

5

Apresentação e análise dos resultados

5.1.

Caracterização física

5.1.1.

Propriedades índice

Na caracterização física foram realizados os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, peso específico dos grãos e granulometria por peneiramento e sedimentação.

Informações específicas sobre a execução dos ensaios, os quais seguiram as prescrições da ABNT, podem ser encontradas no Capítulo 4. As determinações de peso específico dos grãos foram realizadas tanto segundo a NBR 6508 (ABNT, 1984b) como segundo o procedimento DNER-ME 093/94 (DNER, 1994). O método do DNER possui como vantagem uma maior simplicidade – para a eliminação de ar, fervura é utilizada no lugar da aplicação de vácuo. Apesar de o solo ensaiado provir de peneiras distintas (4,8 mm na norma da ABNT e 2,0 mm no método do DNER), a pequena quantidade de pedregulho presente nos solos do perfil permite a comparação direta entre os pesos específicos obtidos com os dois procedimentos. Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de caracterização física

Solo Marrom												
Registro da amostra	Profundidade (m)	Umidade natural - w_{nat} (%)	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) DNER	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
2.4101.05	1,5	26,7				41	26	15	0	34	54	12
2.4102.05	1,3	26,7		2,733		42	29	13				
2.4115.05	1,1	24,3	2,714	2,706	2,036	46	30	16	1	33	43	23
2.4118.05	1,6	17,1	2,692		1,693	37	33	4	0	35	40	25
2.4105.05	1,5	21,9	2,676		1,473				1	33	43	23
2.4117.05	1,5	31,4			1,846	38	26	12				
2.4117.05	1,5	24,6			1,644							
2.4106.05	1,6	23,6			1,505							
2.4354.05	1,3	23,1			1,792							
2.4110.05	1,7	26,3			1,864							
2.4116.05	1,5	24,8			1,914							
2.4109.05	1,7	15,1			1,458							
2.4495.05	2,0	25,4		2,694	1,890	59	39	19,5				
2.4495.05	2,0	21,0		2,694	1,872	59	39	19,5				
2.4240.05	2,2	22,7			1,916							
2.4240.05	2,2	22,7			2,007							
2.4240.05	2,2	22,7			1,886							

continua

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de caracterização física

continuação

Registro da amostra	Profundidade (m)	Umidade natural - w_{nat} (%)	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) DINER	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Solo Laranja												
													Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)			
2.4528.05	6,8		2,793	2,791		34	np	np	2	49	41	8													
2.4043.05	7,3			2,782																					
2.4017.05	6,9	36,6	2,747		1,583				0	58	35	7													
2.4069.05	6,8	31,9			1,495				0	57	35	8													
2.4090.05	6,7	30,3	2,736		1,424	37	np	np	0	52	42	6													
2.4092.05	6,8	26,9			1,368																				
2.4040.05	7,3	36,6	2,740		1,765	39	np	np	3	28	62	7													
2.4091.05	6,7	35,6			1,543																				
2.4093.05	6,8	31,6	2,699		1,845																				
2.4094.05	7,2	26,9	2,723		1,774	31	np	np																	
2.4345.05	6,8	31,5			1,558																				
2.4005.05	6,8	31,6			1,454																				
2.4005.05	6,8	31,6			1,783																				
2.4018.05	7,0	36,0			1,648																				
2.4017.05	6,9	36,4	2,747		1,613																				
2.4069.05	6,8	31,9			1,495																				
2.4227.05	6,4	29,4			1,687																				
2.4018.05	7,0	36,0			1,757																				
2.4220.05	5,7	32,3			1,570																				

continua

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de caracterização física

Continuação

Solo Amarelo												
Registro da amostra	Profundidade (m)	Umidade natural - w_{nat} (%)	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) DNER	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
2.4527.05	7,2		2,776	2,792		34	33	1	1	50	44	5
2.4526.05	7,5		2,715	2,750		36	22	14	0	45	47	8
2.4521.05	9,0			2,620		32	27	5	2	56	40	2
2.4072.05	8,7	18,9	2,700			36	34	2	0	59	34	7
2.4049.05	9,2			2,682					0	48	47	5
2.4077.05	6,9		2,753						0	51	42	7
2.4097.05	7,0	29,8	2,738						0	51	42	7
2.4021.05	8,9	20,2	2,677		1,922	36	33	3	2	54	37	7
2.4025.05	9,1	20,9			2,127							
2.4075.05	8,8	23,8			1,702							
2.4078.05	7,0	23,9			1,746							
2.4342.05	6,4	15,0			1,866							
2.4211.05	7,5	29,1			1,841							
2.4343.05	6,9	24,6			1,761							
2.4021.05	8,9	17,3			1,683							
2.4343.05	6,9	24,6			1,766							
2.4095.05	7,2	29,7			1,927							
2.4100.05	6,9	30,0			1,716							

continua

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de caracterização física

Registro da amostra	Profundidade (m)	Umidade natural - w_{nat} (%)	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) DNER	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³) ABNT	Massa específica natural ρ_n (g/cm ³)	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Conclusão
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					2	58	40	0	
2.4524.05	11,0								8	77	15	0	
2.4002.05	8,9		2,693						5	53	36	6	
2.4011.05	11,1			2,744					1	51	43	5	
2.4016.05	11,1		2,735						1	64	28	7	
2.4055.05	11,2								1	53	40	6	
2.4006.05	11,0	14,4	2,713		1,917	34	30	4	1	60	32	7	
2.4030.05	11,1	20,9	2,737		1,931	33	29	4	1	60	32	7	
2.4033.05	10,9	13,1	2,738		2,255	31	22	9	2	61	30	7	
2.4038.05	7,0	14,5			2,073								
2.4038.05	7,0	14,3			1,904								
2.4088.05	10,8	18,5			2,104								
2.4202.05	10,5	10,7			2,141								
2.4071.05	11,2	16,6			1,940								
2.4037.05	8,9	10,0			2,211								
2.4035.05	11,1	12,3	2,747		2,050				1	57	35	7	

Valores médios dos resultados dos ensaios de caracterização obtidos com os solos das diferentes camadas podem ser encontrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores médios dos ensaios de caracterização física

Solo	Prof. (m)	w_{nat} (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_n (g/cm ³)	LL	LP	IP	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Marrom	1,7	23,5	2,700	1,786	46	32	14	1	34	45	21
Vermelho	2,5	28,6	2,764	1,552	44	35	9	0	35	56	8
Laranja	6,8	32,4	2,764	1,627	35	np	np	1	49	43	7
Amarelo	7,8	23,2	2,719	1,813	35	30	5	1	52	42	6
Branco	10,1	14,5	2,702	2,053	33	27	6	2	58	34	5

O peso específico dos grãos (γ_s) das amostras ao longo do perfil variou pouco. Por isso, os valores médios desta propriedade de cada camada foram utilizados para o cálculo dos demais índices físicos.

Os valores de limite de liquidez (LL) variaram de 33 a 46% ao longo de todo o talude. O limite de plasticidade (LP) situa-se na faixa de 27 a 35% para os solos Branco, Amarelo, Vermelho e Marrom. Os valores de limites de liquidez (LL) são maiores próximo à superfície e vão diminuindo a medida que a profundidade aumenta. O solo Laranja não apresenta limite de plasticidade. Com os resultados de limites de consistência e granulometria foi possível o cálculo do índice de atividade de Skempton da parcela fina dos solos.

Os índices físicos calculados conforme descrito no Capítulo 4 estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Índices físicos médios obtidos por correlação

Solo	Prof. (m)	G_s	γ_d (kN/m ³) ABNT	Índice de atividade de Skempton (I _a)	Índice de vazios (e)	Porosidade (n)	Grau de saturação (S)
Marrom	1,7	2,70	14,23	0,64	0,88	0,46	73,94
Vermelho	2,5	2,76	11,86	1,08	1,30	0,56	60,06
Laranja	6,6	2,76	12,06	np	1,27	0,56	71,04
Amarelo	7,8	2,72	14,49	1,03	0,85	0,46	73,54
Branco	10,6	2,70	17,61	0,83	0,51	0,34	76,05

Na Figura 5.1 estão superpostas as curvas granulométricas de cada um dos cinco solos estudados.

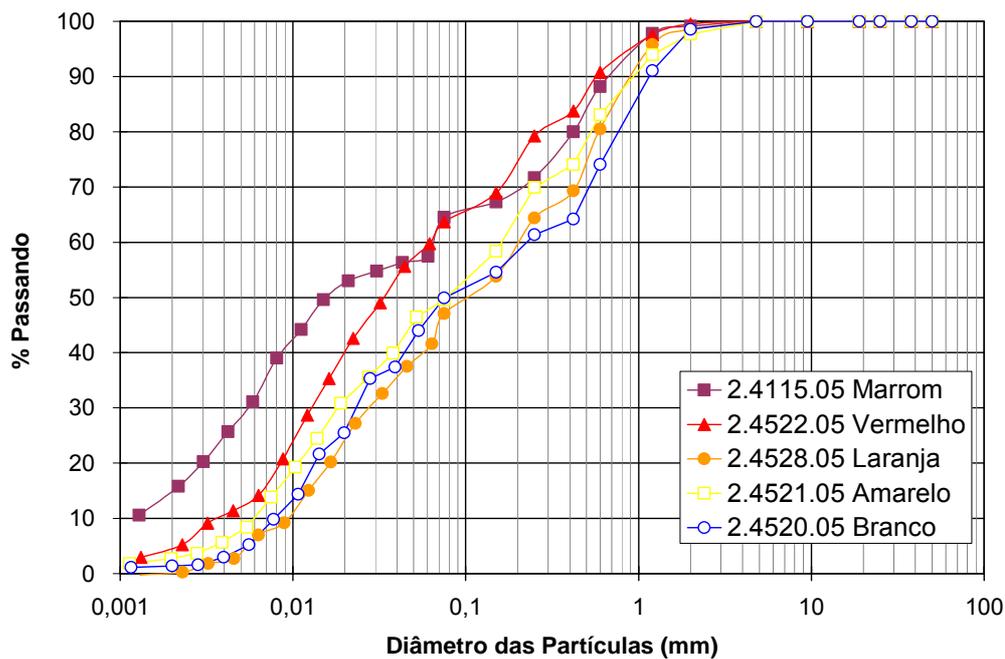
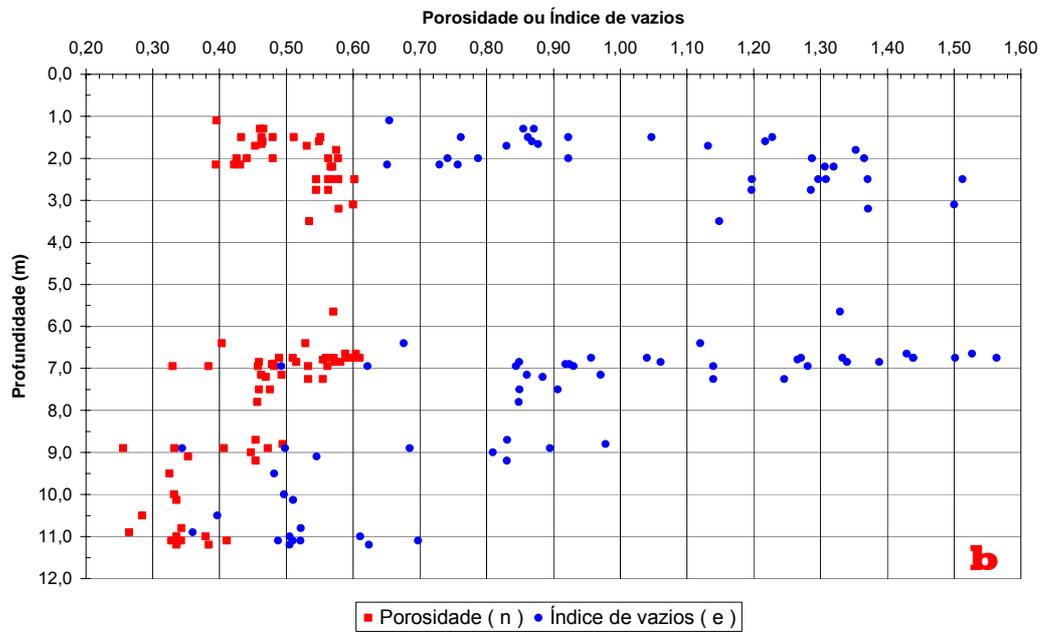
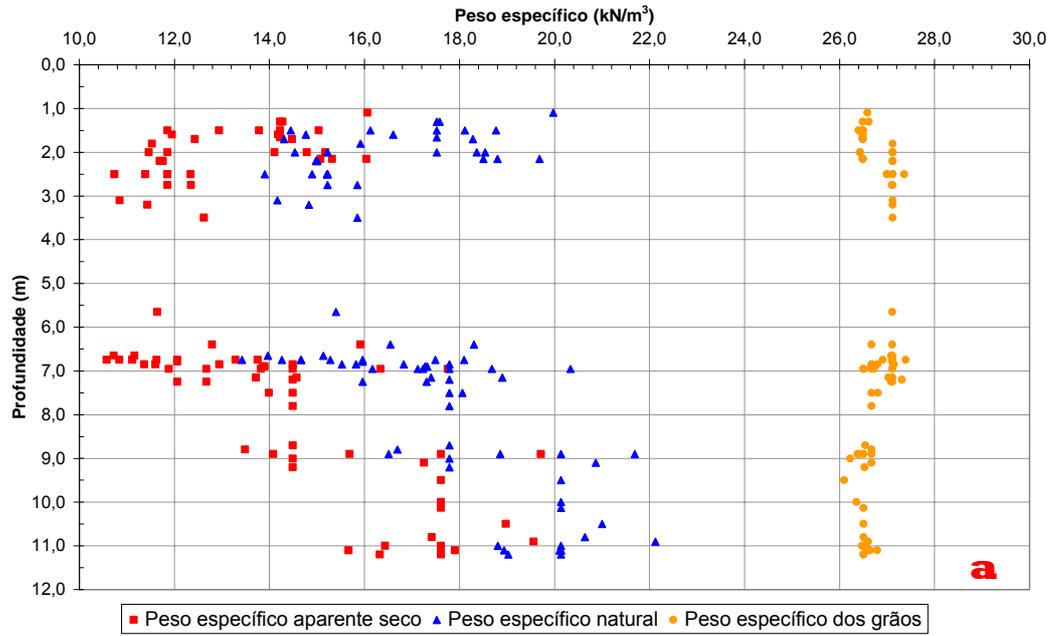


Figura 5.1 – Curvas granulométricas

Analisando-se a Figura 5.1, pode-se verificar que dentre os materiais ensaiados, os mais superficiais, Marrom e Vermelho, consistem em silte arenoso, enquanto os subsuperficiais, Laranja, Amarelo e Branco, são areias siltosas. É interessante observar que o solo Marrom é o único que apresenta quantidade significativa de argila e que a distribuição granulométrica dos solos Branco, Amarelo e Laranja é muito próxima.

Os dados dos ensaios de caracterização e os índices físicos das amostras indeformadas foram utilizados para estudar as propriedades dos solos do perfil ao longo de sua profundidade.

A Figura 5.2 mostra a variação dos diferentes parâmetros ao longo do perfil. Para tanto, foram considerados os dados da Tabela 5.1.



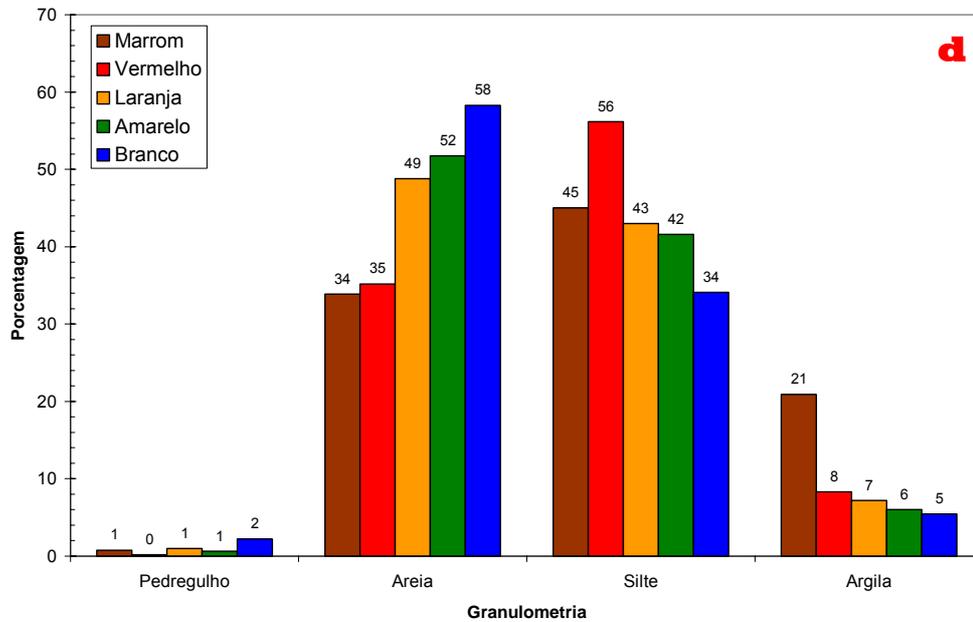
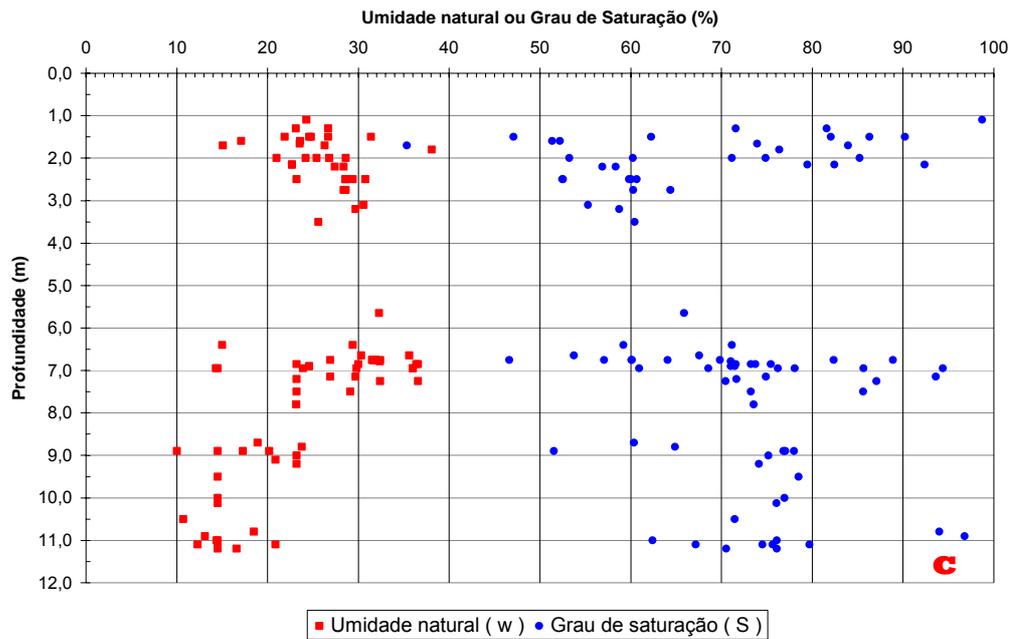


Figura 5.2 – Propriedades índice ao longo do perfil

Para os solos Vermelho e Marrom, o peso específico natural (γ_{nat}) mostra uma tendência de diminuição com o aumento da profundidade. Abaixo da profundidade de 6m, a tendência se inverte, podendo ser notado um crescimento (Figura 5.2a). Os valores de γ_{nat} oscilam entre 14 kN/m^3 e 20 kN/m^3 para todo o perfil. O peso específico dos grãos γ_s mantém-se praticamente constante, variando em torno da média de $26,55 \text{ kN/m}^3$.

A diminuição da densidade natural do solo com o aumento da profundidade nas camadas mais superficiais se reflete no índice de vazios e na

porosidade, que apresentam nitidamente uma tendência de aumentar junto com a profundidade nestas camadas do perfil. O comportamento inverso também é confirmado nos horizontes menos intemperizados (Figura 5.2b).

O teor de umidade natural w_{nat} (Figura 5.2c) aumenta com o aumento da profundidade nas camadas superficiais e decresce com o aumento da profundidade nas camadas mais inferiores (solos Laranja, Amarelo e Branco).

