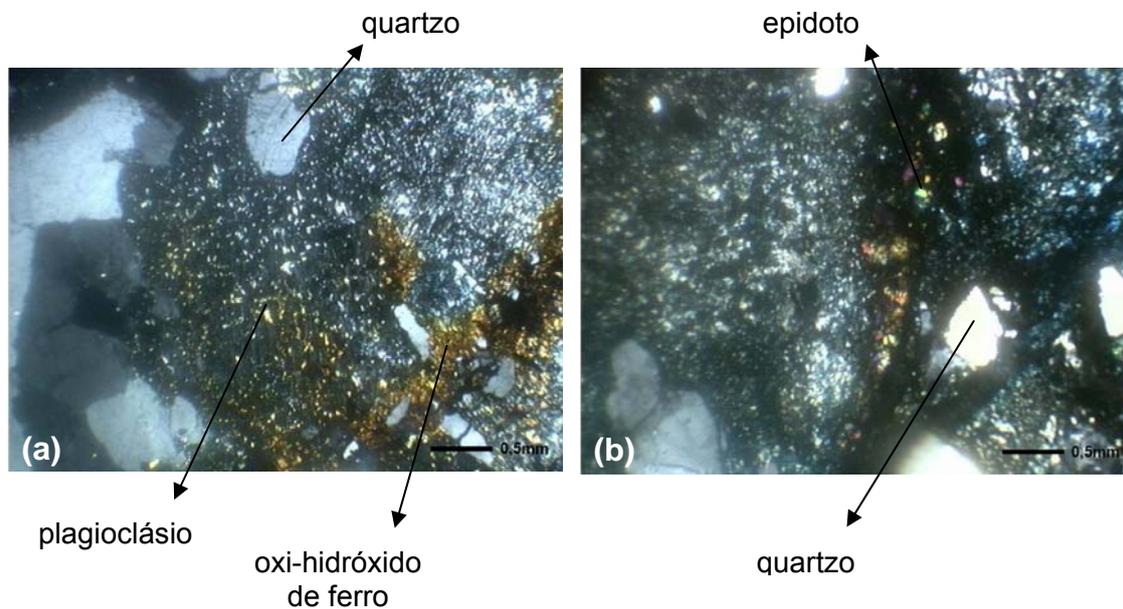


Figura 5.43 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Aumento de 25 vezes. Luz plana. (a) Plagioclásio alterado. (b) Epidoto alterado.

No solo Branco observa-se a presença de minerais mais preservados que em todos os outros solos. Nota-se a presença de plagioclásio, microclina e epidoto, muito alterados, além do quartzo (Figura 5.44).

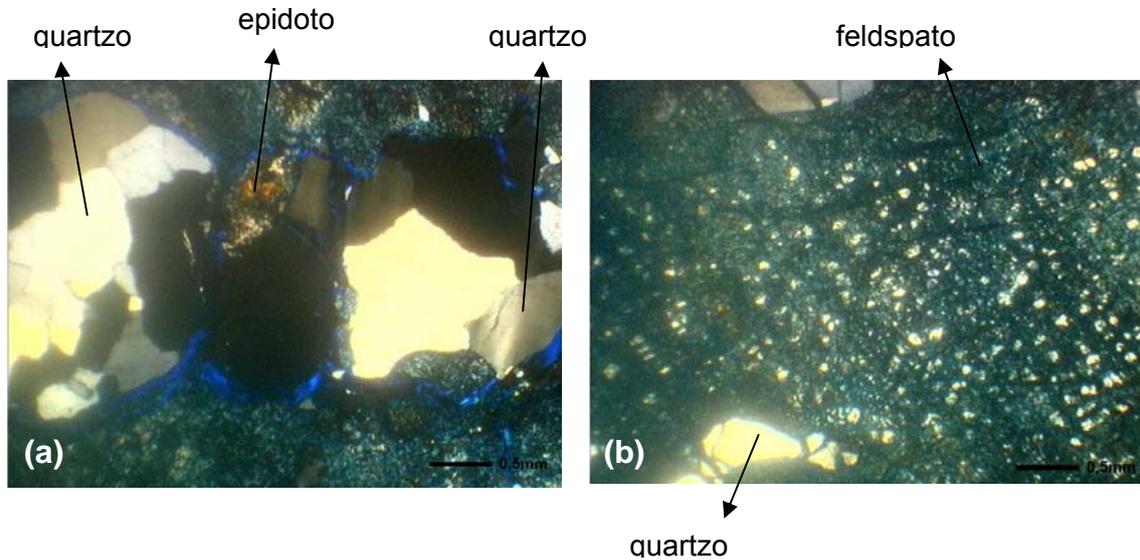


Figura 5.44 – Fotomicrografia do solo Branco. Aumento de 25 vezes. Luz plana. (a) Quartzo. (b) Mineral se alterando.

Com base na microscopia ótica, pode-se dizer que o perfil residual apresenta, de forma geral:

- Presença de quartzo angular em todos os solos;
- Macro-poros no solo Marrom e micro-poros nos demais solos;
- Pigmentação por óxido de ferro, em maior quantidade no solo Marrom e em menor quantidade no solo Laranja.

5.3. Variação dos Índices Físicos com Processos de Secagem e Umedecimento

Com os dados dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de sucção, compressão simples e compressão diametral, que foram secados e umedecidos a partir da umidade de campo, é possível analisar a variação dos índices físicos dos solos estudados com estes processos. Como citado anteriormente, o umedecimento dos corpos-de-prova se deu através de vapor d'água e a secagem foi feita expondo-os ao ar. Os dados provenientes desses corpos-de-prova, indeformados e compactados, foram avaliados e os resultados são apresentados a seguir.