A Figura 5.2d traz as porcentagens correspondentes às frações granulométricas. Pode-se verificar que a composição do solo varia bastante ao longo do perfil. Nota-se que o teor médio de argila das amostras é decrescente com a profundidade. O mesmo acontece com o teor de silte, menos para o solo Marrom, onde se observa uma queda na parcela desta fração. A fração areia é encontrada em maior quantidade no solo Branco, o único também a apresentar quantidade considerável de pedregulho. Isto porque este solo é o que mais preserva as características da rocha matriz. Um teor um pouco menos significativo de material granular é encontrado nos solos Amarelo e Laranja. É possível observar no gráfico da Figura 5.2d que à medida que a profundidade aumenta, os teores de pedregulho e areia também aumentam enquanto os teores das frações mais finas, silte e argila, diminuem. A variação das propriedades ao longo do perfil possivelmente está associada à ação do intemperismo. O fato dos teores de pedregulho e areia se reduzirem em direção à superfície sugere que parte do material granular – a fração correspondente ao feldspato – teria sido intemperizada, aumentando a porcentagem de argila nos estratos mais superficiais.

Na Figura 5.3, pode se avaliar a atividade dos solos. O índice de atividade das argilas (I_a) foi determinado segundo proposta de Skempton a partir da equação:

$$I_a = \frac{IP}{\% < 2\mu m}$$

onde:

$\% < 2 \mu m$ = fração argila

A classificação segundo a fração argila presente no solo é dada por:

- $I_a < 0,75$ inativas
- $1,25 > I_a > 0,75$ atividade normal
- $I_a > 1,25$ ativas

A maioria das amostras de solo Marrom é classificada como “inativa”, enquanto algumas amostras de solo Amarelo são ativas e outras inativas. As demais possuem atividade normal.

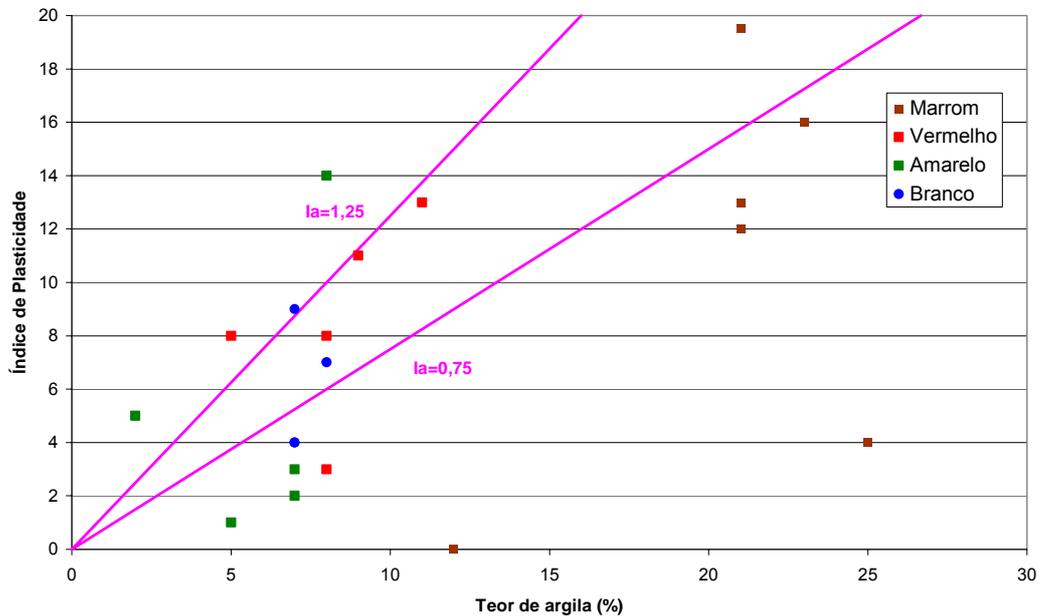


Figura 5.3 – Atividade dos solos

A Figura 5.4 apresenta a variação do peso específico aparente seco com o índice de vazios para as diferentes camadas de solo. Nota-se uma diminuição do índice de vazios com o aumento de γ_d . Os maiores valores de índices de vazios são encontrados nos solos Laranja e Vermelho. Já o solo com menor valor de índice de vazios é o solo Branco. De uma forma geral, o índice de vazios diminui com o aumento da profundidade. Esta tendência só não é verificada para o solo Marrom, o mais intemperizado, que apresenta uma faixa de índice de vazios situada abaixo da dos solos Laranja e Vermelho.

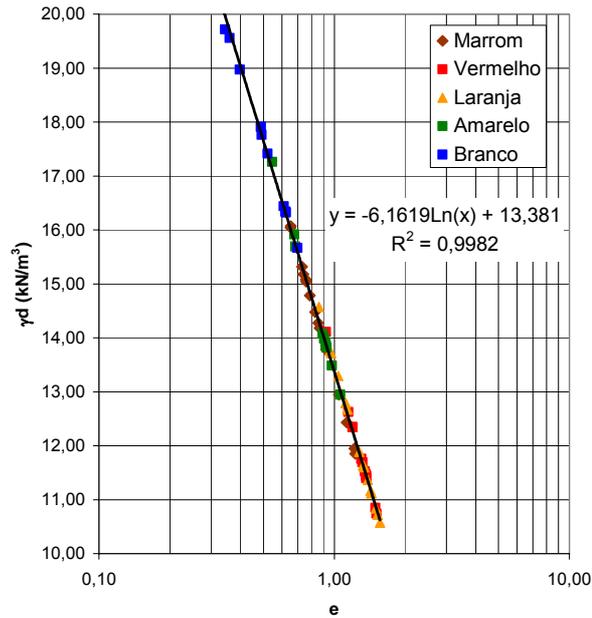


Figura 5.4 – Variação de γ_d com o índice de vazios

Considerando que a densidade relativa dos grãos (G_s) varia pouco ao longo do perfil, é esperada uma relação linear do grau de saturação (S) com a umidade (w_{nat}). A inclinação da reta é dada pelo inverso do índice de vazios médio. Na Figura 5.5 é possível observar esta tendência para os cinco solos estudados. Fica evidenciado no gráfico que, classificados da maneira como foram, os solos Laranja e Vermelho se confundem. Da mesma forma, o solo Amarelo ora se comporta como Branco e ora como Laranja. Além disso, nota-se que o solo Branco tem 3 comportamentos distintos, podendo então ter sido classificado como 3 materiais diferentes.

A Figura 5.6 propõe uma nova divisão dos diferentes solos com base na variação destes índices, que poderá ser utilizada em futuros trabalhos. As retas da figura cruzam os eixos na origem. A partir desta figura sugere-se que, num futuro trabalho os solos de um mesmo perfil sejam classificados não somente segundo seus aspectos morfológicos, mas utilizando também relações tais como a relação linear dos parâmetros grau de saturação e umidade, como a mostrada na figura.

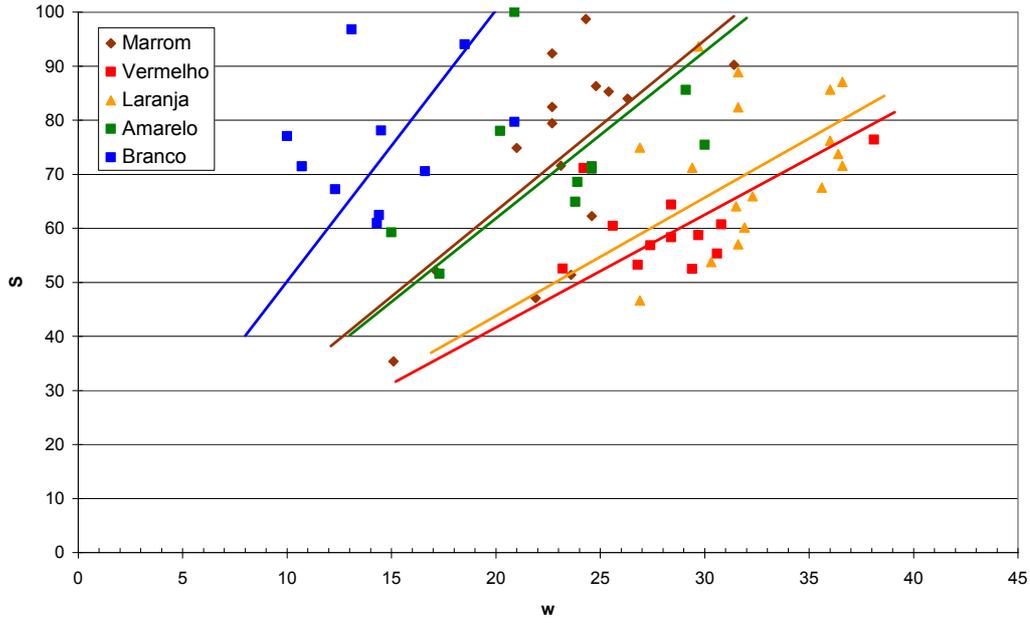


Figura 5.5 – Variação do grau de saturação com o teor de umidade para os 5 diferentes solos com suas respectivas tendências lineares

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410766/CA

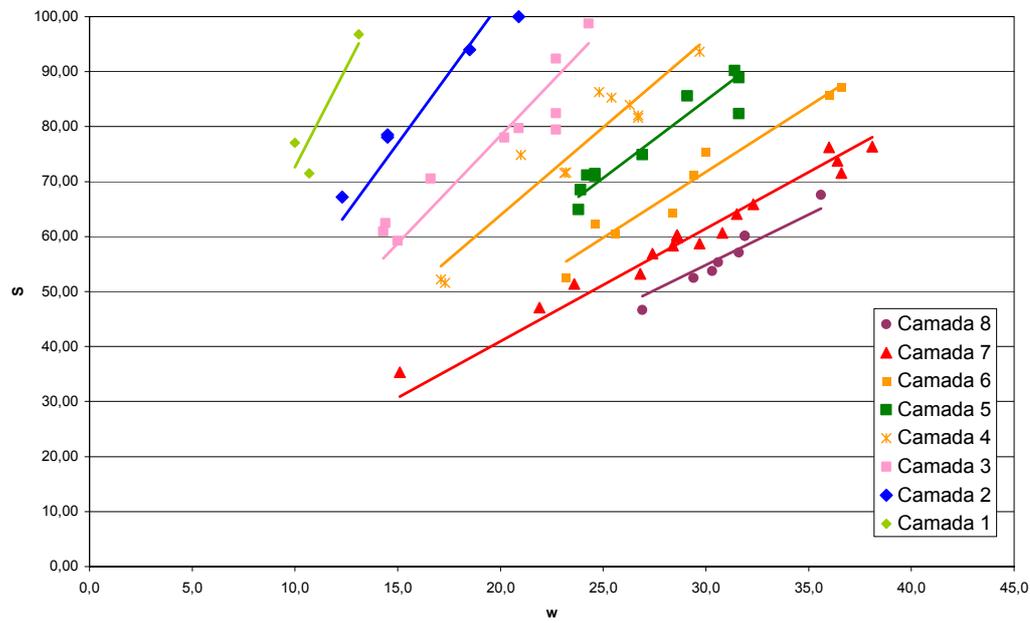


Figura 5.6 – Proposta de uma nova divisão das camadas com base na variação linear do grau de saturação com o teor de umidade

5.1.2. Porosimetria de mercúrio

Foram realizados ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio em amostras de solo e de rocha.

Na Figura 5.7a é apresentada a distribuição cumulativa dos diâmetros dos poros para os solos do perfil, e na Figura 5.7b para as rochas.

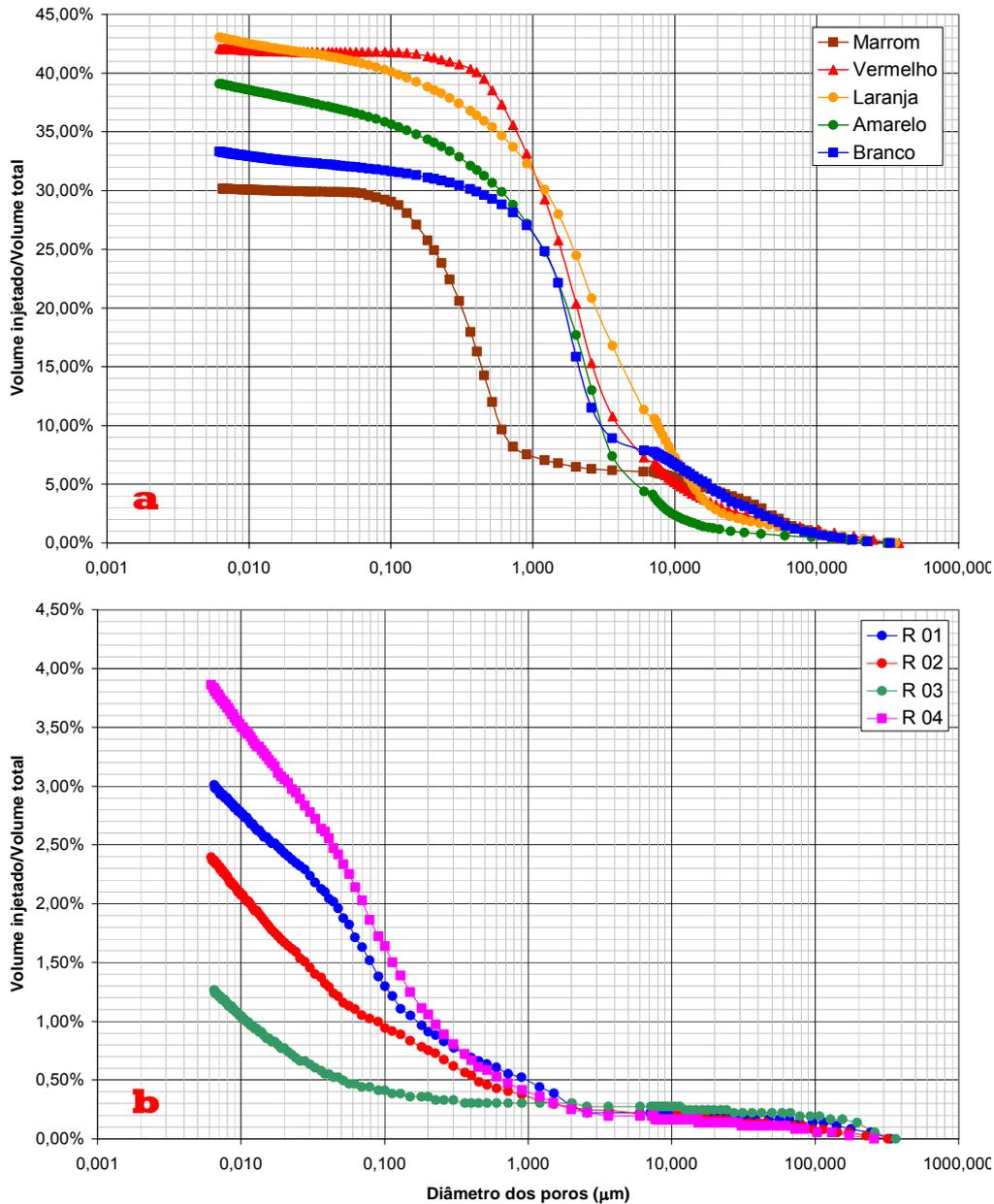


Figura 5.7 - Distribuição acumulativa dos diâmetros dos poros (a) para os solos; (b) para as rochas

A porosidade dos solos e das rochas nos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio é representada pelas curvas de volume total de mercúrio injetado nas amostras versus o diâmetro dos poros. Devido a limitações do equipamento, não foi possível estudar a contribuição dos microporos menores que 0,0062 μm , pois o nível de pressão aplicada só é capaz de gerar informações sobre os diâmetros maiores que este.

A Figura 5.7a mostra claramente que a porosidade nos solos do perfil estudado varia com a profundidade. De uma maneira geral, os solos mais profundos são menos porosos (Amarelo e Branco). Os solos Laranja e Vermelho apresentam uma porosidade maior e muito próximas entre si. No entanto, o solo Marrom, mais superficial, apresenta uma porosidade baixa, muito próxima da encontrada no solo Branco.

Na Figura 5.7b observa-se que o volume de poros nas rochas também varia com a profundidade. A amostra mais profunda, R 04, foi a que apresentou maior porosidade, confirmando mais uma vez a existência de um intemperismo diferencial neste perfil. Vale aqui ressaltar que as escalas verticais das Figuras 40a e 40b são diferentes. Dessa forma, vê-se que a rocha mais porosa, R 04, tem uma porosidade ainda 10 vezes menor que o solo Branco, o menos poroso.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de porosidade total obtidos para os solos e rochas nos ensaios de porosimetria. A porosidade total é obtida multiplicando-se o volume total injetado na amostra por grama de solo/rocha pelo peso específico seco do solo/rocha.

Tabela 5.4 – Porosidade por injeção de mercúrio

Solo/Rocha	Porosidade total por Hg (%)
Marrom	30,17
Vermelho	42,07
Laranja	43,01
Amarelo	39,09
Branco	33,29
R 01	3,02
R 02	2,39
R 03	1,27
R 04	3,85

Na Figura 5.8a tem-se a distribuição incremental dos diâmetros dos poros ao longo das camadas de solo enquanto na Figura 5.8b ao longo das camadas de rocha.

A classificação dos espaços porosos como macroporos, mesoporos e microporos ainda não é um consenso entre os diferentes autores.

A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC)⁽¹⁾ propõe a seguinte relação:

Macroporos – poros de diâmetro maior que 0,5 μm ;

Mesoporos – poros de diâmetro entre 0,2 μm e 0,5 μm ;

Microporos – poros menores que 0,2 μm .

Por outro lado, Delage *et al.* (1996)⁽²⁾ classificam os poros como:

Grandes – poros de diâmetro superior a 50 μm ;

Médios – poros de diâmetro entre 0,5 μm e 50 μm ;

Pequenos – poros menores que 0,5 μm .

Martinez (2003)⁽³⁾, 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 μm e de mesoporos os de diâmetro inferior a 4 μm .

Já Brewer (1976) classifica os poros segundo suas dimensões em:

Macroporos – poros maiores que 75 μm ;

Mesoporos – poros entre 30 e 75 μm ;

Microporos – poros entre 5 e 30 μm ;

Ultramicroporos – poros entre 0,1 e 5 μm ;

Criptoporos – poros menores que 0,1 μm .

A Tabela 5.5 apresenta de forma resumida estas três diferentes classificações encontradas na literatura.

Tabela 5.5 – Classificação dos espaços porosos.