Na Figura 5.45 são apresentadas as variações do peso específico seco dos solos indeformados em função do índice de vazios. Os limites superior e inferior desses parâmetros para as diferentes categorias de solo se sobrepõem, mas há uma tendência do solo Branco apresentar os menores índices de vazios e maiores pesos específicos secos, seguido do Amarelo, Laranja e Vermelho. O solo Marrom tem a maior variação, cobrindo quase toda a faixa de valores encontrada para o perfil. Para o solo Branco o peso específico seco situa-se entre 19 e 11 kN/m³ e o índice de vazios entre 0,4 e 1,3. O peso específico seco do material Amarelo varia entre 16 e 11 kN/m³ e o índice de vazios entre 0,6 e 1,4. Para o solo Laranja o peso específico seco varia entre 15 e 10 kN/m³ e o índice de vazios entre 0,8 e 1,6. O peso específico seco do solo Vermelho varia entre 16 e 10 kN/m³ e o índice de vazios entre 0,6 e 1,5. Nas amostras do solo Vermelho foram desprezados os dados das amostras que apresentaram índice de vazios maior do que 1,6. O peso específico seco do solo Marrom varia entre 17 e 10 kN/m³ e o índice de vazios entre 0,5 e 1,5. Também para o solo Marrom, as amostras que apresentaram índice de vazios superior a 1,5 foram desprezadas, pois estes valores estão muito diferentes das demais.

Adicionando-se uma linha de tendência aos dados obtém-se a equação:

$$\gamma_s = -6,32 \cdot \ln e + 13,22 \quad \text{(Equação 5.1)}$$

Por essa equação, o grau de correlação entre γ_s e e é de 0,9976, sugerindo que as medidas de massa e volume efetuadas nas diferentes amostras foram adequadas, ou seja, não apresentaram erros experimentais relevantes.

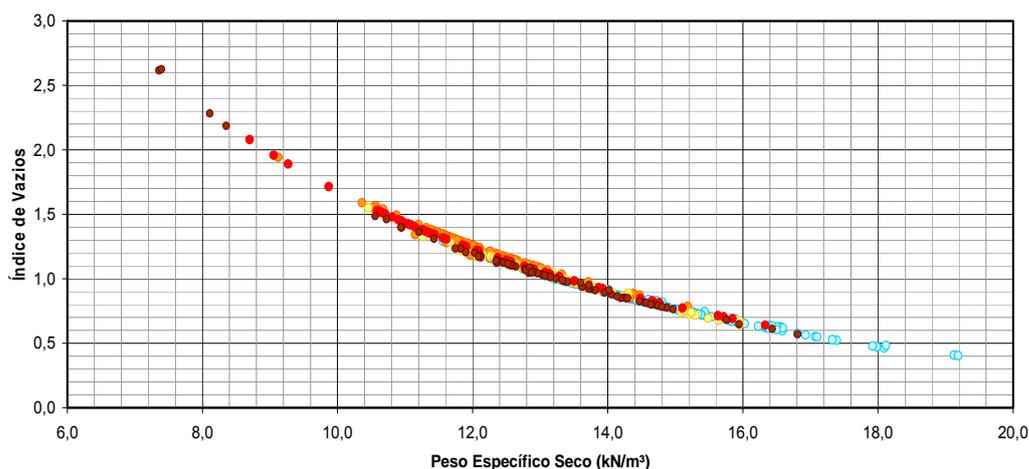


Figura 5.45 – Variação do Peso Específico Seco com o Índice de Vazios para todos os solos.

Nas figuras 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47 e 5.48 são apresentadas as relações entre o teor de umidade gravimétrico e o teor de umidade volumétrico

para os solos Branco, Amarelo, Laranja, Vermelho e Marrom. De forma geral, os solos apresentam relações entre os teores de umidade volumétrico e gravimétrico similares.

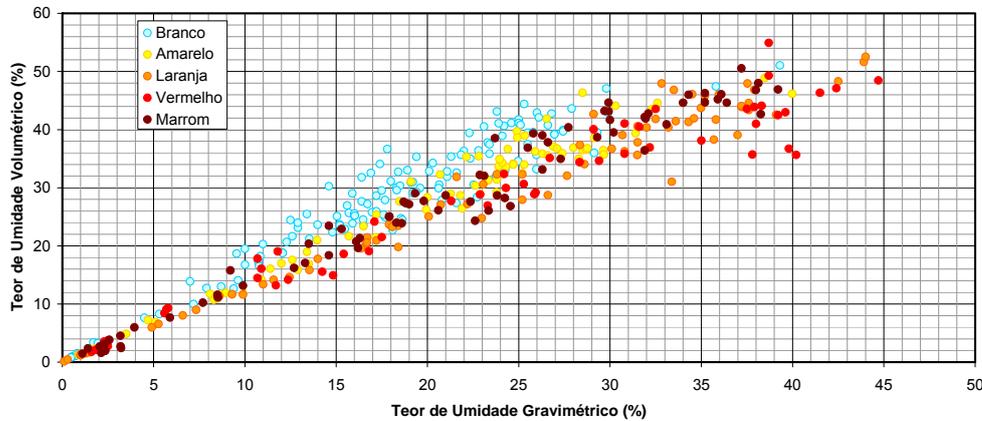


Figura 5.46 – Relação entre o Teor de Umidade Volumétrico e Teor de Umidade Gravimétrico para todas as amostras.

A relação entre o teor de umidade volumétrico e gravimétrico de um solo equivale ao peso específico seco do material. Ou seja, a partir destes gráficos é possível visualizar a variação de peso específico seco dos solos. Na figura abaixo apresenta-se a relação entre o teor de umidade gravimétrico e o teor de umidade gravimétrico para o solo Branco. São representadas linhas de mesmo peso específico seco médio (1,5474 gf/cm³), máximo (2,1277 gf/cm³) e mínimo (1,2195 gf/cm³).

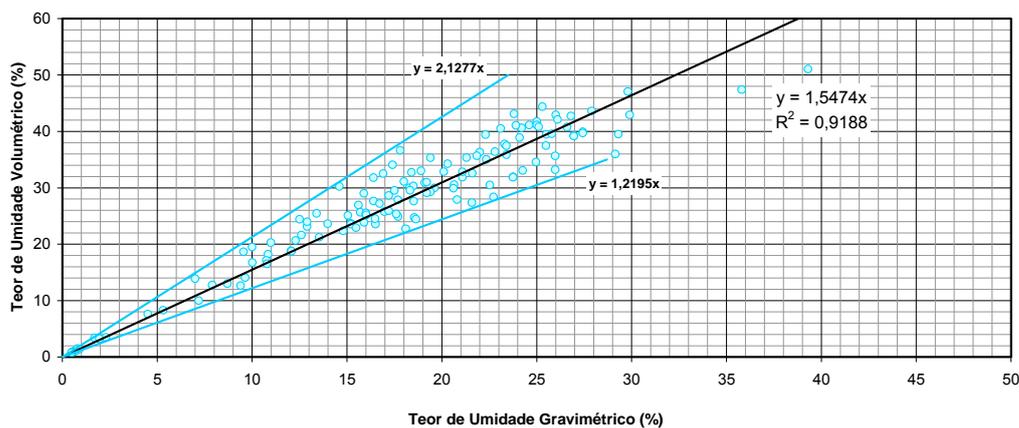


Figura 5.47 – Relação entre o Teor de Umidade Volumétrico e Teor de Umidade Gravimétrico para o solo Branco.

A mesma relação é apresentada para cada um dos solos do talude. O solo Amarelo apresenta peso específico médio de 1,3542 gf/cm³ e valores limites de 1,1236 gf/cm³ (mínimo) e 1,6667 gf/cm³ (máximo) (ver Figura 5.48). O solo

Laranja apresenta peso específico médio de $1,2147 \text{ gf/cm}^3$ e valores limites de $1,0417 \text{ gf/cm}^3$ (mínimo) e $1,5152 \text{ gf/cm}^3$ (máximo) (ver Figura 5.49). Para o solo Vermelho o peso específico médio é de $1,1833 \text{ gf/cm}^3$ e valores limites de $0,9524 \text{ gf/cm}^3$ (mínimo) e $1,7241 \text{ gf/cm}^3$ (máximo) (ver Figura 5.50).

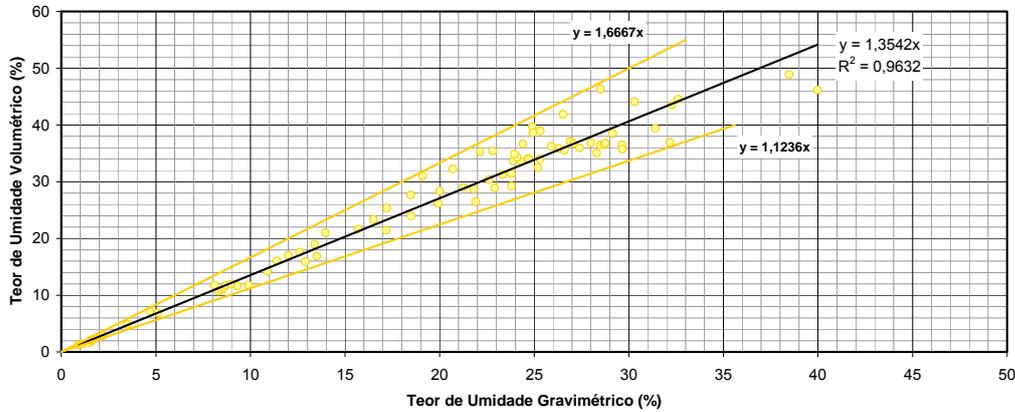


Figura 5.48 – Relação entre o Teor de Umidade Volumétrica e Teor de Umidade Gravimétrica para o solo Amarelo.

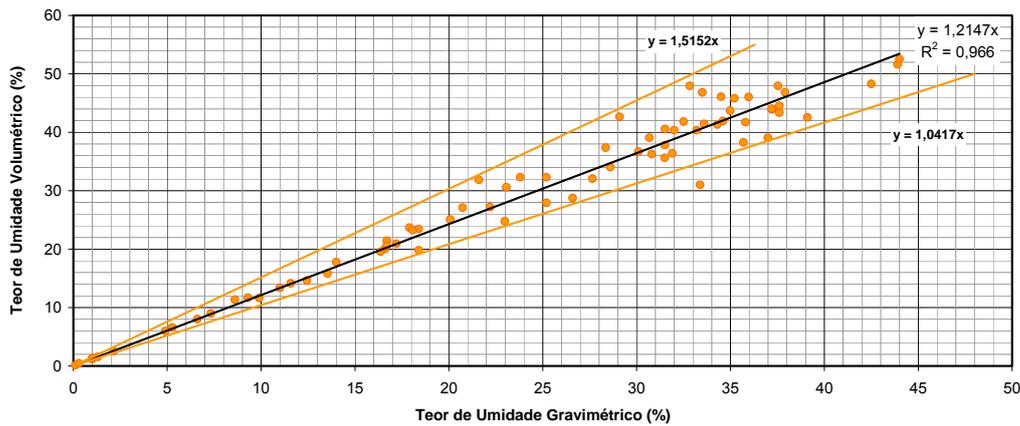


Figura 5.49 – Relação entre o Teor de Umidade Volumétrica e Teor de Umidade Gravimétrica para o solo Laranja.

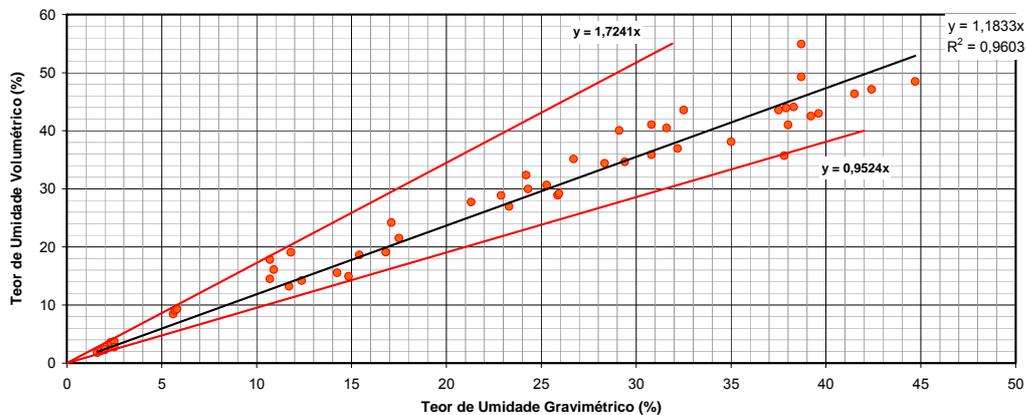


Figura 5.50 – Relação entre o Teor de Umidade Volumétrica e Teor de Umidade Gravimétrica para o solo Vermelho.