Classificação	IUPAC ⁽¹⁾	Delage <i>et al.</i> (1996 <i>apud</i> Martínez, 2003) ⁽²⁾	Martínez (2003) ⁽³⁾
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	$\Phi < 0,2 \mu\text{m}$	$\Phi < 0,5 \mu\text{m}$	--

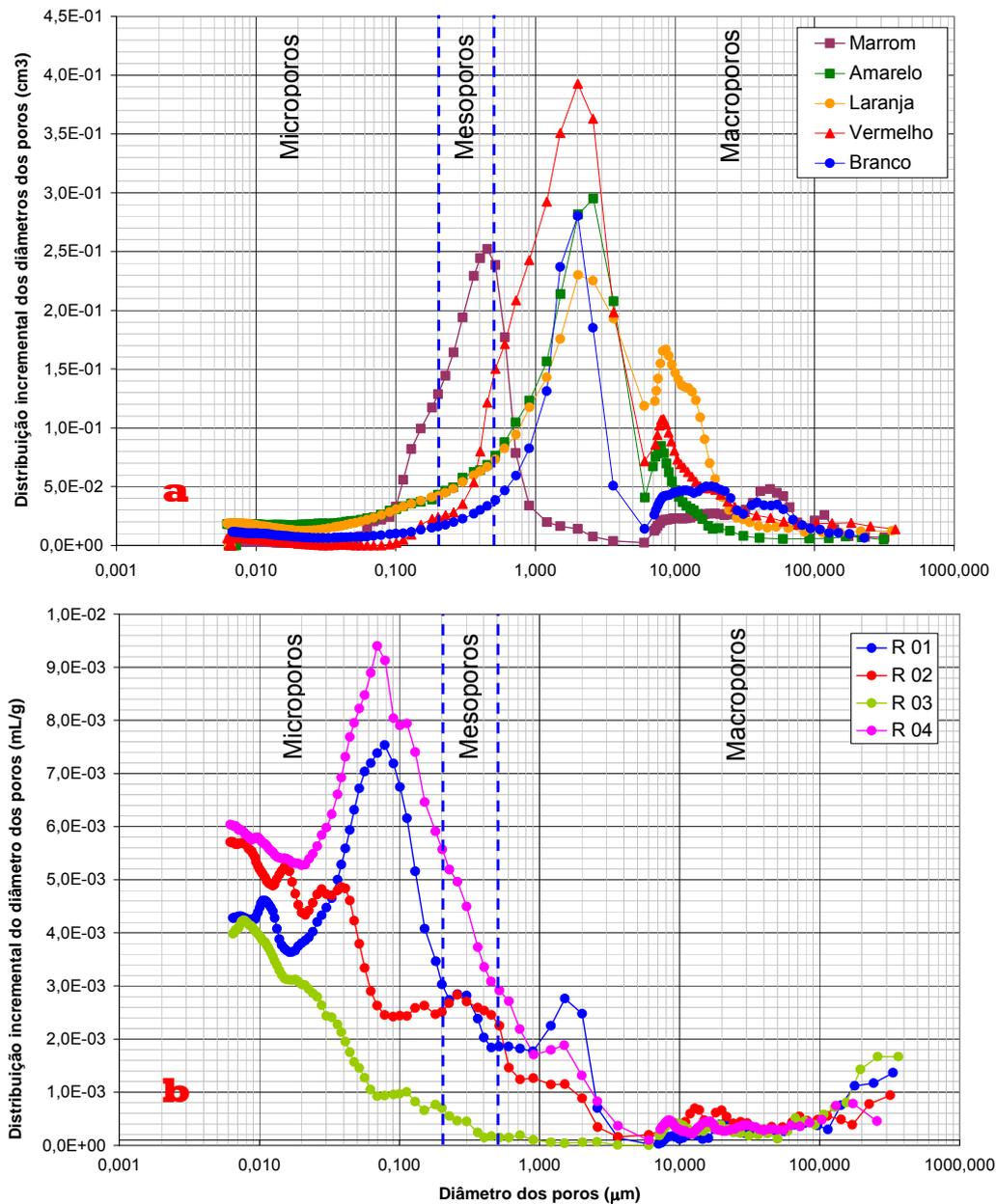


Figura 5.8 - Distribuição incremental dos diâmetros dos poros (a) para os solos; (b) para as rochas (as faixas de micro, meso e macroporos apresentadas no gráfico se referem a classificação da IUPAC)

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.

Conforme pode ser visto na Figura 5.8a, a distribuição do diâmetro dos poros para o solo Marrom se dá na forma bi-modal, ou seja, existe uma concentração de poros em dois diâmetros muito distintos. Este formato é característico de solos residuais intemperizados que apresentam poros entre partículas e poros entre agregados de partículas. Essa tendência já foi observada por outros autores em ensaios de porosimetria com solos residuais (e.g. Machado, 1998).

A partir dos resultados mostrados na Figura 5.8 é possível obter a porcentagem volumétrica de microporos, mesoporos e macroporos presentes nos solos estudados conforme Tabela 5.6.

A técnica de injeção de mercúrio para a determinação das dimensões de poros se mostra muito eficaz no estudo de solos residuais. Foi possível concluir que o solo mais intemperizado, ou seja, a camada de solo Marrom, apresenta uma porosidade muito próxima a da camada de solo menos intemperizada (solo Branco).

Tabela 5.6 - Distribuição de poros em porcentagem

Solo	Micro (%)			Meso (%)			Macro (%)	
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)
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	4,0	11,3	65,9	7,3	85,8	34,1	88,7	2,9
Branco	6,9	11,8	73,7	4,9	82,3	26,3	88,2	5,9

¹ IUPAC

² Delage *et al.* (1996)

³ Martinez (2003)

Camapum de Carvalho (2004) afirma que nos solos pouco intemperizados, a agregação entre as partículas é pequena, a estrutura é influenciada pela estrutura da rocha mãe e a distribuição de poros é relativamente homogênea (mono-modal). Nestes solos o nível de herança da rocha mãe depende do grau de alteração sofrido. Já nos solos profundamente intemperizados, a agregação é importante, a estrutura independe da origem (residual ou transportado) e é geralmente marcada por porosidade elevada que se distribui entre os agregados e no interior dos mesmos, conferindo ao solo uma distribuição de poros bi-modal. Mesmo sendo um solo ainda residual jovem, pela grande quantidade de minerais primários que apresenta, o solo Marrom estudado nesta dissertação já apresenta

uma distribuição de poros bi-modal, como a observada por Camapum de Carvalho (2004) em solos muito intemperizados.

Foi mostrado na Figura 5.4 que o índice de vazios diminui com o aumento da profundidade para os solos Branco, Amarelo, Laranja e Vermelho. Esta tendência só não foi verificada para o solo Marrom, o mais intemperizado, que apresentou uma faixa de índice de vazios situada abaixo da dos solos Laranja e Vermelho. Os gráficos de porosimetria de mercúrio concordam com esta tendência, pois indicam claramente uma diminuição dos macroporos no solo Marrom. Isto pode ser decorrente da migração de partículas sólidas que foram lixiviadas do solo maduro.

5.2.

Caracterização química

5.2.1.

Análise química total

A análise química total abrangeu amostras de solo e de rocha. Os resultados da análise química total para as amostras do perfil encontram-se na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Análise química total por fluorescência de raios-X

Registro da Amostra	Solo/Rocha	Profundidade (m)	Índices químicos em % de peso										Índices de intemperismo			
			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	PF(%)	ba	ba ₁	ba ₂
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	9,55	0,08	0,08	0,07
2.4523.05	Vermelho	2,0	54,46	25,06	8,23	0,59	0,07	0,74	0,05	1,65	0,15	0,10	8,70	0,08	0,07	0,08
2.4522.05	Vermelho	2,5	51,09	26,51	9,59	0,67	0,06	0,61	0,04	1,56	0,25	0,10	9,37	0,07	0,07	0,06
2.4528.05	Laranja	6,8	52,72	23,78	9,03	0,67	1,51	1,44	0,24	1,59	0,20	0,13	8,52	0,21	0,09	0,27
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	5,29	0,51	0,20	0,45
2.4526.05	Amarelo	7,5	64,29	19,63	3,88	0,40	2,26	1,04	1,43	2,19	0,06	0,06	4,56	0,45	0,24	0,35
2.4521.05	Amarelo	9,0	71,14	16,10	2,92	0,32	1,93	0,66	1,55	1,39	0,03	0,05	3,70	0,47	0,25	0,33
2.4525.05	Branco	9,5	68,51	17,75	2,98	0,31	2,00	0,87	1,10	2,49	0,03	0,05	3,74	0,46	0,25	0,33
2.4520.05	Branco	10,0	69,07	17,00	2,87	0,33	2,19	0,75	1,63	2,35	0,03	0,05	3,46	0,55	0,31	0,35
2.4524.05	Branco	11,0	70,57	14,05	3,67	0,35	3,12	1,28	2,62	1,46	0,06	0,06	2,53	0,83	0,42	0,65
R 01	Rocha	19,9	71,78	14,88	2,11	0,17	2,06	0,34	3,86	3,89	0,03	0,06	1,20	0,97	0,71	0,32
R 02	Rocha	24,4	65,44	17,60	3,90	0,24	4,07	0,78	4,80	1,64	0,06	0,13	1,54	0,98	0,55	0,54
R 03	Rocha	25,5	61,98	16,13	5,95	0,33	5,41	2,59	4,29	1,67	0,13	0,23	1,49	1,17	0,55	1,03
R 04	Rocha	25,8	66,09	16,52	3,65	0,21	4,31	1,26	4,41	2,14	0,07	0,15	1,25	1,06	0,58	0,68

Dentre as cinco amostras de rocha obtidas por sondagem rotativa, a R01 (profundidade - 19,9m) foi considerada como representante menos alterada do perfil estudado. Esta escolha está baseada no índice ba_1 de intemperismo químico bem como nas características petrográficas e estruturais observadas em lâminas delgadas.

Os índices de intemperismo químicos apresentados na Tabela 5.7 foram calculados conforme descrito no Capítulo 2. Os resultados analíticos obtidos, para o solo e a rocha (Figura 5.9), mostram a intensidade do intemperismo químico que, juntamente com os outros tipos de intemperismo, formou o solo residual de granito-gnaissé estudado. Os índices são, em geral, maiores na rocha do que no solo.

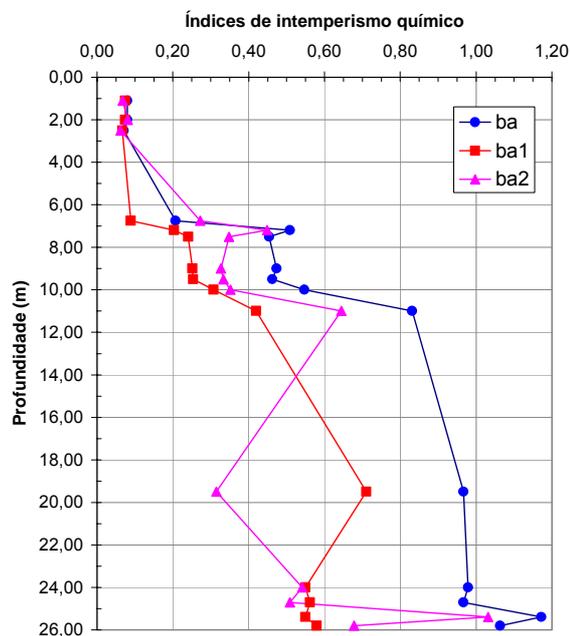


Figura 5.9 – Variação dos principais índices químicos do perfil estudado ao longo da profundidade

Para efeitos de correlações nesta dissertação, o índice de intemperismo utilizado foi o ba_1 . Isto porque o perfil de solo em questão provém de rochas ácidas e, portanto, suas quantidades de potássio e sódio são mais representativas que os teores de cálcio e magnésio (Antunes, 2006). Considerando-se os dados apresentados na Tabela 5.1, é possível traçar o gráfico da Figura 5.10 onde se verifica que o solo residual de granito-gnaissé estudado neste trabalho apresenta um comportamento coerente com os percentuais de argila e o índice de intemperismo ba_1 . De uma forma geral, observa-se que um aumento no percentual de argila corresponde a um aumento no grau de intemperismo, indicado pela diminuição do índice ba_1 (Figura 5.10).

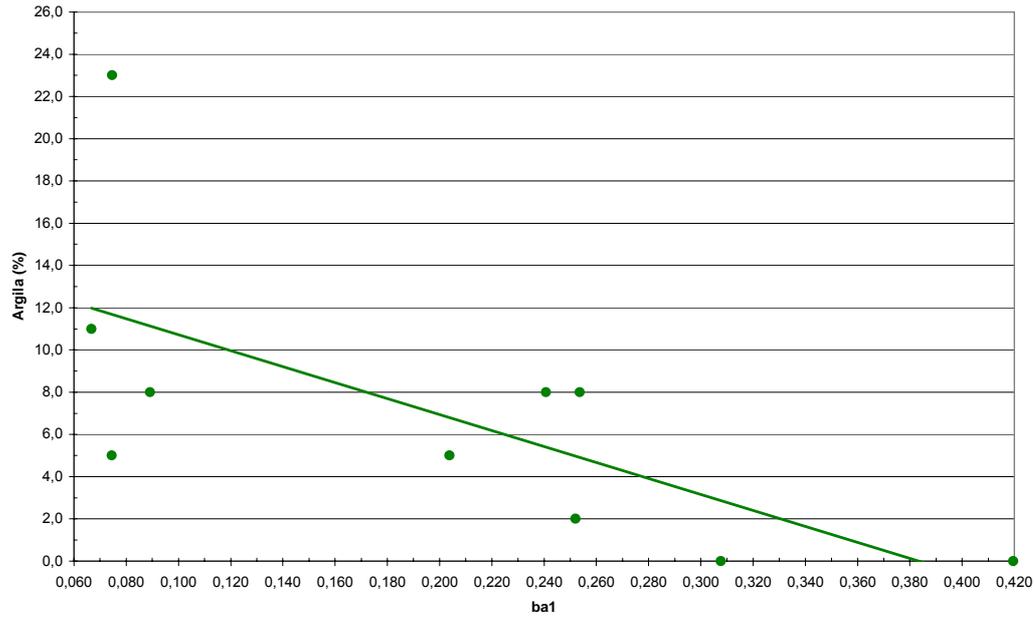


Figura 5.10 – Teor de argila x índice de intemperismo ba_1 ao longo do perfil

Estando diretamente relacionado com o grau de intemperismo de um solo, a variação ao longo da profundidade do índice de perda ao fogo (P.F.) mostra a evolução do intemperismo num dado perfil. A Figura 5.11 mostra esta variação e indica uma forte tendência de evolução do intemperismo com a diminuição da profundidade.

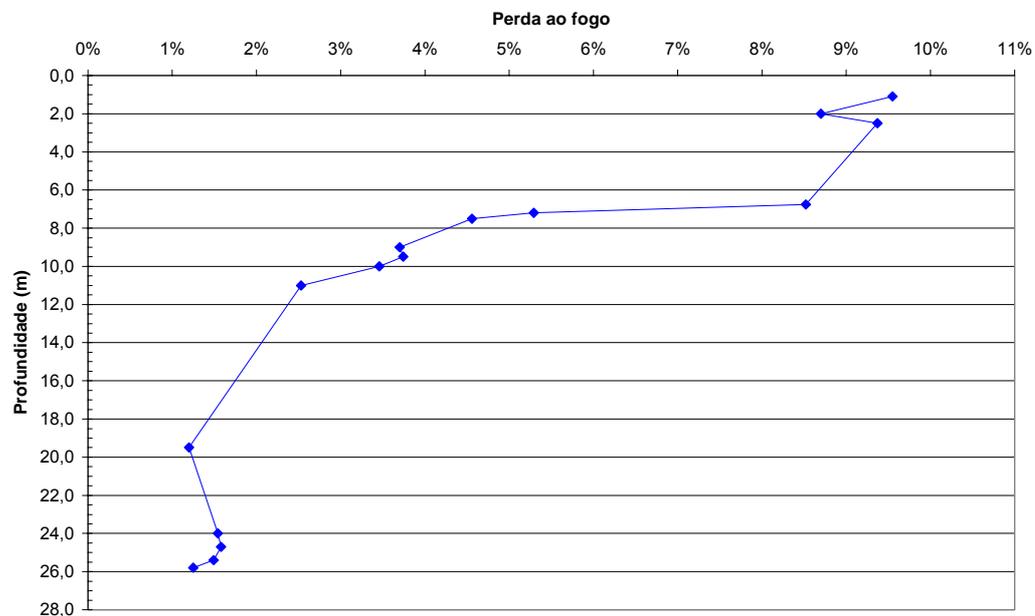


Figura 5.11 – Variação do índice de perda ao fogo ao longo da profundidade

As variações da fração fina (silte e argila) ao longo da profundidade estão apresentadas na Figura 5.12.

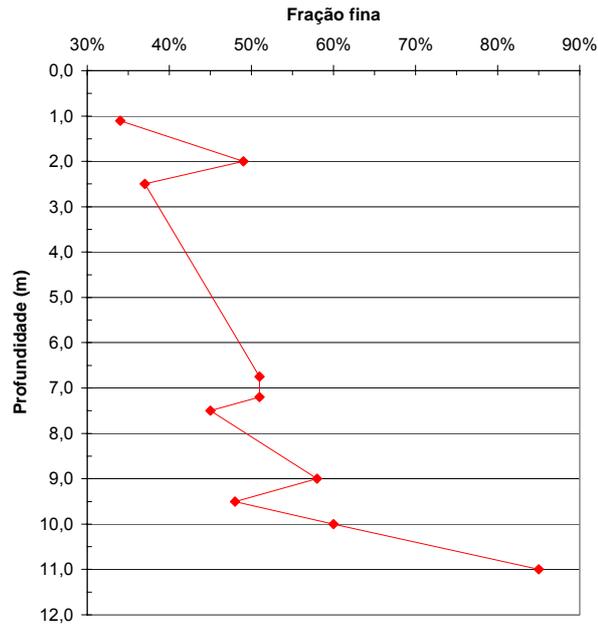


Figura 5.12 – Variação da fração fina do solo ao longo da profundidade

5.2.2. Análise química parcial

As análises químicas parciais compreenderam a análise química por ataque sulfúrico e complexo sortivo. Os ensaios foram realizados apenas em amostras de solo. Informações específicas sobre a execução dos ensaios podem ser encontradas no Capítulo 4. Os resultados da análise química parcial dos solos estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Análise química parcial – complexo sortivo e ataque sulfúrico

Registro da amostra	Solo	Profundidade (m)	Complexo sortivo			Valor S (Soma)	Al ³⁺	H ⁺	Valor T (Soma)
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺				
2.4116.05	Marrom	1,10	0,70	0,08	0,01	0,8	2,70	6,39	
2.4523.05	Vermelho	2,00	0,20	0,09	0,02	0,3	2,00	4,11	
2.4522.05	Vermelho	2,50	0,60	0,10	0,01	0,7	2,00	3,71	
2.4528.05	Laranja	6,75	0,30	0,10	0,02	1,2	1,70	4,52	
2.4527.05	Amarelo	7,20	1,70	0,09	0,02	2,7	0,80	4,71	
2.4526.05	Amarelo	7,50	4,30	0,80	0,06	5,2	0,20	6,43	
2.4521.05	Amarelo	9,00	1,40	1,20	0,04	2,7	0,00	3,70	
2.4525.05	Branco	9,50	2,00	0,40	0,11	2,6	0,10	3,25	
2.4520.05	Branco	10,00	1,70	0,30	0,04	2,1	0,00	2,92	
2.4524.05	Branco	11,00	1,90	0,30	0,06	2,3	0,10	3,01	

Registro da amostra	Solo	Profundidade (m)	Superfície Específica (S.E.)	Ataque sulfúrico			SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (Ki)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (Kf)
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃		
2.4116.05	Marrom	1,10	49,87	196	199	47	2,9	1,45
2.4523.05	Vermelho	2,00	32,08	200	194	99	6,4	1,32
2.4522.05	Vermelho	2,50	28,95	80	49	23	1	2,13
2.4528.05	Laranja	6,75	35,28	76	59	25	3,1	1,72
2.4527.05	Amarelo	7,20	36,76	52	38	18	2,1	1,78
2.4526.05	Amarelo	7,50	50,18	46	29	19	1,7	1,89
2.4521.05	Amarelo	9,00	28,88	111	103	25	1,7	1,59
2.4525.05	Branco	9,50	25,36	88	58	28	1,3	1,97
2.4520.05	Branco	10,00	22,79	101	91	18	2,1	1,67
2.4524.05	Branco	11,00	23,49	88	59	28	1,3	1,94

A soma das concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ é denominada soma de bases (S). Somando-se o Al^{3+} , ao valor de S tem-se a capacidade de troca de cátions efetiva. Se ainda se somar o hidrogênio à capacidade de troca de cátions efetiva tem-se a capacidade de troca de cátions a pH7 (T ou CTC). A partir deste valor é possível calcular a superfície específica do solo conforme segue:

$$S.E. = 7,8043 \times T \quad (\text{VIII})$$

A área de superfície é uma função direta do tamanho e forma do grão sendo esta associada à mineralogia do solo. As cargas de superfície ocorrem em função de substituições isomórficas no reticulado cristalino e da ionização de grupos funcionais. No caso de minerais de dimensão relativamente grandes, como é o caso do quartzo, a reatividade será mínima, pois as substituições isomórficas não existem e a superfície específica é pequena. Assim, nos solos arenosos, a interação entre as partículas será predominantemente de natureza gravitacional, enquanto a interação entre a água e a partícula vizinha será de natureza predominantemente capilar.

Os solos argilosos por sua vez apresentam alta reatividade, devido à superfície específica elevada e à ocorrência de substituições isomórficas no reticulado cristalino. Nestes solos a superfície do mineral encontra-se recoberta por uma solução eletrolítica de água e a interação mineral-mineral se dá por meio desta camada de hidratação.

As relações moleculares K_i e K_r são comumente usadas para indicar o grau de alteração dos solos. Quanto maior o valor de K_i , menor o grau de intemperização do solo. Sabendo-se que alguns solos lateríticos costumam apresentar valores de K_i da ordem de 0,4, pode-se concluir que o solo mais intemperizado estudado nesta dissertação é ainda um solo em processo de alteração. A variação dos índices K_i e K_r ao longo do perfil pode ser observada na Figura 5.13.