Do solo Vermelho ao Solo Branco, há a tendência do peso específico das amostras aumentar com a profundidade. A exceção é apresentada pelo solo Marrom que apresenta peso específico seco superior ao do solo Vermelho. O peso específico médio do solo Marrom é de 1,3129 gf/cm^3 , variando entre 1,8182 gf/cm^3 e 1,0417 gf/cm^3 . Cabe ressaltar que esses valores não se referem apenas a amostras em teores de umidade natural e sim de amostras umedecidas e ressecadas.

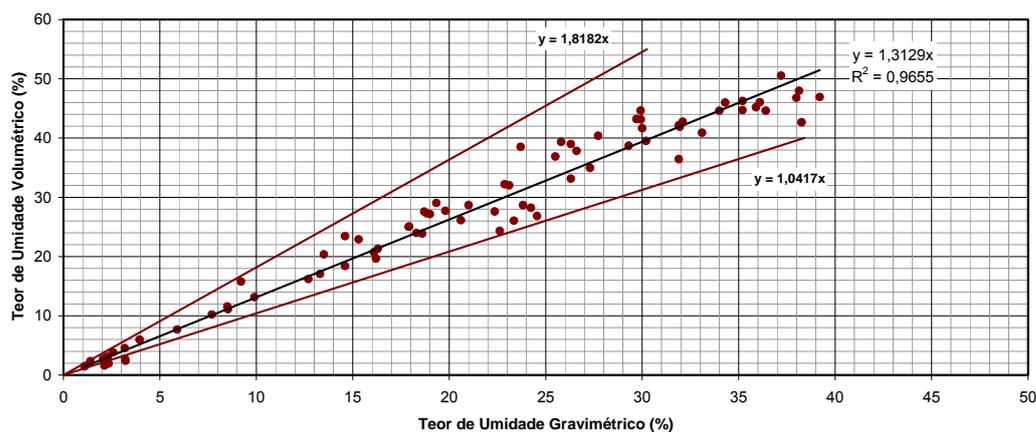


Figura 5.51 – Relação entre o Teor de Umidade Volumétrico e Teor de Umidade Gravimétrico para o solo Marrom.

A Tabela 5.15 resume a variação de peso específico seco encontrada para os solos. A maior variação é do solo Branco, seguido do solo Marrom e Vermelho. A menor variação é do solo Laranja.

Tabela 5.15 – Variação do peso específico seco para os solos estudados.

Solo	Peso Específico Seco (gf/cm^3)		
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
Branco	1,219	2,127	1,547
Amarelo	1,123	1,666	1,354
Laranja	1,041	1,515	1,214
Vermelho	0,952	1,724	1,183
Marrom	1,041	1,818	1,312

Nas figuras 5.49 a 5.53 são apresentadas as variações de índice de vazios com o grau de saturação. Para o solo Marrom as amostras 2.4101.05 e 2.4102.05 (pontos em laranja no gráfico) foram desprezadas na determinação da média por apresentarem um valor de índice de vazios díspar das demais. Observa-se que, na média, o valor do índice de vazios é constante para cada solo. O solo Vermelho é o que apresentou maior dispersão no índice de vazios.

O solo Branco apresenta os menores índices de vazios seguido do solo Amarelo, Laranja e Vermelho. O solo Marrom, mais intemperizado, apresenta índices de vazios, na média, inferiores aos dos solos Laranja e Vermelho.

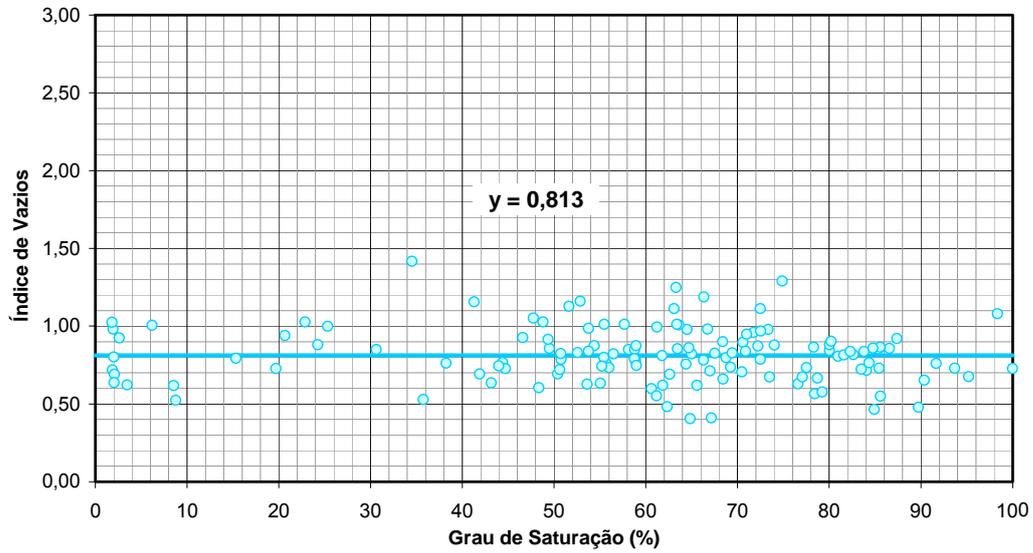


Figura 5.52 – Variação do Índice de Vazios com o Grau de Saturação para o solo Branco.

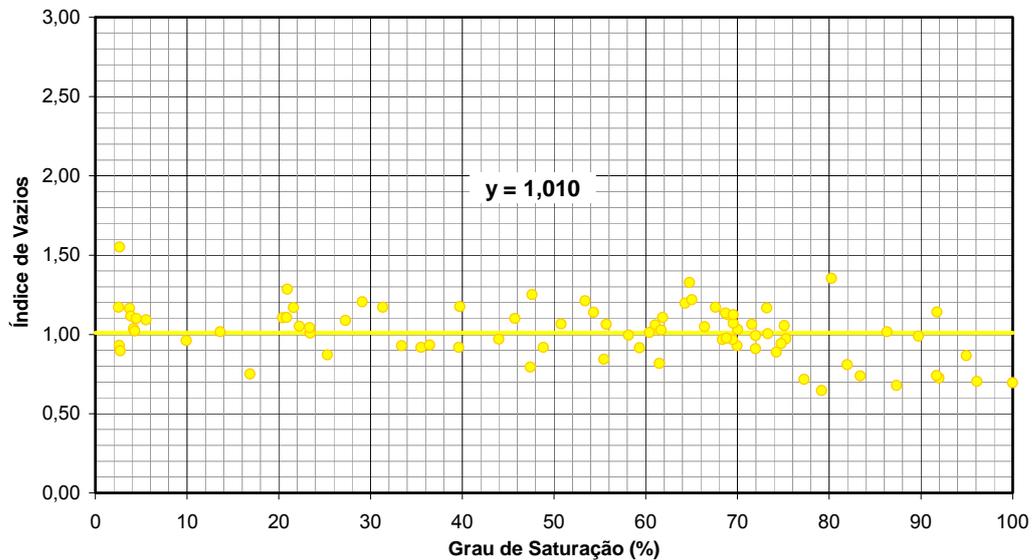


Figura 5.53 – Variação do Índice de Vazios com o Grau de Saturação para o solo Amarelo.

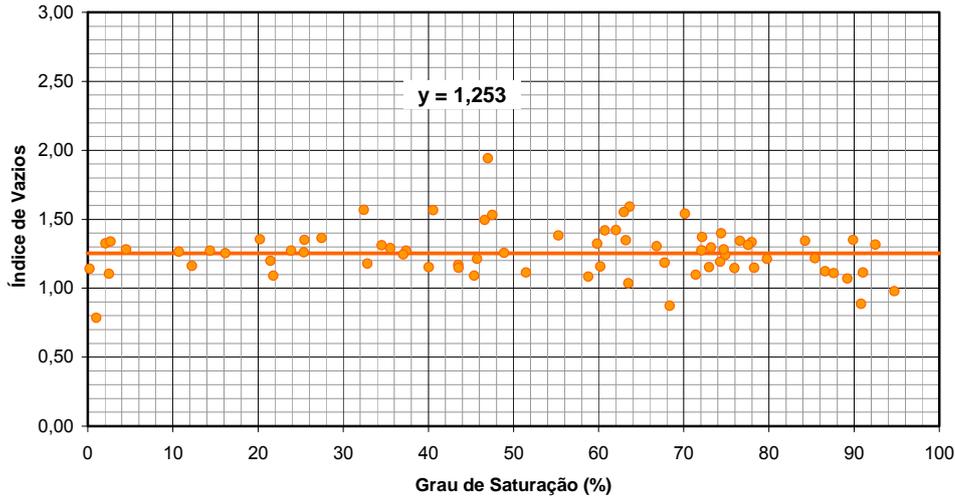


Figura 5.54 – Variação do Índice de Vazios com o Grau de Saturação para o solo Laranja.

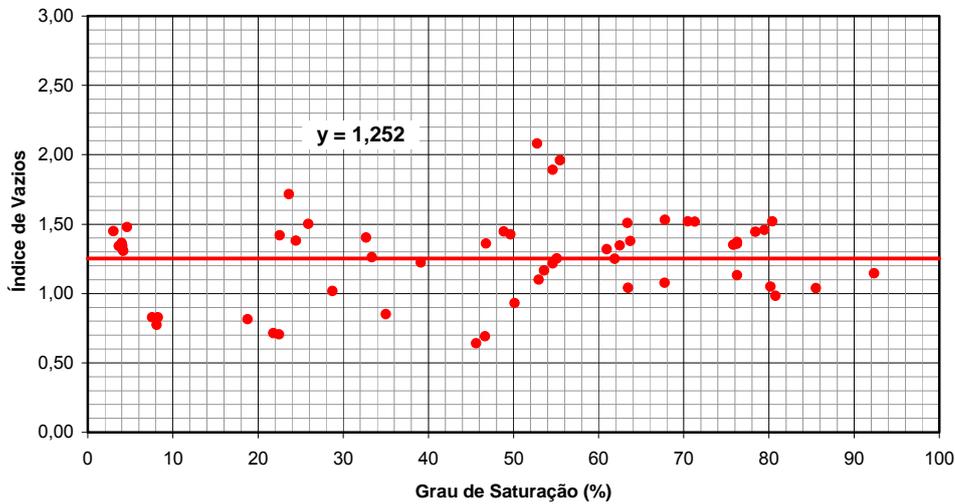


Figura 5.55 – Variação do Índice de Vazios com o Grau de Saturação para o solo Vermelho.

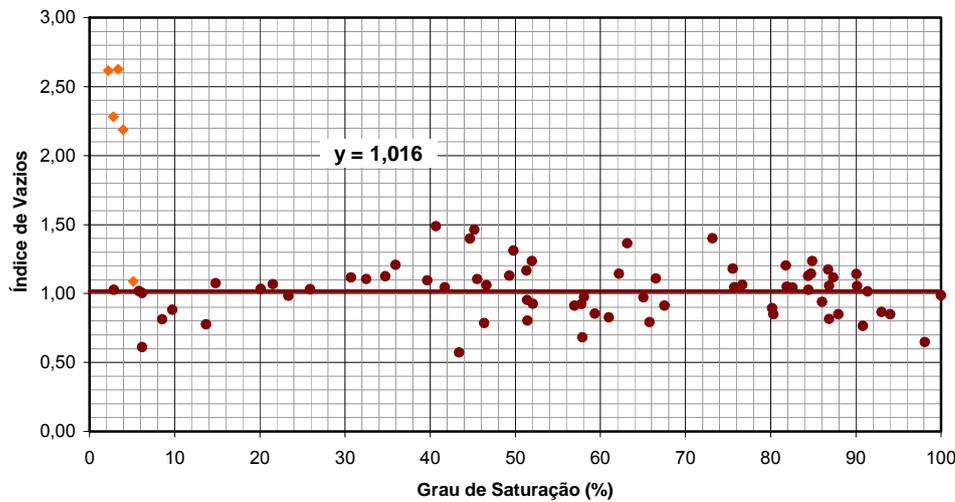


Figura 5.56 – Variação do Índice de Vazios com o Grau de Saturação para o solo Marrom.