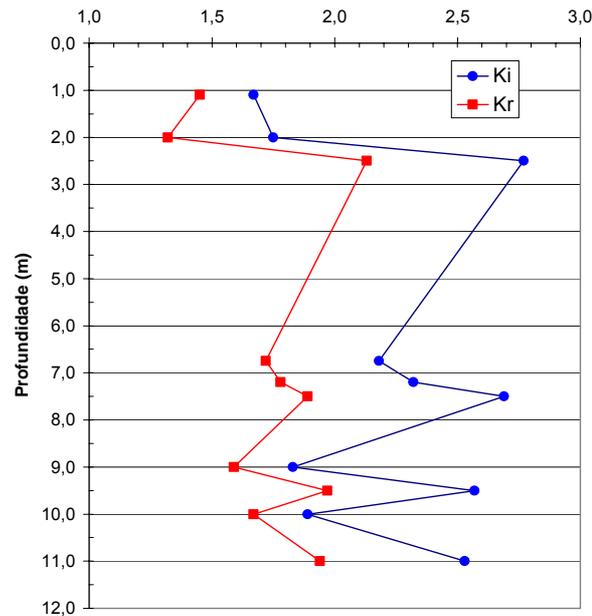


Figura 5.13 – Variação de Ki e Kr com a profundidade

5.2.3. PH e matéria orgânica

Foi determinado o pH em água e em KCl, bem como o teor de matéria orgânica, por duas diferentes metodologias, para amostras de solo de todo o perfil. Para as amostras de rocha foi determinado apenas o pH em água. Os resultados destas análises estão apresentados na Tabela 5.9

O pH em água e em cloreto de potássio mede o índice de acidez do solo. É possível observar assim que trata-se de um perfil de solo ácido. Diminuindo-se o pH em água do pH em KCl obtém-se um valor de ΔpH com o qual é possível saber se a carga líquida predominante nos colóides é negativa, nula ou positiva. Para todos os solos ensaiados o valor de ΔpH é negativo. Isto significa que nestes solos há predominância de cargas negativas, ou seja, a capacidade de reter cátions (cálcio, magnésio, potássio e sódio) é maior que a de reter ânions (sulfato, nitrato, fosfato e cloreto).

Em meios tropicais, a rápida degradação da matéria orgânica gera soluções de alteração levemente ácidas. Nesta faixa de pH o alumínio e o ferro são insolúveis, enquanto os elementos alcalinos e alcalinos terrosos (sódio, potássio, cálcio, magnésio etc.) são muitas vezes totalmente lixiviados. A sílica também é mobilizada, embora em menor velocidade.

Tabela 5.9 – pH e matéria orgânica

Registro da amostra	Solo/Rocha	Profundidade (m)	pH		C (orgânico) g/kg	Matéria Orgânica por oxidação com bicromato de potássio (g/kg) método EMBRAPA	Matéria Orgânica por mufla a 400° (%)
			Água	KCl 1N			
2.4116.05	Marrom	1,10	4,90	3,90	3,3	5,6	
2.4495.05	Marrom	2,00					2,54
2.4523.05	Vermelho	2,00	5,10	4,40	0,4	0,7	3,07
2.4522.05	Vermelho	2,50	5,10	4,30	0,6	1,0	2,34
2.4528.05	Laranja	6,75	5,10	4,30	0,4	0,7	1,53
2.4527.05	Amarelo	7,20	5,60	4,10	0,5	0,9	1,42
2.4526.05	Amarelo	7,50	5,90	4,10	0,5	0,9	1,38
2.4521.05	Amarelo	9,00	5,70	4,70	0,4	0,7	1,36
2.4525.05	Branco	9,50	6,00	4,30	0,5	0,9	0,83
2.4520.05	Branco	10,00	6,00	4,90	0,4	0,7	0,98
2.4524.05	Branco	11,00	5,80	4,10	0,8	1,4	
R 01	Rocha	19,9	8,71				
R 02	Rocha	24,4	9,53				
R 03	Rocha	25,5	9,38				
R 04	Rocha	25,8	9,65				

A Figura 5.14 mostra a variação do pH ao longo do perfil de solo estudado.

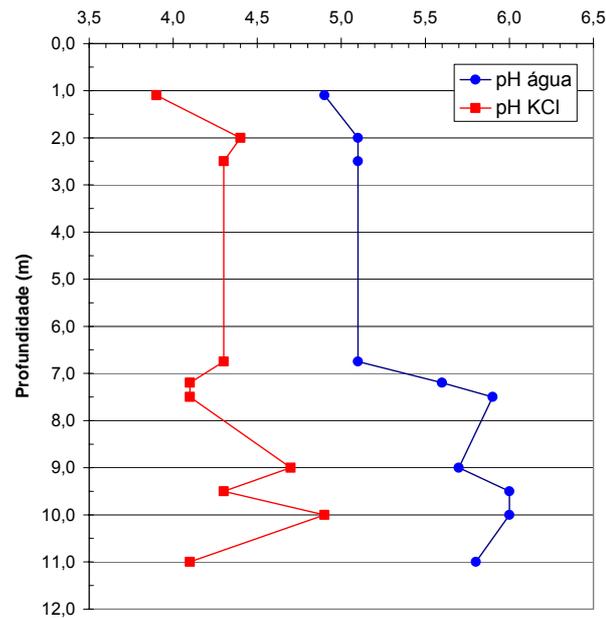


Figura 5.14 – Variação do pH dos solos com a profundidade

A matéria orgânica sob condições climáticas apropriadas tem papel importante na evolução pedogenética, propiciando as condições ideais de pH para a transformação mineralógica. Pela análise do carbono orgânico é possível estimar o teor de matéria orgânica no solo multiplicando-se a quantidade de carbono por 1,72. A EMBRAPA - Solos determina o carbono orgânico por oxidação via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico. Apenas o solo Marrom apresenta uma quantidade relevante de matéria orgânica.

A Figura 5.15 apresenta a variação da porcentagem de matéria orgânica nos solos ao longo da profundidade. Utilizando-se a metodologia da EMBRAPA-Solos, pouca diferença foi notada no teor de matéria orgânica para os diferentes solos. Já pela determinação a partir da mufla, nota-se que o teor de matéria orgânica decresce com o aumento da profundidade.

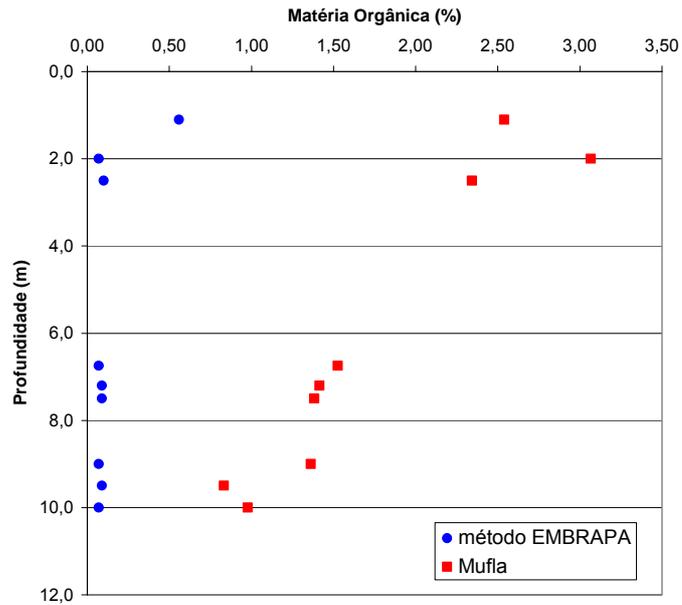


Figura 5.15 – Variação da porcentagem de matéria orgânica com a profundidade

5.3. Análises mineralógicas e microestruturais

5.3.1. Observação em lupa binocular

A partir de observações em lupa binocular, foram identificados os minerais presentes nas amostras de solo coletadas ao longo do perfil. A descrição obtida a partir desta análise encontra-se na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Caracterização mineralógica do material retido na peneira nº 200 (frações pedregulho e areia)

Registro da amostra	Solo	Descrição
2.4523.05 2.4522.05	Vermelho	Apresenta muitas concreções de manganês identificadas por pontos pretos. É uma amostra diferente das demais. O quartzo apresenta-se de forma limpa enquanto o feldspato apresenta-se em tons alaranjados. Trata-se de uma amostra com quantidade significativa de ferro precipitado. Com o auxílio de um imã foi possível perceber a grande presença de magnetita na amostra.
2.4528.05	Laranja	Apresenta grande quantidade de quartzo. Pode-se observar todos os grãos de feldspatos tingidos pelo ferro, em tons alaranjados. Apresenta concreções de manganês.
2.4527.05 2.4526.05 2.4521.05	Amarelo	Apresenta traços de mineral preto, concreções de óxido de manganês, pois fervem na presença de água oxigenada. Apresenta grande quantidade de quartzo que na fração ligeiramente mais grossa se mostra em tons amarelados devido à presença de óxido de ferro. Apresenta também inclusões de quartzo cinzento, arestado, com aspecto vítreo, sem sinais de transporte na fração ligeiramente mais grossa. De uma forma geral apresenta muitos fragmentos de feldspato alterado de coloração branca leitosa. Estes fragmentos estão possivelmente se transformando em caolinita, pois são identificados em maior quantidade na fração mais fina do material. Alguns fragmentos de feldspato alterado observados na fração fina já se encontram tingidos pelo ferro.
2.4525.05 2.4520.05 2.4524.05	Branco	Semelhante à amostra anterior, com granulometria mais grossa. É possível identificar também traços de biotita, representados por pontos pretos.

5.3.2. Difração de raios-X

A mineralogia dos solos em estudo foi determinada utilizando o método da difratometria de raios-X. As análises por difração de raios-X foram realizadas tanto em amostras de solo quanto de rocha. Informações específicas sobre a execução destas análises podem ser encontradas no Capítulo 4. Em um difratograma, picos estreitos, simétricos e bem definidos (mais intensos) caracterizam mineral com estrutura cristalina bem definida, podendo indicar

ainda uma maior porcentagem deste mineral na amostra. Os minerais podem ser identificados ainda por picos menos intensos e largos e como mineral traço.

A seguir estão apresentados os difratogramas representativos das cinco camadas de solo bem como das quatro camadas de rocha identificadas no Capítulo 3. Um resumo dos minerais identificados na difratometria de raios-X é apresentado na Tabela 5.11.

Na amostra de solo Branco foi feito tratamento por glicolagem e aquecimento para permitir melhor identificação do mineral expansivo (esmectita) como mostra a Figura 5.20.

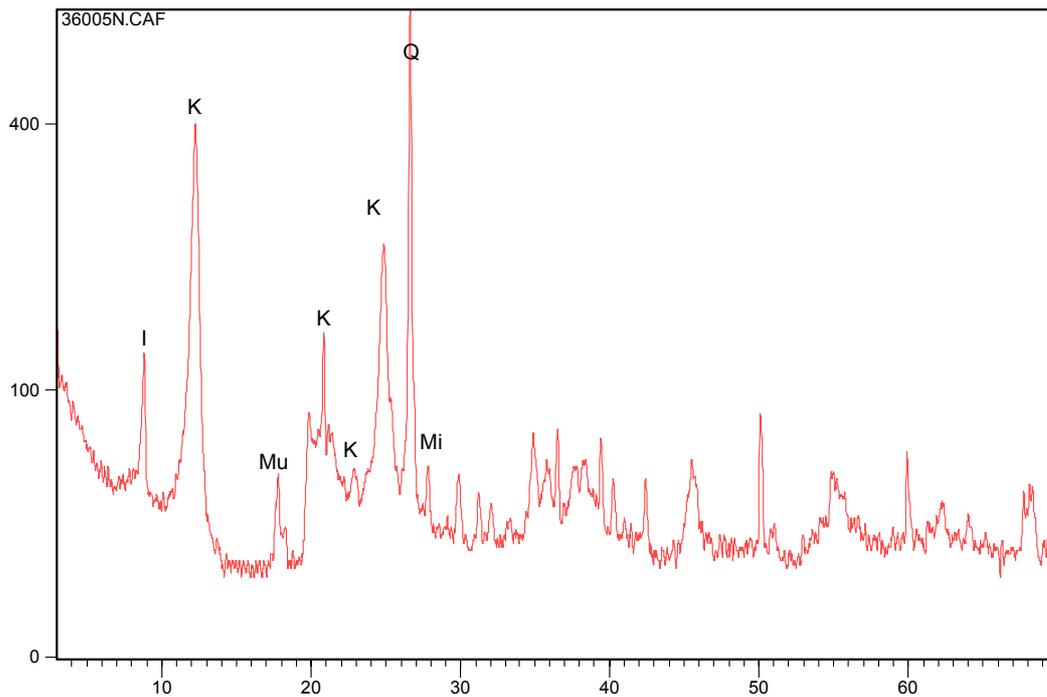


Figura 5.16 - Difratoograma do solo Marrom (fração silte - amostra 2.4108.05) sem tratamento. I – Ilita; K – Caolinita; Mu – Muscovita; Q – Quartzo; Mi - Microclina

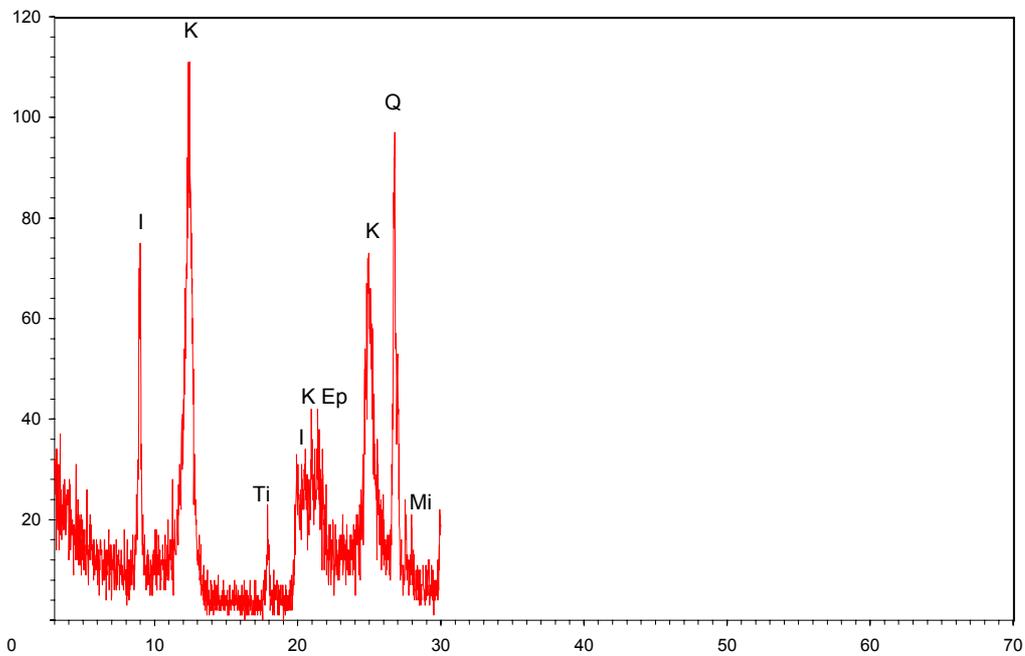


Figura 5.17 – Difratoograma do solo Vermelho (fração argila - amostra 2.4523.05) sem tratamento. I – Ilita; K – Caolinita; Ti – Titanita; Ep – Epidoto; Q – Quartzo; Mi – Microclina

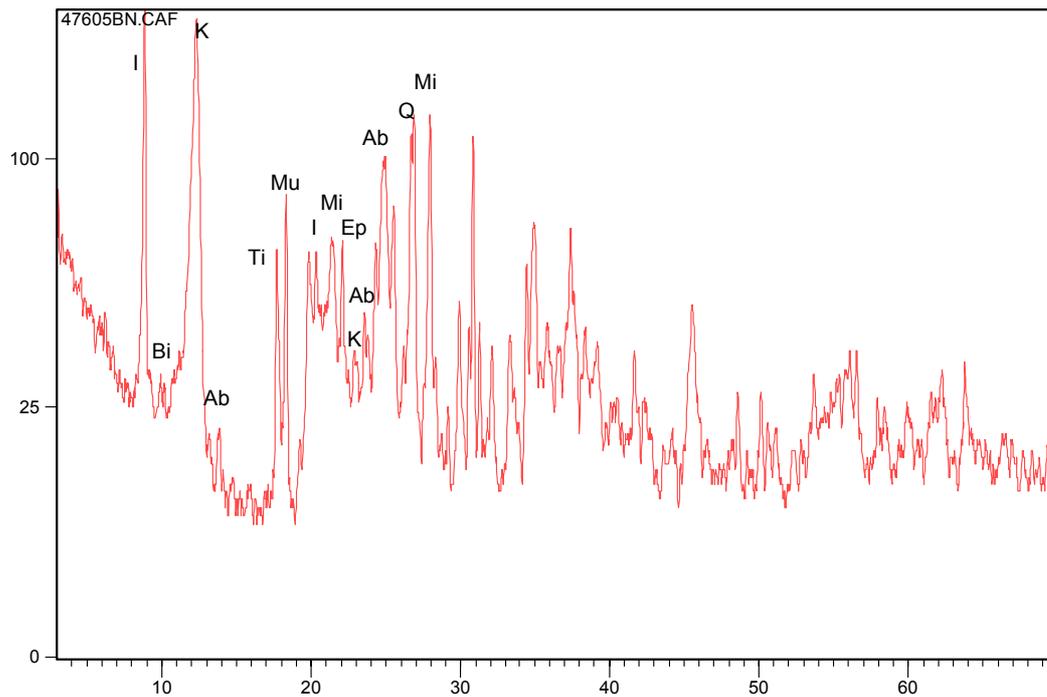


Figura 5.18 – Difratoograma do solo Laranja (fração silte - amostra 2.4528.05) sem tratamento. I – Ilita; Bi – Biotita; K – Caolinita; Ab – Albite; Ti – Titanita; Mu – Muscovita; Mi – Microclina; Ep – Epidoto; Q - Quartzo

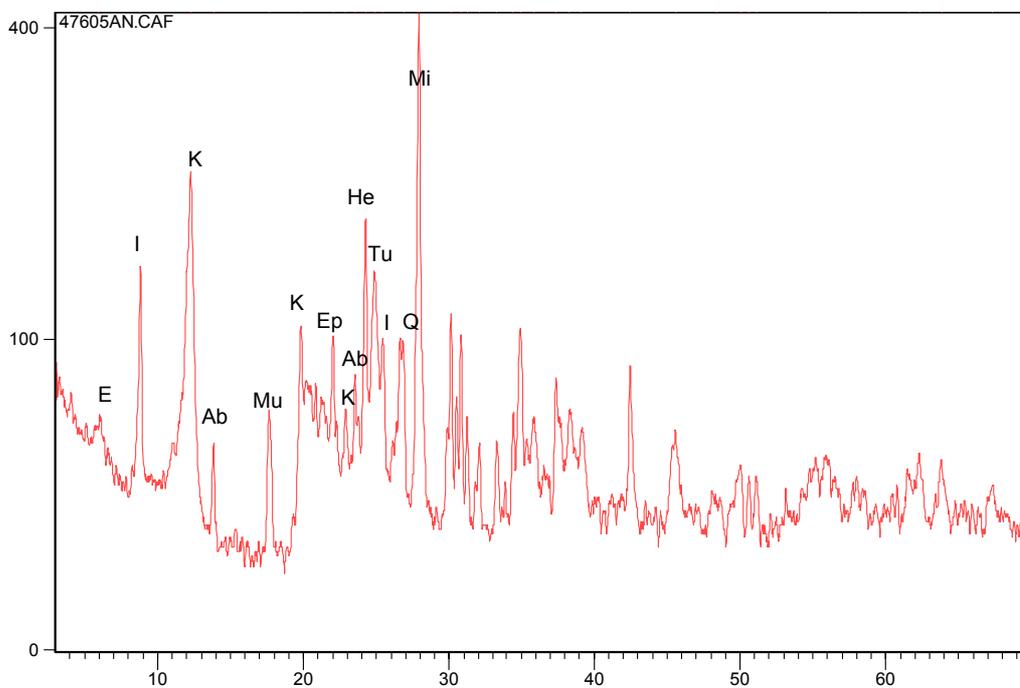


Figura 5.19 – Difratoograma do solo Amarelo (fração silte - amostra 2.4521.05) sem tratamento. E – Esmectita; I – Ilita; K – Caolinita; Ab – Albite; Mu - Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Tu – Turmalina; Q – Quartzo; Mi - Microclina