A Tabela 5.16 resume os dados apresentados para a variação do índice de vazios. O maior desvio padrão é o do solo Marrom, com 0,37 e do solo Vermelho com 0,31. Os solos Branco, Amarelo e Laranja apresentam menor variação para o índice de vazios com desvio padrão de cerca de 0,18. Tais resultados sugerem, de um modo geral que, à exceção dos solos Marrom e Vermelho, os demais materiais em estudo não apresentam variações significativas de volume com variações do grau de saturação, ou seja, os mesmos podem ser considerados como incompressíveis em presença de variações de umidade.

Tabela 5.16 – Variação do índice de vazios para os solos estudados.

Solo	Índice de vazios	
	Valor médio	Desvio padrão
Branco	0,813	0,18
Amarelo	1,010	0,17
Laranja	1,253	0,18
Vermelho	1,252	0,31
Marrom	1,016	0,37

De acordo com Barroso *et al.* (1996) as relações entre peso específico, porosidade e teor de umidade de saturação com os estágios de alteração são não lineares e a dispersão dos dados aumenta com a alteração, provavelmente refletindo a heterogeneidade do processo de intemperismo.

O limite de contração dos solos é que divide o estado do solo entre semi-sólido e sólido. O valor da sucção no limite de contração dos solos foi definido por Terzaghi e Peck (1948) como sucção de transição, pois a partir deste valor de sucção a relação variação de volume - sucção muda de comportamento.

Para avaliar o comportamento contrativo dos solos estudados, realizou-se o monitoramento da sua variação de índice de vazios com o teor de umidade. Corpos-de-prova de 10 cm de diâmetro e 2 cm de altura foram moldados a partir de blocos indeformados dos solos estudados e deixados secar, a partir da umidade natural à temperatura ambiente em cima de uma balança. Durante 20 dias o peso e a variação de volume desses corpos-de-prova foram monitorados. Ao final do período foram traçadas as curvas de índice de vazios versus teor de umidade, que estão reproduzidas na Figura 5.57. Os solos Branco e Amarelo não apresentaram redução de volume e o solo Laranja reduziu tão pouco que é difícil quantificar. Confirmou-se, desta forma o anteriormente mencionado ao se analisar os resultados apresentados nas Figuras 5.52 a 5.54. O solo Marrom foi o único que apresentou redução de volume. Não havia amostras do solo

Vermelho disponíveis para o teste e, portanto não foi possível determinar o padrão de contração desse solo. Na Figura 5.58 são apresentados os corpos-de-prova ao final do tempo de secagem.

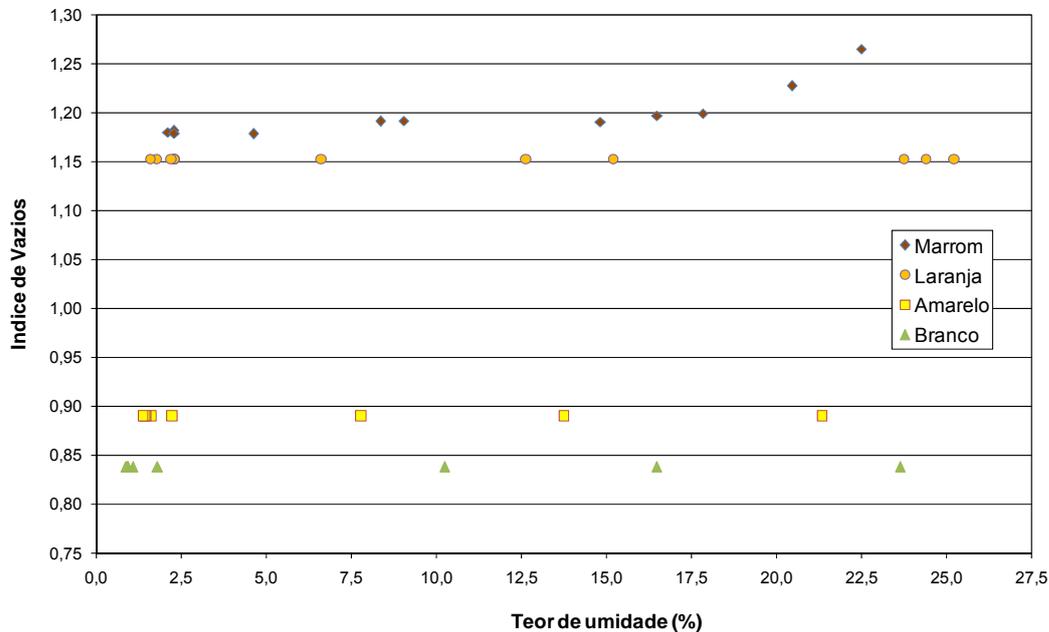


Figura 5.57 – Variação do índice de vazios versus teor de umidade de amostras indeformadas.

Neste trabalho, define-se como limite de contração como o ponto na curva índice de vazios versus teor de umidade onde não há mais variação de volume do corpo-de-prova. A Tabela 5.17 resume os valores de limite de contração determinados na Figura 5.57. Esse limite será importante na análise dos resultados mecânicos que será efetuada no Capítulo 8, pois tem grande influência no comportamento dos solos não saturados.

Tabela 5.17 – Limite de contração de amostras indeformadas.