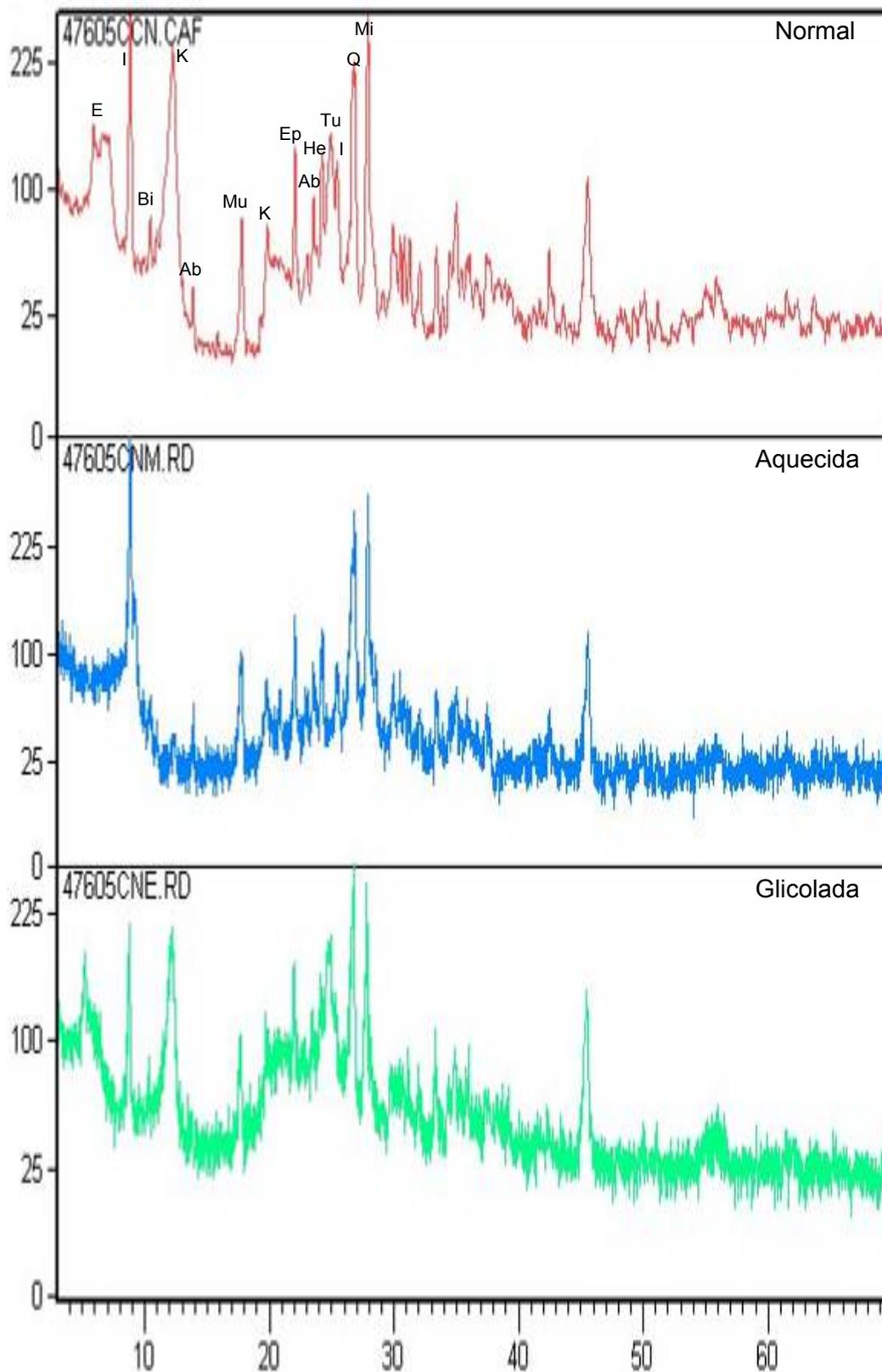


Figura 5.20 – Difratoograma do solo Branco (fração silte - amostra 2.4524.05) com tratamento. E – Esmectita; I – Ilita; Bi – Biotita; K – Caolinita; Ab – Albita; Mu - Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Tu – Turmalina; Q – Quartzo; Mi - Microclina

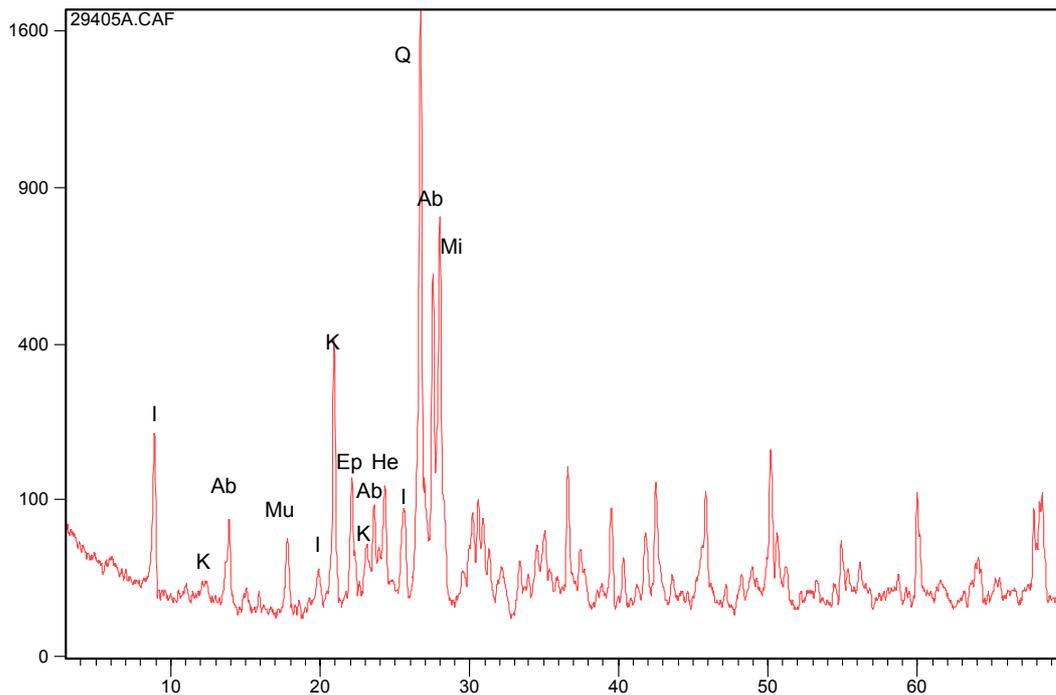


Figura 5.21 – Difratograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 01) sem tratamento. I – Ilíta; K – Caolinita; Ab – Albíta; Mu - Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Q – Quartzo; Mi - Microclina

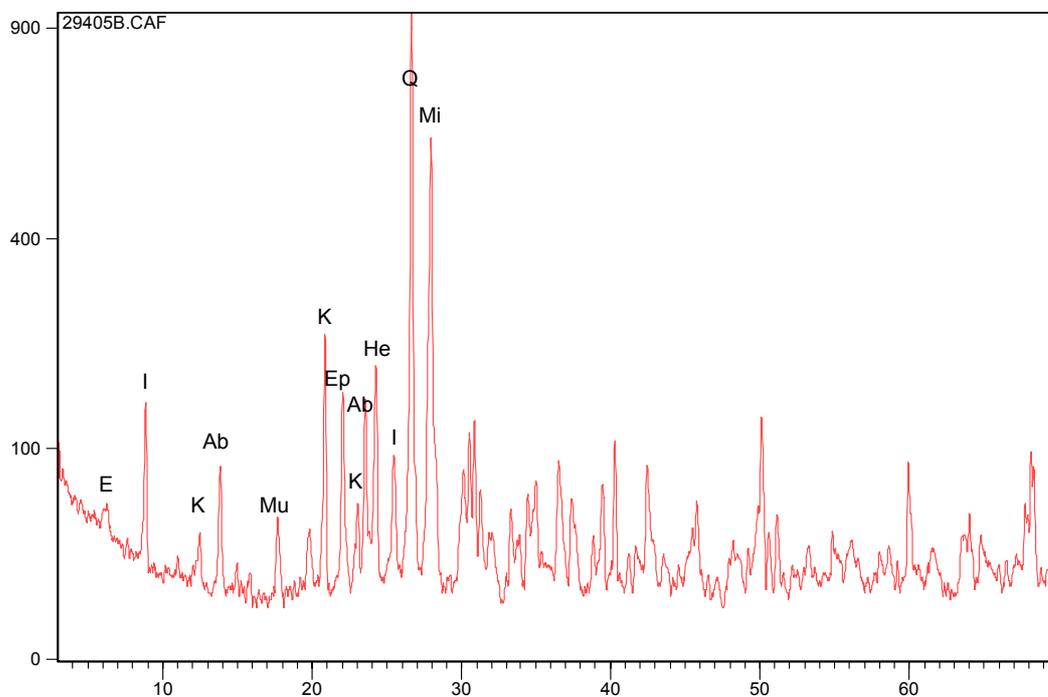


Figura 5.22 – Difratograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 02) sem tratamento. E – Esmectita; I – Ilíta; K – Caolinita; Ab – Albíta; Mu - Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Q – Quartzo; Mi – Microclina

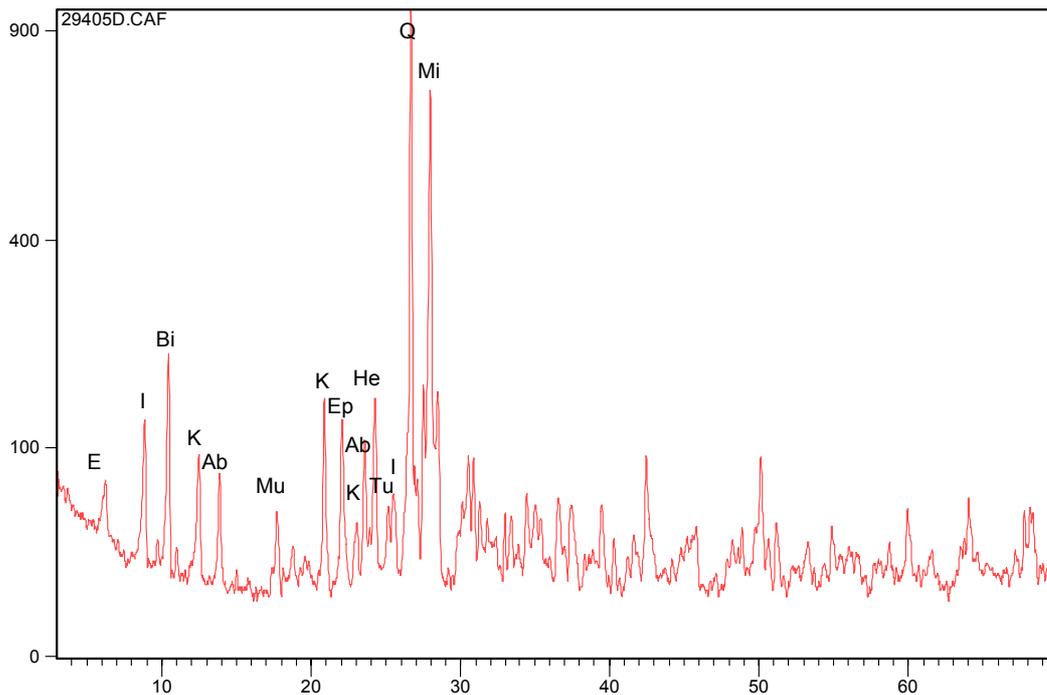


Figura 5.23 – Difratoograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 03) sem tratamento. E – Esmectita; I – Ilita; Bi – Biotita; K – Caolinita; Ab – Albita; Mu – Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Tu – Turmalina; Q – Quartzo; Mi - Microclina

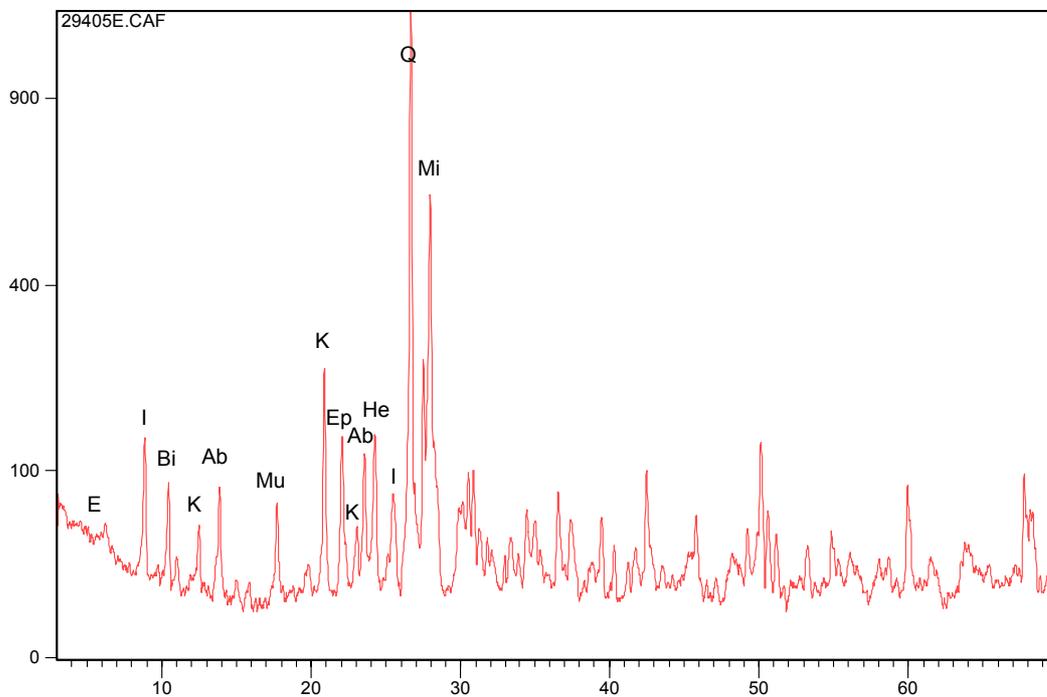


Figura 5.24 – Difratoograma da rocha (fração total pulverizada - amostra R 04) sem tratamento. E – Esmectita; I – Ilita; Bi – Biotita; K – Caolinita; Ab – Albita; Mu – Muscovita; Ep – Epidoto; He – Hematita; Q – Quartzo; Mi – Microclina

Tabela 5.11 – Minerais identificados por difratometria de raios-X

Registro da amostra	Solo / Rocha	Picos mais intensos	Picos menos intensos
2.4108.05	Marrom	Caolinita Ilita Microclina Quartzo	Muscovita
2.4523.05	Vermelho	Caolinita Ilita Quartzo Titanita	Epidoto Microclina
2.4528.05	Laranja	Caolinita Ilita Quartzo	Albita Biotita Epidoto Microclina Muscovita Titanita
2.4521.05	Amarelo	Albita Caolinita Hematita Ilita Muscovita Turmalina	Epidoto Esmectita Quartzo
2.4524.05	Branco	Caolinita Ilita Microclina Muscovita Quartzo	Albita Biotita Epidoto Esmectita Hematita Turmalina
R 01*	Rocha	Albita Epidoto Ilita Microclina Muscovita Quartzo	Caolinita Hematita
R 02*	Rocha	Epidoto Ilita Microclina Muscovita Quartzo	Albita Caolinita Esmectita Hematita
R 03*	Rocha	Albita Biotita Caolinita Epidoto Ilita Quartzo	Esmectita Hematita Microclina Muscovita Turmalina
R 04*	Rocha	Albita Biotita Caolinita Epidoto Ilita Muscovita Quartzo	Esmectita Hematita Microclina

*Difratometria realizada apenas na fração total pulverizada no LAMIR – Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da UFPR

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 caolinita, como produtos da alteração dos feldspatos e das micas, observando-se também a presença de illita e hematita, provavelmente como produtos de alteração da biotita. Também é sugerida a presença de esmectita. Como minerais acessórios encontram-se titanita, turmalina e os do grupo do epidoto.

Sugere-se que a esmectita encontrada não foi formada pelo intemperismo, mas sim por hidrotermalismo, como constatado na análise petrográfica. Isto porque é encontrada também na rocha. Nas camadas mais superficiais não se tem mais esmectita, podendo ter sido a mesma transformada em illita e/ou caolinita.

O estudo da mineralogia deste perfil mostra uma linha de evolução dos minerais, isto é, a transformação dos minerais primários em secundários.

5.3.3. Petrografia

Lâminas petrográficas são normalmente confeccionadas com a espessura de 30 μ m. Cabe ressaltar que neste trabalho as lâminas foram confeccionadas com espessuras em torno de 50 a 60 μ m. Isto foi necessário por se estar trabalhando com rochas friáveis, fortemente alteradas. Quando da confecção das lâminas, a tentativa de diminuir sua espessura a valores inferiores a 50 μ m resultava em descolamento de partículas da rocha. Os minerais foram identificados segundo suas propriedades ópticas. A rocha que dá origem ao perfil estudado foi classificada como granito-gnaisse.

Os gnaisses são rochas grosseiramente foliadas de estrutura muito variável. Podem ser desde maciças, granitóides, com foliação dada pelo achatamento dos grãos até bandada, com bandas na faixa de 1 a 10 mm e mineralogia contrastante, geralmente alternando faixas quartzo-feldspáticas com outras mais máficas (compostos ferromagnesianos). Estas rochas têm composição essencialmente quartzo-feldspática, granulação de média a grossa e são derivadas de processos de segregação metamórfica que culminam em rochas migmatíticas. Rochas migmatíticas são formadas por mistura de fácies de rochas metamórficas na qual pelo menos um componente é representado por material granítico ou granitóide derivado de fusão parcial e/ou de

metassomatismo (processo de alteração e/ou transformação química de uma rocha principalmente pela ação de fase fluida reagente, resultando em entrada e/ou saída significativa de componentes químicos da rocha com modificação importante de seus minerais). A biotita e os minerais do grupo do epidoto são minerais característicos de rochas gnáissicas. Nestas rochas o plagioclásio presente é praticamente albita pura. A rocha estudada nesta dissertação se enquadra nas características acima mencionadas.

As lâminas, confeccionadas a partir das amostras relacionadas na Tabela 1, estão descritas de forma breve, dando ênfase ao grau de intemperismo dos minerais e à variação de suas características ao longo do perfil. Além disso, é feito um paralelo com a descrição macroscópica dos respectivos testemunhos. Informações específicas sobre a execução destas análises podem ser encontradas no Capítulo 4.

R 01 (19,9m)

Como mostra a Figura 5.25, estão presentes nesta rocha minerais como plagioclásio, microclina, quartzo e biotita, além de seus produtos de alteração tais como muscovita, clorita, epidoto, saussurita e sericita. Nota-se nesta lâmina que a biotita observada na macroscopia é um pseudomorfo¹.

Na Figura 5.27 e na Figura 5.28 é possível observar que a alteração desta rocha se dá inter-grãos e ocorre de fora para dentro, fato justificado pela grande concentração de material fino entre os grãos. A invasão dos agentes intempéricos se dá por planos de clivagem e/ou linhas de fraturas. Este processo é contínuo e culmina em mudanças na microestrutura da rocha.

Na Figura 5.26 observa-se um plagioclásio em processo de saussuritização², enquanto na Figura 5.29 observa-se uma microclina em processo de sericitização³. Os elementos originados da biotita são mais facilmente alterados que o plagioclásio e a microclina e, portanto, são encontrados em pequena quantidade nesta amostra, já bastante alterada. No

¹ Corpo cuja forma externa corresponde à do cristal original, mas constituído por material neoformado.

² Formação de saussurita (mistura de até 3 minerais resultante da alteração hidrotermal de plagioclásios cálcicos).

³ Formação de sericita (mineral do grupo das micas, variedade microcristalina da muscovita, ligeiramente mais hidratada, resultante da alteração hidrotermal de feldspatos).

entanto, quando comparada com as demais amostras, é a que apresenta os minerais mais intactos.

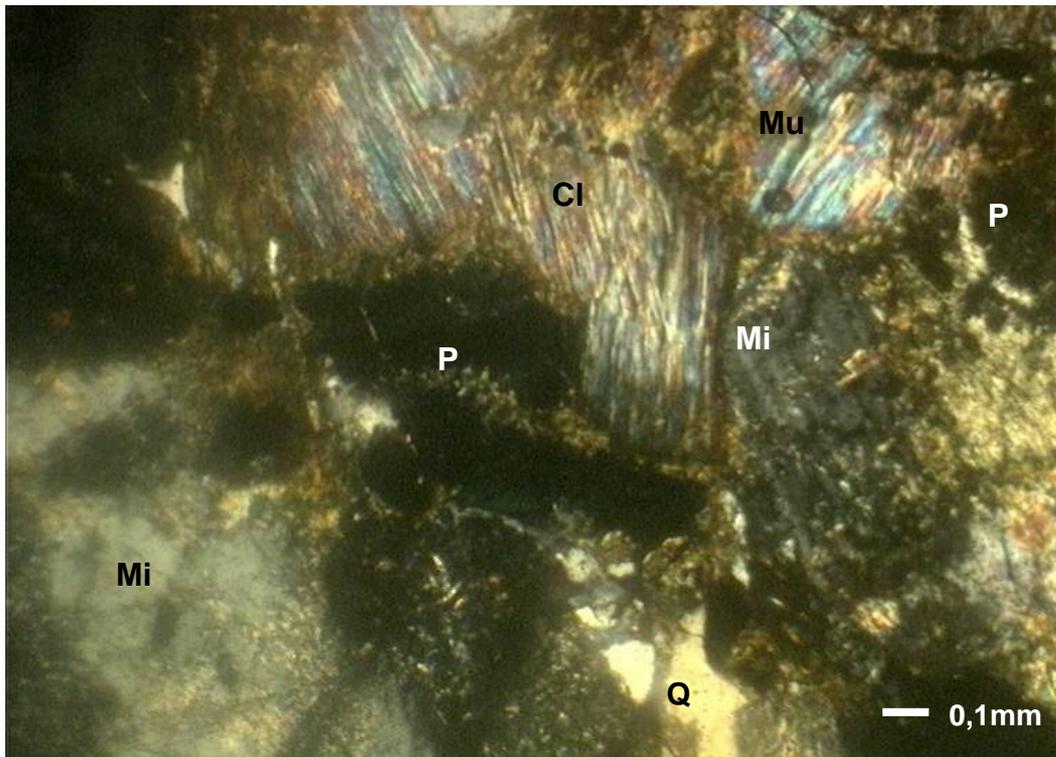


Figura 5.25 – Fotomicrografia da rocha R01. Minerais. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. CI – Clorita; Mu – Muscovita; P – Plagioclásio; Mi – Microclina; Q – Quartzo

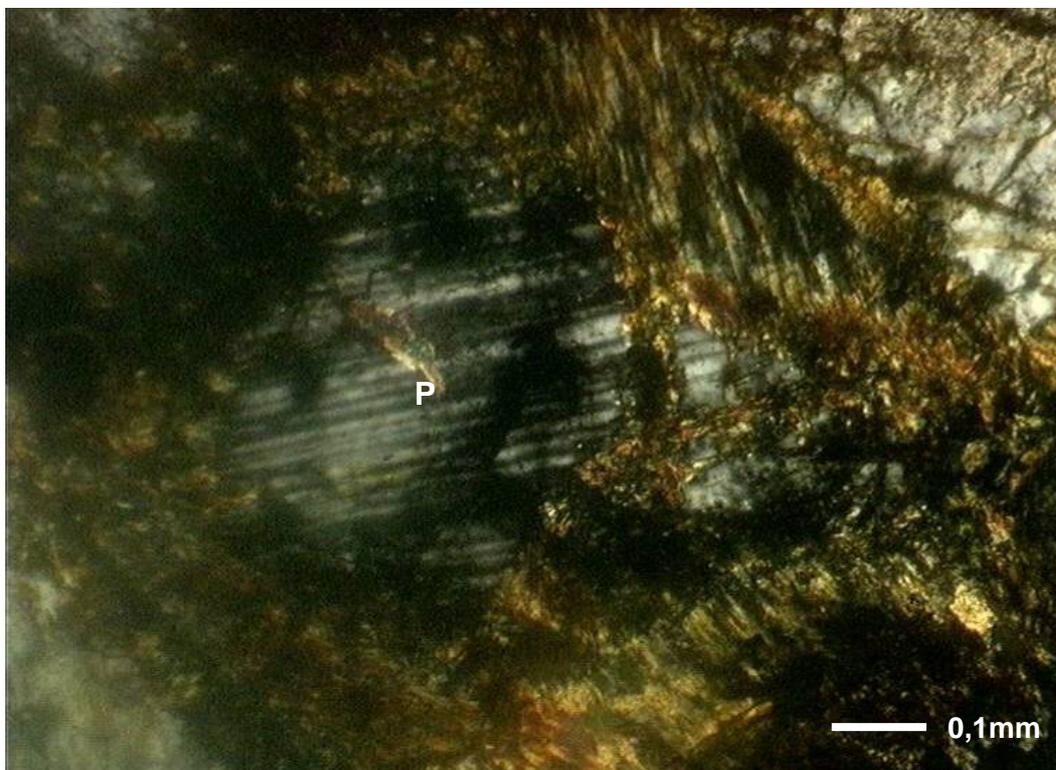


Figura 5.26 - Fotomicrografia da rocha R01. Palagioclásio mais preservado. Aumento de 100 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio

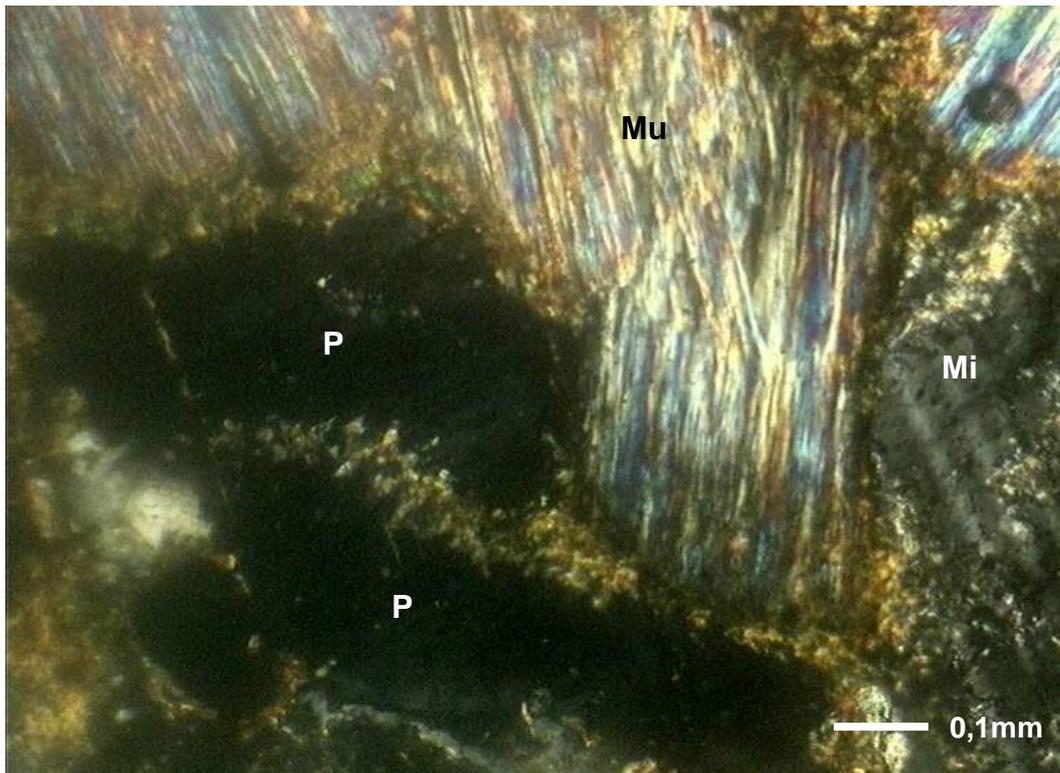


Figura 5.27 – Fotomicrografia da rocha R01. Alteração inter-grãos. Aumento de 100 vezes. *Luz plana*. Mu – Muscovita; P – Plagioclásio; Mi – Microclina

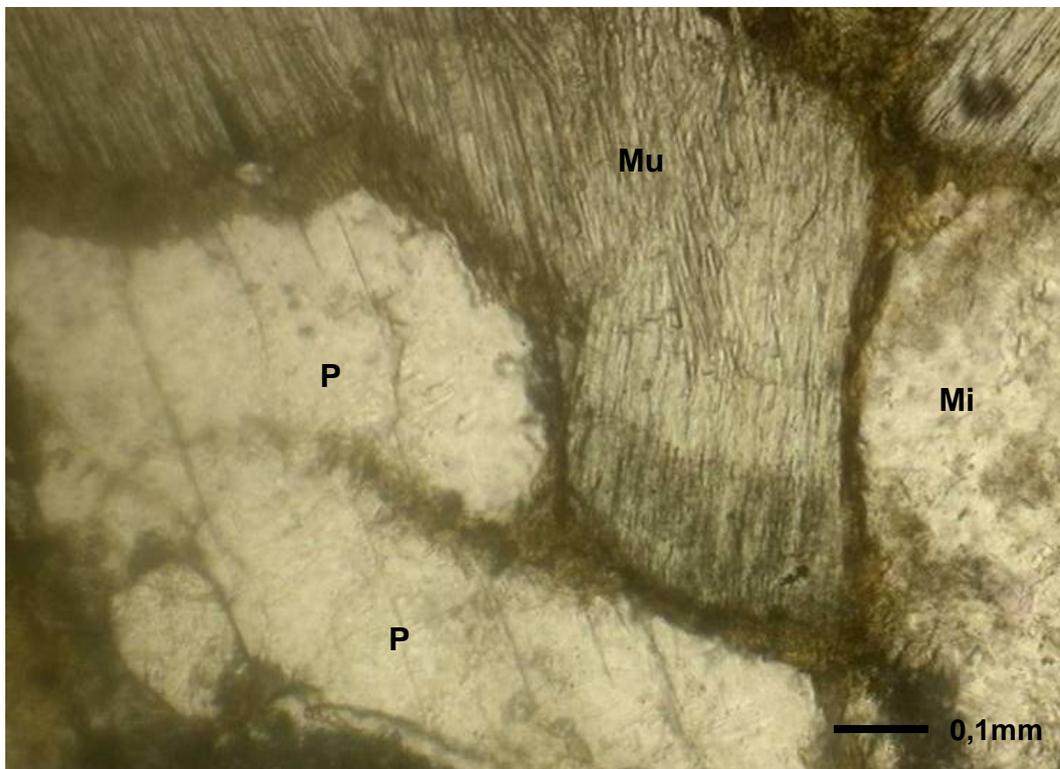


Figura 5.28 – Fotomicrografia da rocha R01. Alteração inter-grãos. Aumento de 100 vezes. *Nicóis cruzados*. Mu – Muscovita; P – Plagioclásio; Mi – Microclina

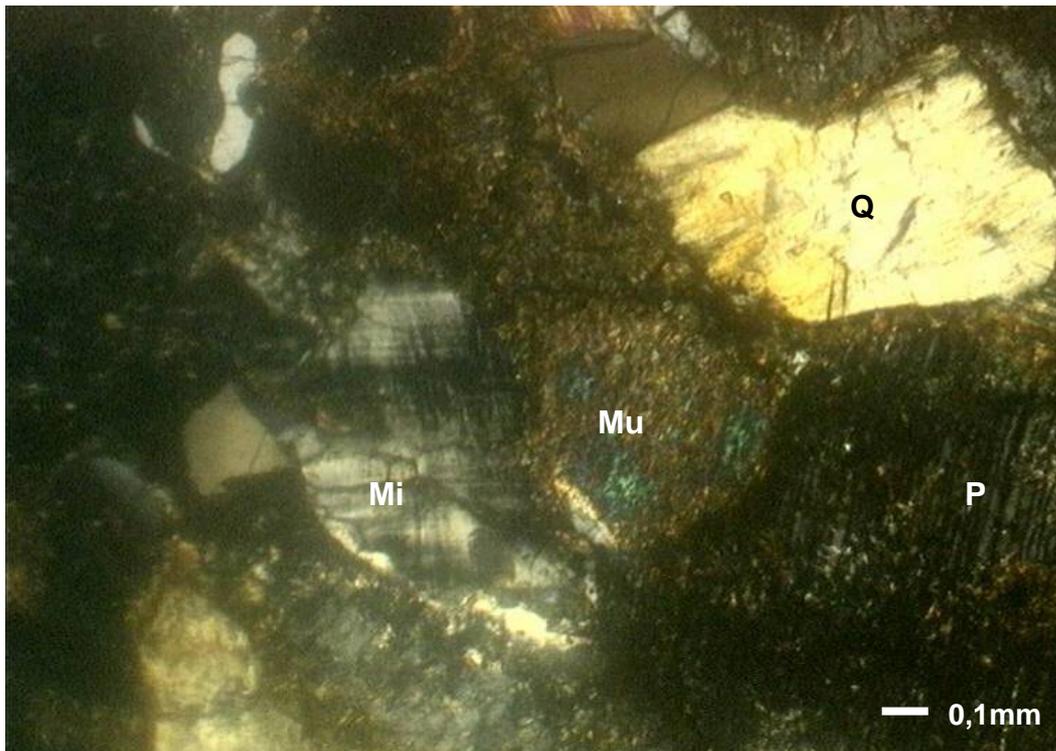


Figura 5.29 - Fotomicrografia da rocha R01. Microclina mais preservada. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. Mu – Muscovita; P – Plagioclásio; Mi – Microclina; Q – Quartzo

R 02 (24,4m)

Esta rocha se apresenta no geral mais alterada que a anterior. Seus grãos estão mais preservados, no entanto se observa maior quantidade de mineral secundário. Como mostra a Figura 5.30, o quartzo se apresenta mais recristalizado que na amostra anterior, em grãos menores e eventualmente alongados, confirmando a descrição macroscópica.

Além dos minerais citados na lâmina anterior, é possível observar a esta profundidade presença de zircão (Figura 5.31), turmalina e titanita como minerais acessórios.

A biotita, assim como na amostra anterior, já desapareceu, deixando apenas sua forma em seus minerais de alteração.

Na Figura 5.32 e na Figura 5.33 é possível observar a ação da alteração hidrotermal nos grãos de feldspato (plagioclásio e microclina). Isto é evidenciado pelo fato de o intemperismo estar atuando de dentro para fora dos grãos. Na Figura 5.34 observa-se que o plagioclásio se altera mais rápido que a microclina. Isso se dá porque o plagioclásio é mais pobre em sílica e, quanto mais rico em sílica for o mineral, mais resistente ele será ao intemperismo.

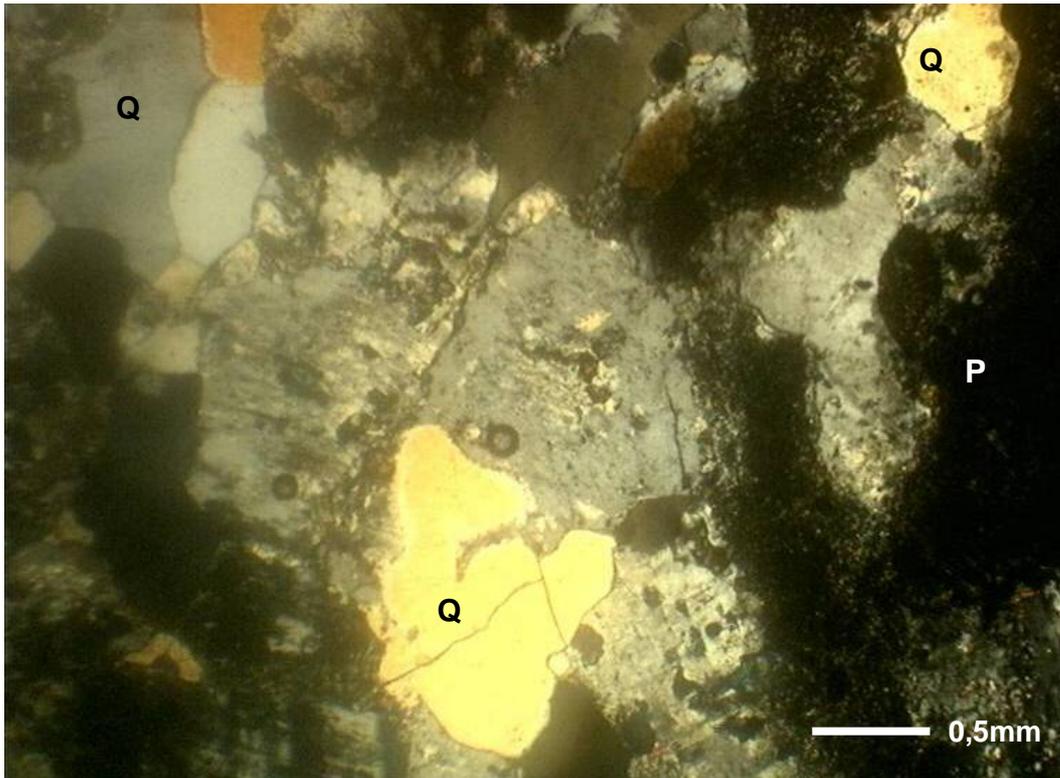


Figura 5.30 - Fotomicrografia da rocha R02. Profundidade 24,4m. Aumento de 25 vezes. Luz plana. P – Plagioclásio; Q – Quartzo

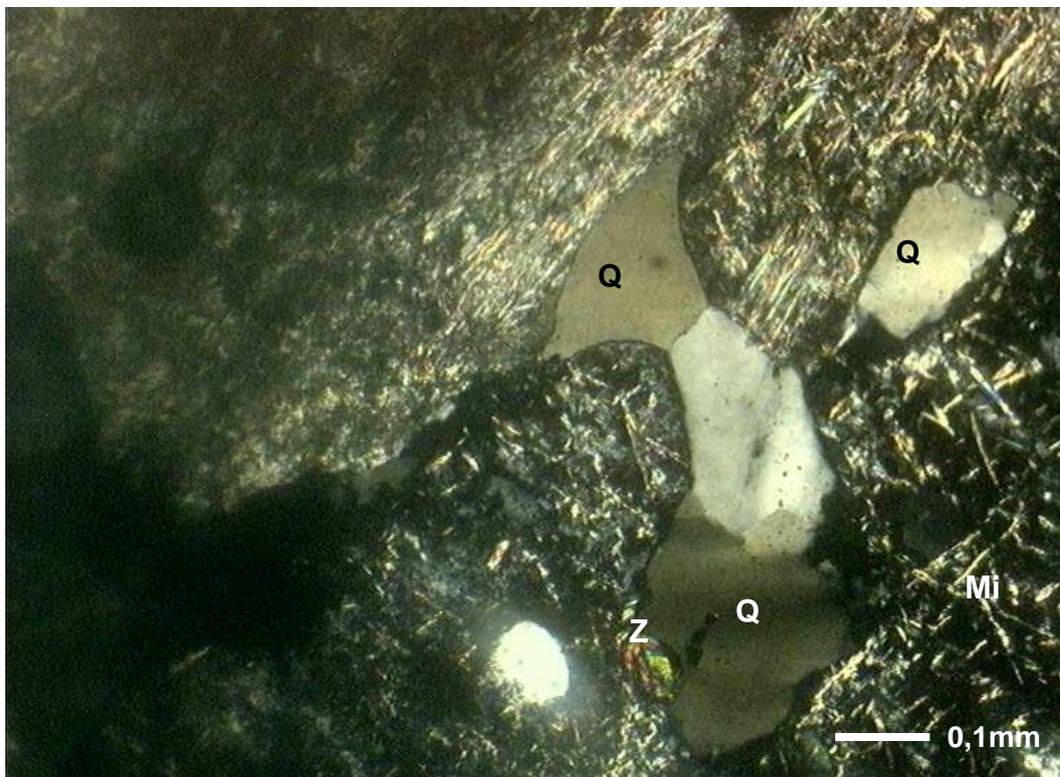


Figura 5.31 - Fotomicrografia da rocha R02. Zircão. Aumento de 100 vezes. Luz plana. Mi – Microclina; Q – Quartzo; Z - Zircão