Solo	Limite de Contração (%)
Marrom	Atingiu o índice de vazios mínimo em 15%
Vermelho	Não foi ensaiado
Laranja	Apenas soltou do anel no teor de umidade de 6,63%
Amarelo	Não apresentou contração
Branco	Não apresentou contração

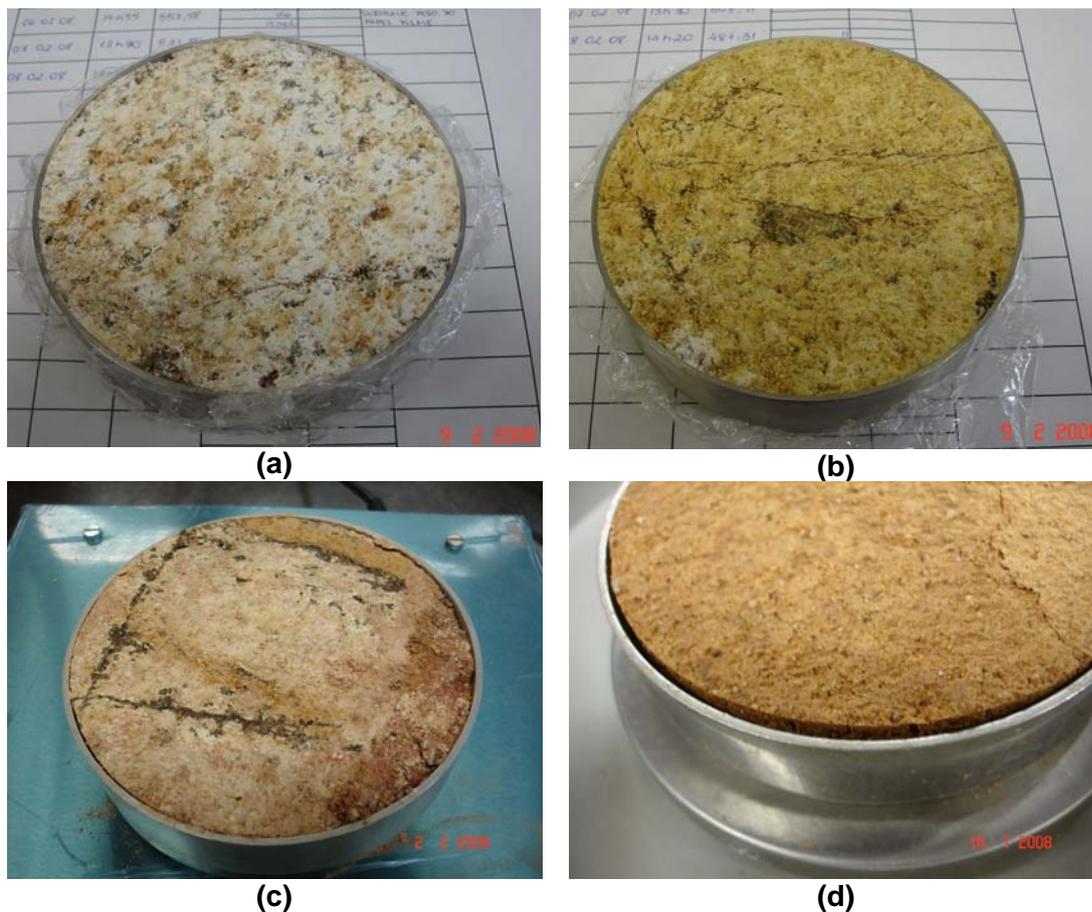


Figura 5.58 – Corpos-de-prova após secagem ao ar. (a) Branco. (b) Amarelo. (c) Laranja. (d) Marrom.

Provavelmente, os solos Branco, Amarelo e Laranja não apresentaram contração durante o período de secagem por não terem argila em sua composição e por apresentarem uma estrutura rígida, talvez cimentada, originária da rocha mãe.

Por outro lado, o solo Marrom, mais argiloso e mais intemperizado apresentou pequena redução de volume durante a secagem. O volume inicial do solo ensaiado era de $120,46 \text{ cm}^3$ para um teor de umidade de 22,5% e, ao final do teste seu volume foi reduzido para $115,60 \text{ cm}^3$ para um teor de umidade de 2,3%, o que equivale a uma redução de 4%.

Os valores médios de peso específico seco, índice de vazios e porosidade encontrados para os solos Branco, Amarelo, Laranja e Marrom estão apresentados na Tabela 5.24. Esses valores serão utilizados oportunamente quando necessários dados médios representativos das categorias estudadas.

Tabela 5.18 – Valores de Peso Específico Seco, Índice de Vazios e Porosidade representativos para cada tipo de solo.

Solo	Peso Específico Seco (kN/m³)	Índice de Vazios	Porosidade
Branco	15,18	0,813	0,443
Amarelo	13,28	1,010	0,499
Laranja	11,92	1,253	0,553
Vermelho	11,60	1,252	0,547
Marrom	12,88	1,016	0,500

A porosidade determinada pelos índices físicos das amostras de solo é comparada com os valores de porosidade determinados pelo ensaio de porosimetria de mercúrio na Tabela 5.19. O ensaio de injeção de mercúrio permite obter a porosidade interconectada, representada pelo somatório das áreas dos poros interconectáveis dos solos. Ou seja, medem-se apenas os poros que se interconectam e que são alcançados pelo mercúrio intrudido.

Analisando-se estes resultados verifica-se que a porosidade interconectada dos solos é bastante inferior à porosidade total obtida nos índices físicos. A maior diferença é encontrada no solo Marrom que apresenta 30,17% de poros interconectados e 50% de porosidade total. Neste solo 60,34% dos poros estão interconectados. A redução da porosidade interconectada em relação à porosidade total se deve à forma e ao embricamento dos grãos, a presença de minerais de granulometria fina (siltes e argilas), que ocupam os espaços intergranulares e a presença dos materiais cimentantes, que podem preencher total ou parcialmente os poros.

Tabela 5.19 – Comparação entre porosidades.