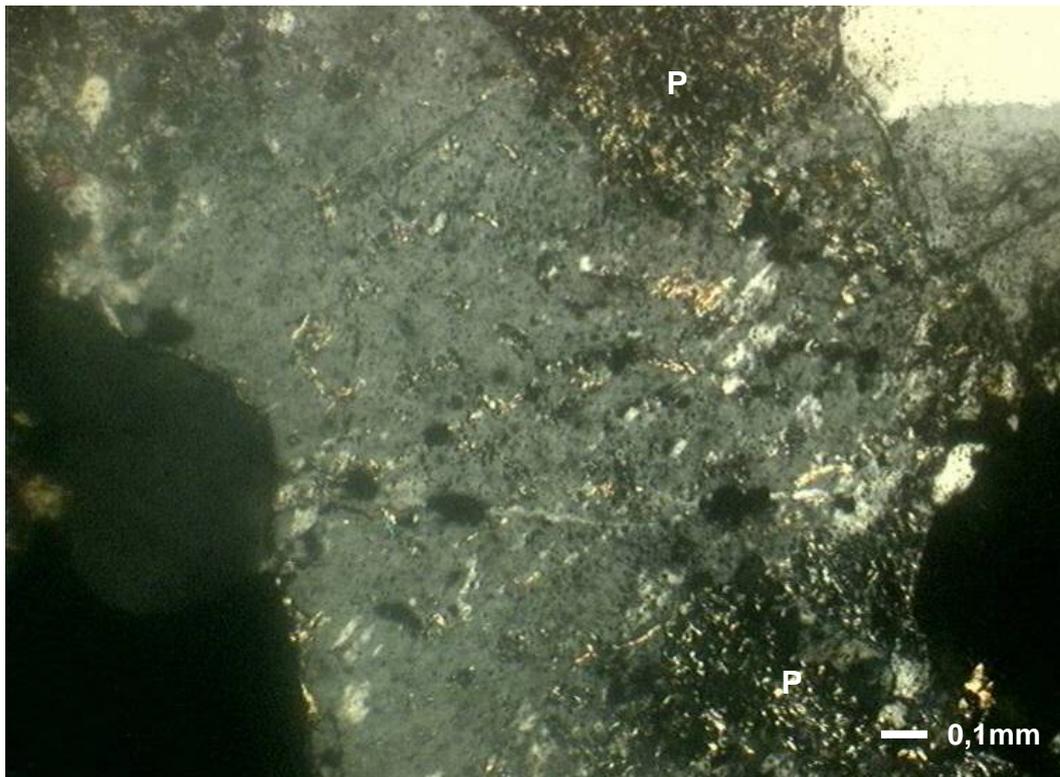


Figura 5.32 - Fotomicrografia da rocha R02. Indicação de alteração hidrotermal, intemperismo atuando de dentro para fora do grão de plagioclásio. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio

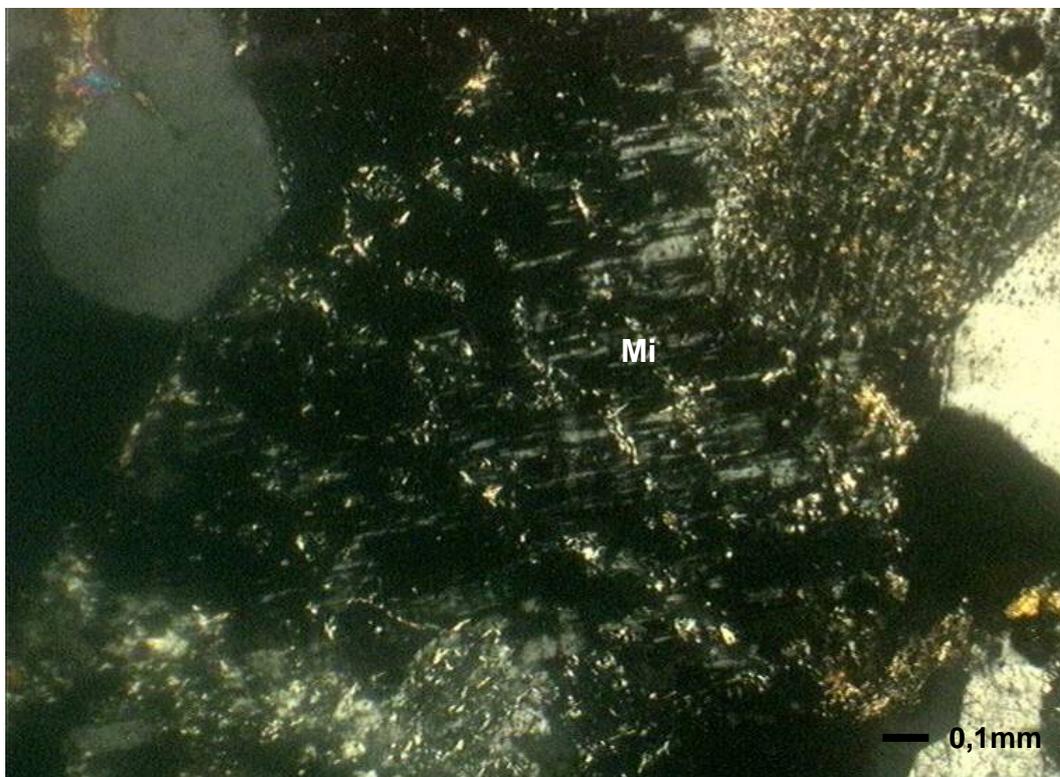


Figura 5.33 - Fotomicrografia da rocha R02. Microclina se alterando por hidrotermalismo. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. Mi – Microclina

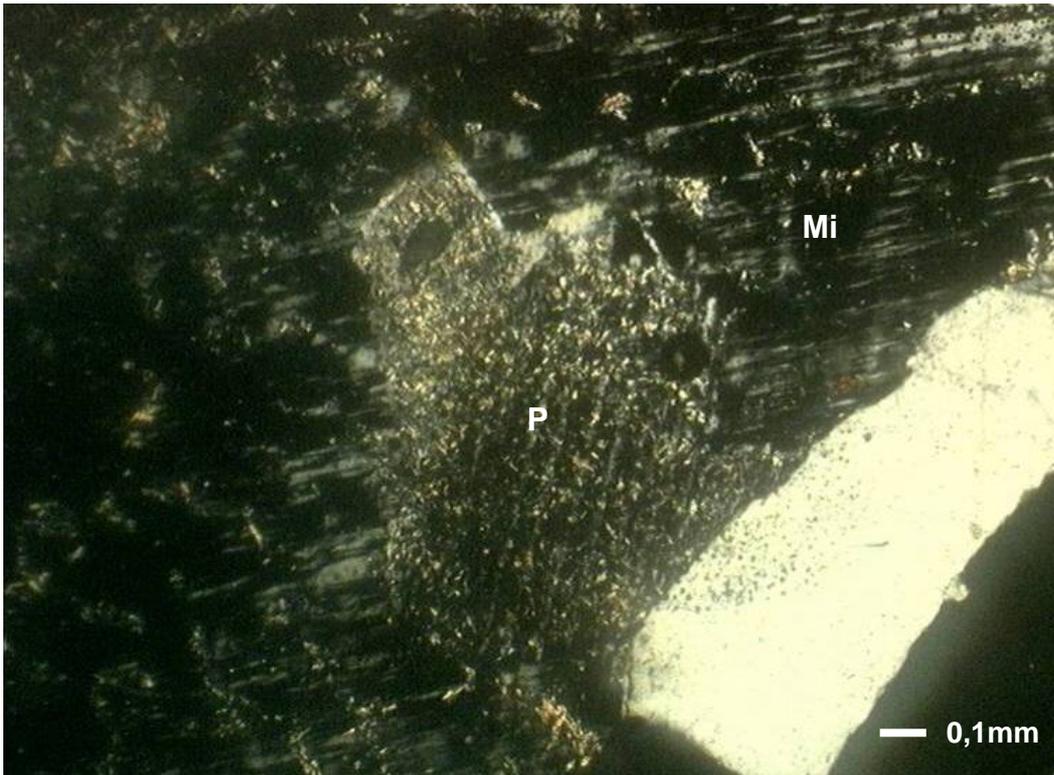


Figura 5.34 - Fotomicrografia da rocha R02. Plagioclásio mais alterado que a microclina. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio; Mi – Microclina

R 03 (25,5m)

A Figura 5.35 mostra que a esta profundidade a rocha se encontra fortemente alterada. Esta é a amostra mais intemperizada de todo o perfil. A lâmina é similar à lâmina da amostra R 02.

Na Figura 5.37 é possível observar titanita como mineral acessório.

Observa-se a esta profundidade uma grande quantidade de epidoto, originado pelo cálcio do plagioclásio que se uniu com o ferro da biotita. Isto é evidenciado na Figura 5.36 que mostra também a presença de zircão e feldspatos muito transformados.

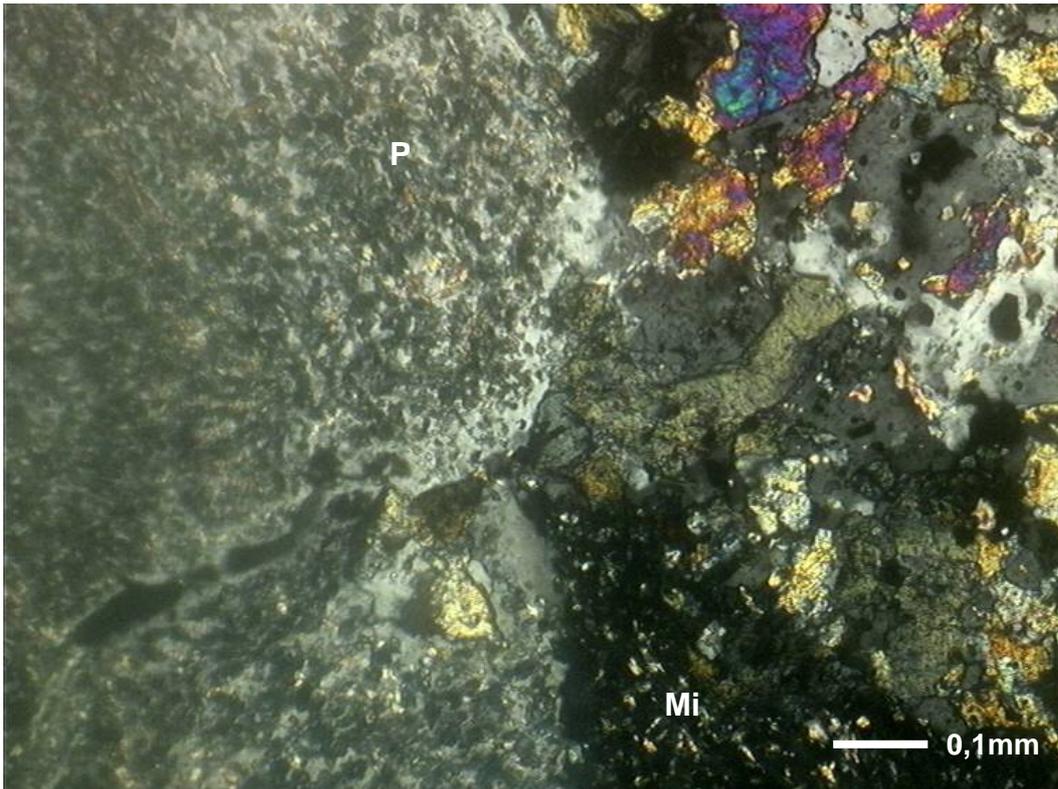


Figura 5.35 - Fotomicrografia da rocha R03. É a amostra mais alterada. Aumento de 100 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio; Mi – Microclina

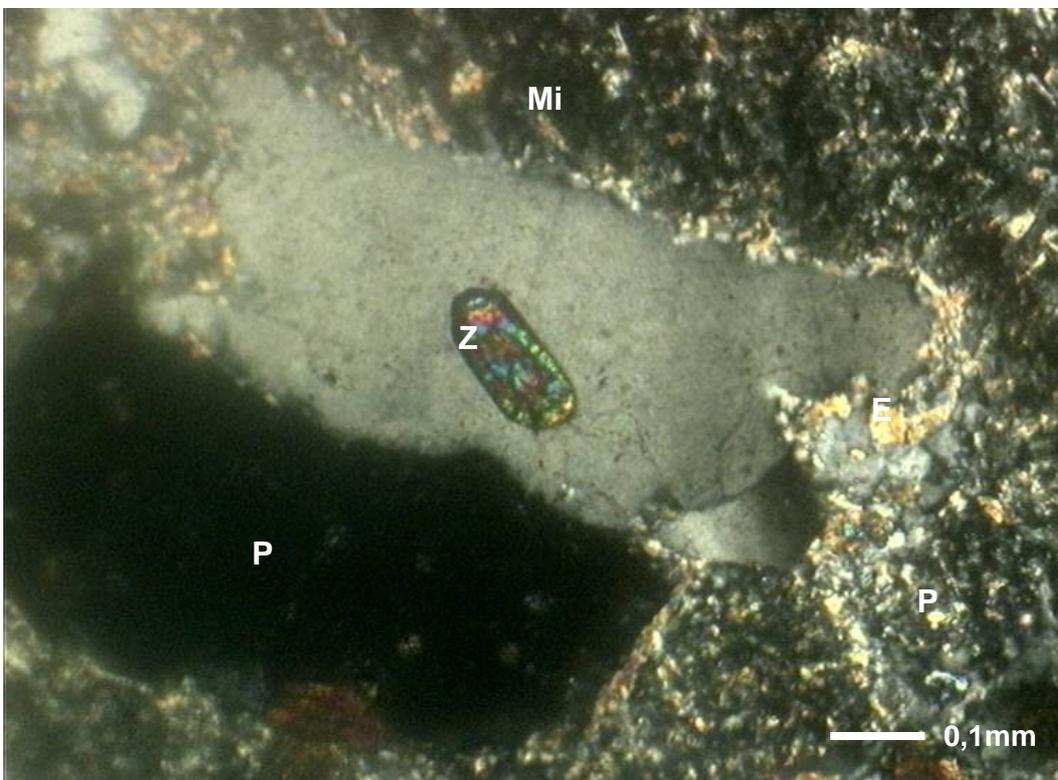


Figura 5.36 - Fotomicrografia da rocha R03. Zircão e feldspatos muito transformados. Grande quantidade de epidoto. Aumento de 100 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio; Mi – Microclina; Z - Zircão

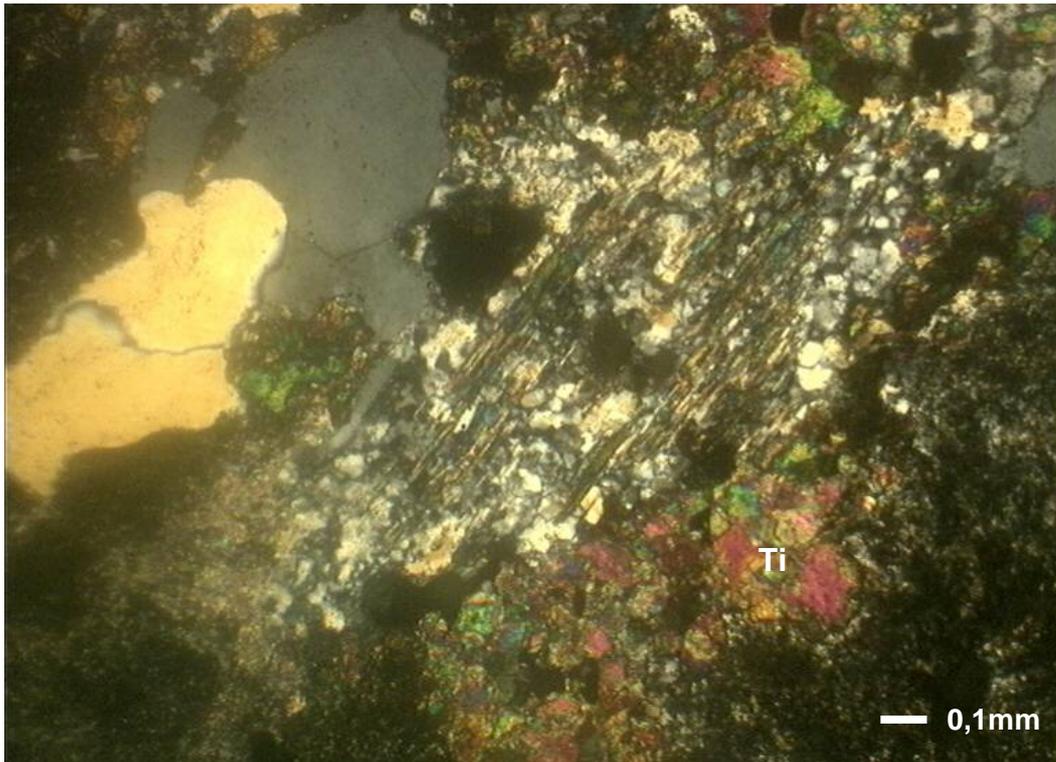


Figura 5.37 - Fotomicrografia da rocha R03. Titanita. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*.

Ti - Titanita

R 04 (25,8m)

Apesar de ser a amostra coletada na maior profundidade, esta não é a rocha mais intacta dentre as analisadas. Ela se apresenta mais alterada que a amostra R 01 e menos alterada que as demais. Cabe ressaltar que a lâmina estudada foi feita a partir da parte leucocrática da amostra, uma vez que, como citado no Capítulo 3, a amostra R 04 apresenta uma parte leucocrática⁴ e outra mesocrática⁵ bem distintas.

A Figura 5.40 evidencia a formação de muscovita por hidrotermalismo. É possível dizer que foi a ação hidrotermal que transformou o feldspato em mica (sericita) porque a transformação está ocorrendo de dentro do plagioclásio para fora. Observa-se também a presença de epidoto nesta amostra embora ele seja encontrado em menor quantidade que na R 03.

A Figura 5.38 e a Figura 5.39 mostram a biotita dando origem a epidoto e clorita.

⁴ Predominância de minerais claros e menos de 30-37% de minerais escuros.

⁵ Minerais claros e escuros aproximadamente em quantidades iguais sendo composta por mais de 30-37% e menos de 60-67% de minerais escuros.