Solo	Porosidade intrudida por Hg (%)	Porosidade determinada pelos índices físicos (%)	Diferença de porosidade (%)	Porcentagem de grãos interconectados na porosidade total (%)
Marrom	30,17	50,00	19,83	60,34
Vermelho	42,07	54,70	12,63	76,91
Laranja	43,01	55,30	12,29	77,78
Amarelo	39,09	49,90	10,81	78,34
Branco	33,29	44,30	11,01	75,15

De acordo com Sandroni (1985), os solos residuais podem apresentar uma ampla faixa de porosidade, mesmo quando derivados de uma mesma rocha

matriz. A Tabela 5.20 apresenta valores típicos de densidade de grãos e índice de vazios de solos residuais encontrados no Brasil. Observa-se que para solos originários da rocha gnaisse são reportados na literatura valores de índice de vazios variando entre 0,3 e 1,1. No perfil de solo estudado foram encontrados valores de índice de vazios variando entre 0,813 (solo Branco) a 1,253 (solo Laranja).

Tabela 5.20 – Variações típicas no índice de vazios in situ em solos residuais brasileiros (Sandroni, 1985).

<i>Rocha Matriz</i>	<i>Densidade dos Grãos</i>	<i>Índice de Vazios</i>
<i>Gnaisse</i>	2,60 – 2,80	0,3 – 1,1
<i>Quartzito</i>	2,65 – 2,75	0,5 – 0,9
<i>Xisto</i>	2,70 – 2,90	0,6 – 1,2
<i>Filito e Ardósia</i>	2,75 – 2,90	0,9 – 1,3
<i>Basalto</i>	2,80 – 3,20	1,2 – 2,1

5.4. Conclusões

Os solos estudados nesse trabalho foram coletados de um talude, proveniente de um corte, de aproximadamente 12 metros de altura. Esses solos são originários de uma rocha granito-gnaisse, de composição quartzo-feldspática. Conforme exposto no Capítulo 4, até a profundidade amostrada (em torno de 25 metros) a rocha encontra-se bastante fraturada. Esse intenso fraturamento influi consideravelmente na intemperização do material e, conseqüentemente nas características dos solos formados. De acordo com informações tátil-visuais de campo, o grau de intemperismo dos solos originados varia tanto na vertical quanto na horizontal. No entanto, para facilitar a compreensão do talude e a nomenclatura dos solos, os mesmos foram divididos em categorias de acordo com uma classificação visual. O perfil foi dividido em solos “Branco”, “Amarelo”, “Laranja”, “Vermelho” e “Marrom”, sendo que o solo Branco é o menos intemperizado e o mais profundo, e o solo Marrom é o mais intemperizado e mais próximo do topo do talude.

Pode-se verificar no perfil modificações principalmente em relação à estrutura do solo e à porosidade. O intemperismo provocou nos solos um aumento da porosidade e o desenvolvimento de minerais secundários. A formação de meso poros e macro poros com a atuação do intemperismo pode ser avaliada através do microscópio ótico. Conforme pode ser visto na Figura

5.20, a distribuição do diâmetro dos poros para o solo Marrom se dá na forma bimodal, ou seja, existe uma concentração de poros em dois diâmetros distintos, característica de solos residuais que apresentam poros entre partículas e poros entre agregados.

Mesmo com a existência de um intemperismo diferencial, os dados obtidos através da difratometria de raios X mostram uma variação nítida do grau de intemperismo com a profundidade. A análise mineralógica da rocha e dos solos revelou que o quartzo é um mineral sempre presente. Ainda se fazem presentes na rocha os minerais plagioclásio (albita), microclina (feldspato potássico) e biotita. Na difratometria de raios X, os picos mais intensos e constantes em todos os solos são da caulinita e da ilita. A caulinita é produto da alteração dos feldspatos e a ilita provavelmente é produto da alteração da biotita. Na rocha e nos solos Branco e Amarelo há ainda a presença de esmectita, que não é encontrada nos solos mais superficiais. Nestes, a esmectita pode ter se transformado em caulinita e/ou ilita. Nas rochas que deram origem ao perfil, a esmectita é de origem hidrotermal.

A composição granulométrica do perfil estudado é bastante variável. O teor médio de argila e silte é decrescente com a profundidade e o inverso ocorre com as frações grossas: à medida em que a profundidade aumenta, os teores de areia e pedregulho aumentam. Esta variação está provavelmente associada ao intemperismo.

O limite de liquidez e o limite de plasticidade tendem a aumentar com o decréscimo da profundidade. O limite de liquidez varia de 32 (solo Branco) a 46 (solo Marrom). O valor do limite de plasticidade varia de 27 (solo Branco) a 32 (solo Marrom). Em campo, o teor de umidade das amostras coletadas situava-se abaixo do limite de plasticidade.

O índice de vazios tem o menor valor na profundidade de 11 metros, no solo Branco, em média apresentando o valor de 0,5. Esse parâmetro cresce com o decréscimo da profundidade, atingindo seu maior valor nos solos Laranja e Vermelho, próximo de 1,5. Para o solo próximo ao topo do talude o valor do índice de vazios volta a decrescer, atingindo valores até de 0,6.

O estudo de variação dos índices físicos das amostras de solo sujeitas a processos de secagem e umedecimento mostrou que o índice de vazios desses solos praticamente não se altera com seu grau de saturação. Isto pode ser consequência da cimentação dos solos residuais. Nos solos pouco intemperizados (solos saprolíticos), a agregação ainda é pequena e a estrutura é influenciada pela estrutura da rocha mãe. Nos solos residuais mais

intemperizados, a agregação é efeito da cristalização, alteração mineral e precipitação de material cimentante, como óxidos e silicatos.

Nas análises químicas é possível visualizar a intemperização do perfil através dos elementos químicos presentes. Os solos mais profundos apresentam em sua composição uma maior quantidade de cálcio e magnésio, enquanto que nos solos mais superficiais observa-se uma maior quantidade de alumínio e hidrogênio. Devido à essa composição, o solo Branco apresenta um valor de pH igual a 6, enquanto que no solo Marrom o pH é igual a 4,2. Tanto o hidrogênio quanto o alumínio tem caráter ácido. Também observa-se que o teor de SiO_2 é mais alto no solo Branco que no solo Marrom, enquanto que os teores de Fe_2O_3 e Al_2O_3 praticamente dobram do solo Branco ao Solo Marrom. Os óxidos de ferro e alumínio são responsáveis pela cimentação do material.