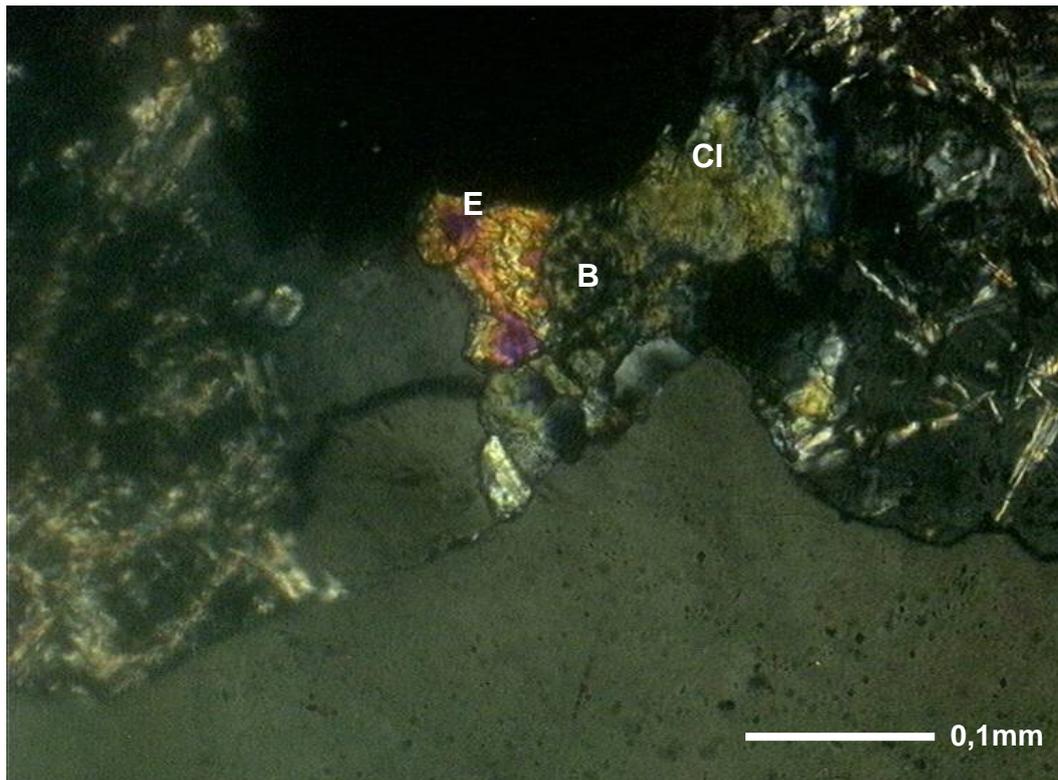


Figura 5.38 - Fotomicrografia da rocha R04. Biotita dando origem a epidoto e clorita. Aumento de 200 vezes. *Luz plana*. E – Epidoto; B – Biotita; Cl - Clorita

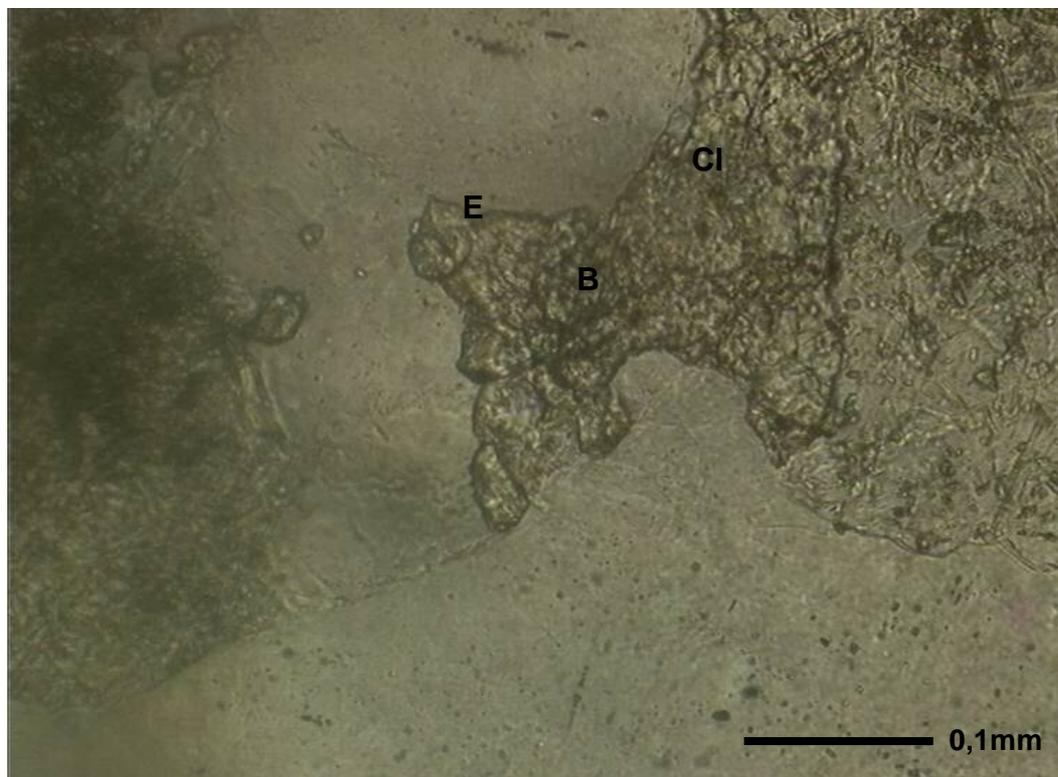


Figura 5.39 - Fotomicrografia da rocha R04. Biotita dando origem a epidoto e clorita. Aumento de 200 vezes. *Nicóis cruzados*. E – Epidoto; B – Biotita; Cl - Clorita

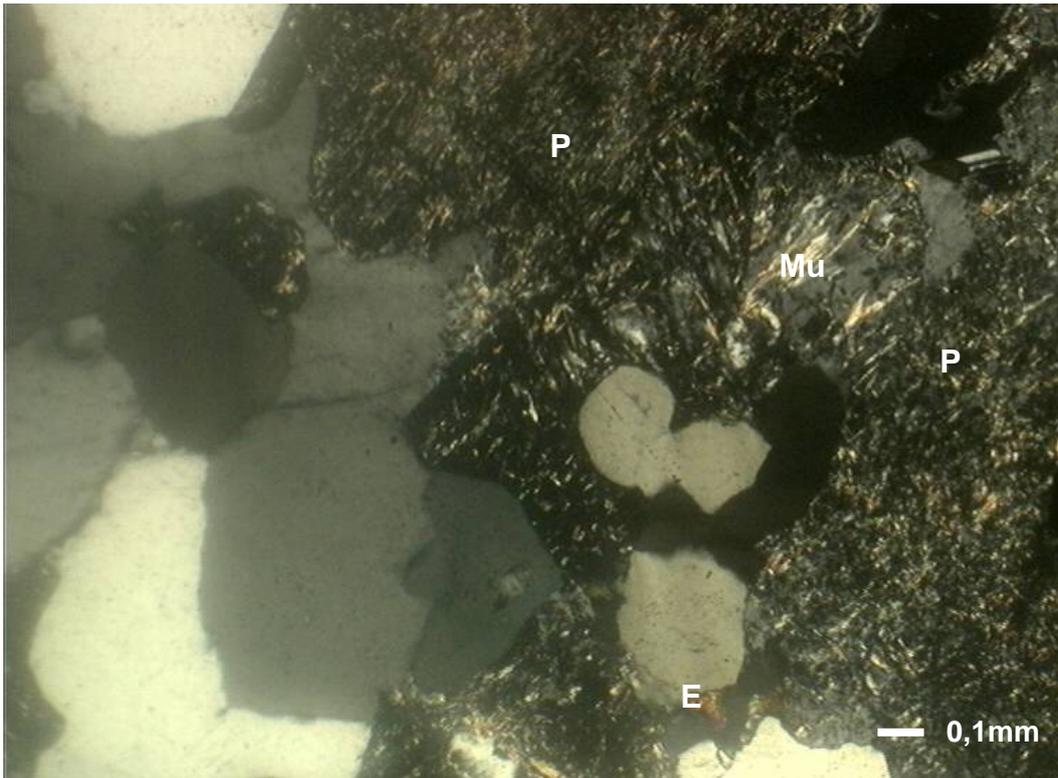


Figura 5.40 - Fotomicrografia da rocha R04. Profundidade 25,8m. Muscovita dentro do plagioclásio e presença de epidoto. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*. P – Plagioclásio; Mu – Muscovita; E - Epidoto

A Tabela 5.12 apresenta um resumo das descrições das lâminas de rocha de todo o perfil.

Tabela 5.12 – Descrição petrográfica das lâminas de rocha

Amostra / Profundidade	Minerais/ Observações	Tamanho (mm)	Quantidade (%)	Alteração	Forma dos grãos
R 01 (mais preservada) / 19,9m	Plagioclásio	5 à 6	35 à 40	Alterado	Hipidiomórfica ⁶
	Quartzo		20 à 30	Não alterado	Granular, xenomórfico ⁷
	Microclina	4 à 5	20 à 25	Alterado	Hipidiomórfica
	Biotita	3 à 4	15 à 20	Muito alterado	Hipidiomórfica
R 02 24,4m	Plagioclásio	3 à 4	30 à 35	Muito alterado	Hipidiomórfica tabular
	Quartzo	1 à 2	25 à 35	Não alterado	Granular, xenomórfico, eventualmente alongado
	Microclina	7 à 8	20 à 25	Muito alterado	Hipidiomórfica tabular
	Biotita	3 à 4	10 à 12	Muito alterado	Hipidiomórfica planar
R 03 (mais alterada) / 25,5m	Plagioclásio/ totalmente sericitizado	3 à 4	60 (juntamente com ^a microclina)	Muito alterado	Hipidiomórfica tabular
	Quartzo/ recristalizado / em bandas	3	30 à 35	Não alterado	Granular, xenomórfico, eventualmente alongado
	Microclina/ totalmente salsuritizada	7 à 8	60 (juntamente com ^o plagioclásio)	Muito alterado	Hipidiomórfica tabular
	Titanita+ Epidoto+ Carbonato	Minerais < 1mm Carbonato muito fino	5 à 10	Muito alterado	-
R 04 25,8m	Plagioclásio + Microclina	-	60	Alterado	Hipidiomórfica tabular
	Quartzo	3	5 à 10	Não alterado	Granular, xenomórfico
	Titanita+ Epidoto+ Carbonato	Minerais < 1mm Carbonato muito fino	5 à 10	Alterado	Hipidiomórfica planar

⁶ Mineral de forma parcialmente desenvolvida, limitada em até duas faces cristalinas.

⁷ Mineral de forma pouco desenvolvida, não limitada por faces cristalinas.

Na descrição macroscópica dos testemunhos de rocha, foi observado que o grau de intemperismo diminui com o aumento da profundidade. Isto não foi confirmado na análise das lâminas petrográficas, o que indica que a análise macroscópica apresenta limitações. Desse modo, conclui-se que, para avaliar o grau de intemperismo das rochas, as descrições macroscópicas devem ser sempre acompanhadas de análises petrográficas.

5.3.4. Micromorfologia dos solos

O estudo da organização das partículas de solo em escala microscópica chama-se micromorfologia. Com o auxílio de um microscópio óptico polarizante, também conhecido como microscópio petrográfico, foram analisadas amostras de solo indeformadas, preparadas em lâminas finas (com cerca de 30µm de espessura).

A micromorfologia é uma técnica muito útil no estudo da gênese do solo. Com o auxílio das técnicas de processamento e análise digital de imagem, a micromorfologia é capaz de fornecer resultados de porosidade com precisão elevada.

Na verdade, a análise micromorfológica é uma continuação da análise morfológica de campo, numa escala que não se pode trabalhar à vista desarmada. Portanto, assim como no campo, os solos sob o microscópio também se apresentam diferentes uns dos outros.

Neste item serão discutidas as características micromorfológicas dos solos de quatro camadas que formam o perfil estudado. Foram analisadas lâminas delgadas de diferentes profundidades, representativas dos solos Branco, Amarelo, Laranja e Marrom, com a finalidade de caracterizar a morfologia dos poros, a mineralogia do solo e sua microestrutura. Infelizmente não foi confeccionada uma lâmina do solo Vermelho. Isto porque esta camada foi acrescentada ao perfil posteriormente, em função de se observar que a camada de solo superior apresentava comportamentos distintos para amostras morfológicamente similares. Nesta ocasião, as lâminas dos outros quatro solos já estavam em fase de análise e a confecção de uma nova lâmina atrasaria o andamento dos trabalhos.

Evitou-se descrever as lâminas nas proximidades de suas bordas. Estas análises também foram realizadas com o intuito de complementar a análise de

evolução dos minerais primários ao longo do perfil em função do grau de intemperismo.

A seguir estão apresentadas as características referentes aos constituintes e à estrutura dos solos dos diferentes níveis do perfil de solo residual estudado nesta dissertação. Além da caracterização da micromorfologia dos solos é também apresentado o resultado de análise da diferenciação do espaço poral pelo método de contagem de pontos. Os vazios são representados por vários tons de azul.

É importante ressaltar que os dados de propriedades físicas apresentaram alguns valores distintos do que foi encontrado na contagem do espaço poral. Isto vem demonstrar que a análise micromorfológica é também de fundamental importância na análise dos solos.

Através da análise dos blocos das diferentes profundidades observa-se que há um elevado percentual de macroporos nas amostras mais intemperizadas.

Segundo Bertolino (2004), os solos residuais maduros apresentam características bem peculiares, apresentando, na grande maioria das vezes, uma estrutura em blocos, alta porosidade e permeabilidade. Estas características não foram fortemente evidenciadas no solo Marrom, confirmando, mais uma vez, que embora seja o solo mais intemperizado do perfil, trata-se ainda de um solo residual jovem.

As Figuras a seguir apresentam os dados de morfologia dos poros, de mineralogia do solo e de sua microestrutura. O resumo das descrições micromorfológicas dos solos ao longo do perfil é apresentado na Tabela 5.13. Podem-se verificar no perfil modificações principalmente em relação à estrutura do solo e à porosidade.

Solo Marrom

A Figura 5.41 mostra a presença de macroporos no solo Marrom. O poro fotografado é na forma de canal e tem aproximadamente 1 mm de espessura. A Figura 5.42 apresenta grande quantidade de óxidos precipitados, indicando que o solo Marrom é um solo já bastante intemperizado. Isto é confirmado na Figura 5.43 que mostra a grande quantidade de plasma encontrada neste solo.



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

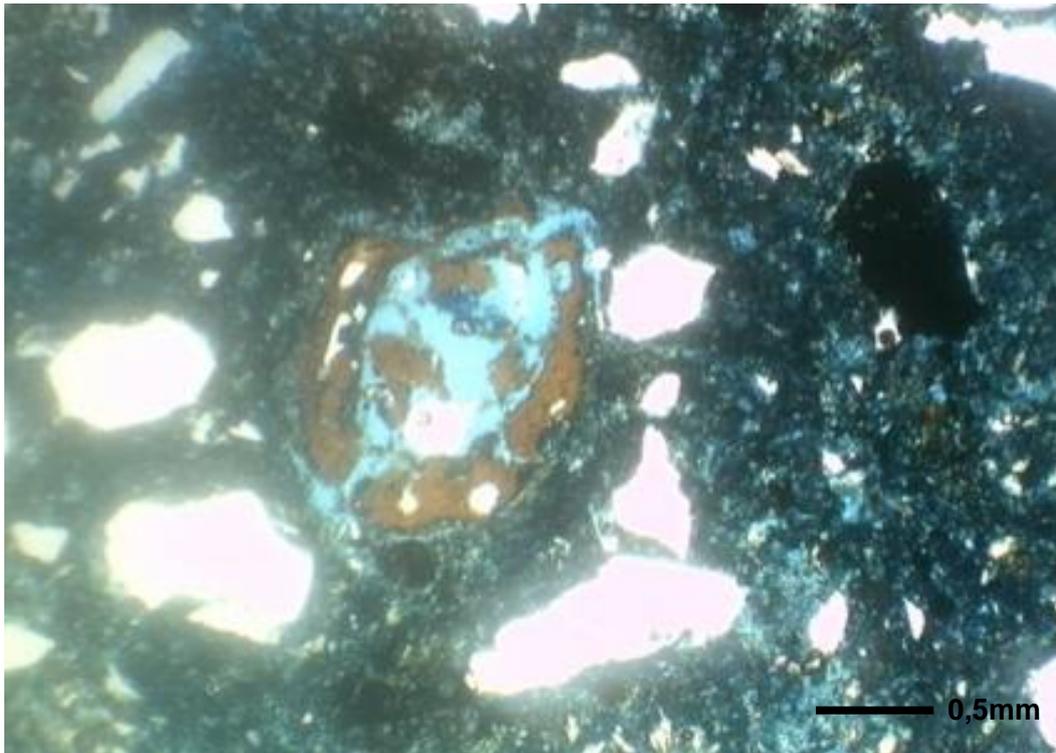


Figura 5.42 – Fotomicrografia do solo Marrom. Óxidos precipitados. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

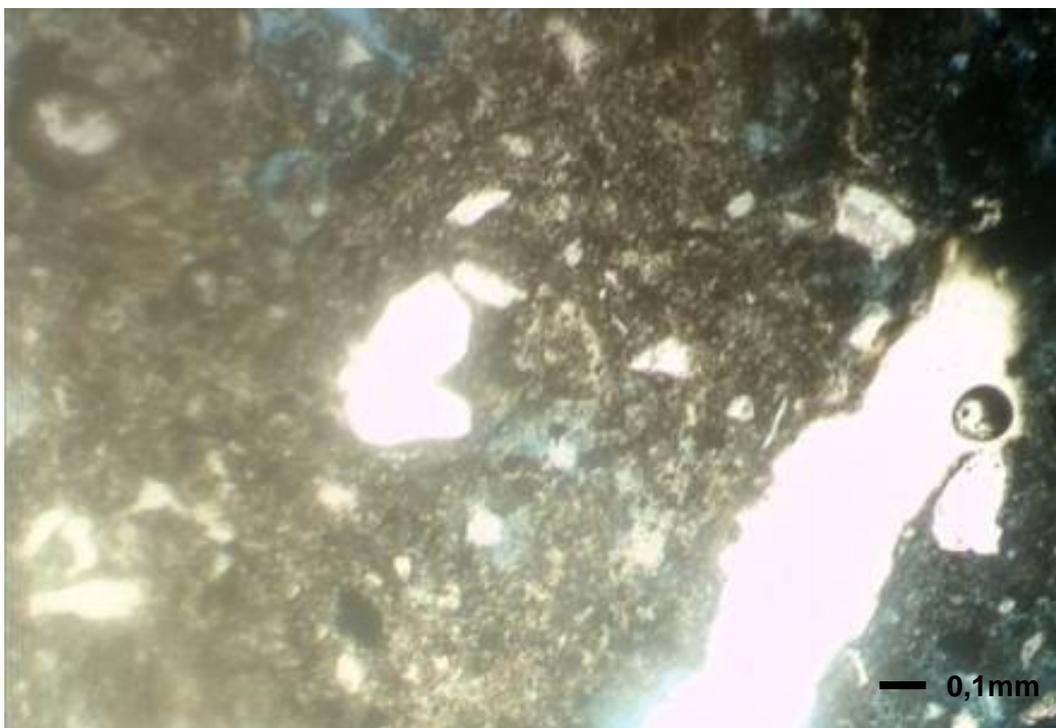


Figura 5.43 – Fotomicrografia do solo Marrom. Freqüência alta de plasma. Aumento de 50 vezes. *Luz plana*

Solo Laranja

Na Figura 5.44 observa-se a porosidade do solo Laranja. É possível perceber que, no geral, o diâmetro dos poros é menor que no solo Marrom. A Figura 5.45 mostra 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. Na Figura 5.46 observa-se um pedotúbulo⁸, o que indica que neste solo existe atividade microbiana.



Figura 5.44 – Fotomicrografia do solo Laranja. Presença de microporos. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

⁸ Feições de preenchimento caracterizadas pela forma externa tubular, preenchidas total ou parcialmente por materiais de diferentes origens, podendo atingir dimensões milimétricas ou centimétricas.

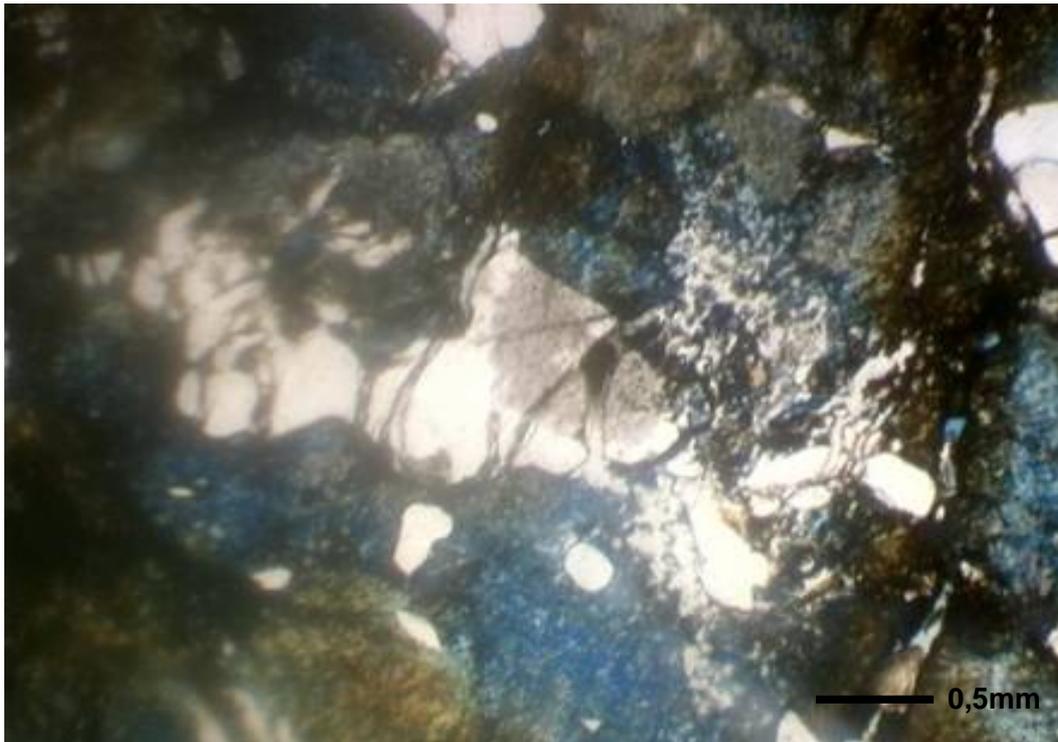


Figura 5.45 – Fotomicrografia do solo Laranja. Alta porosidade do solo. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

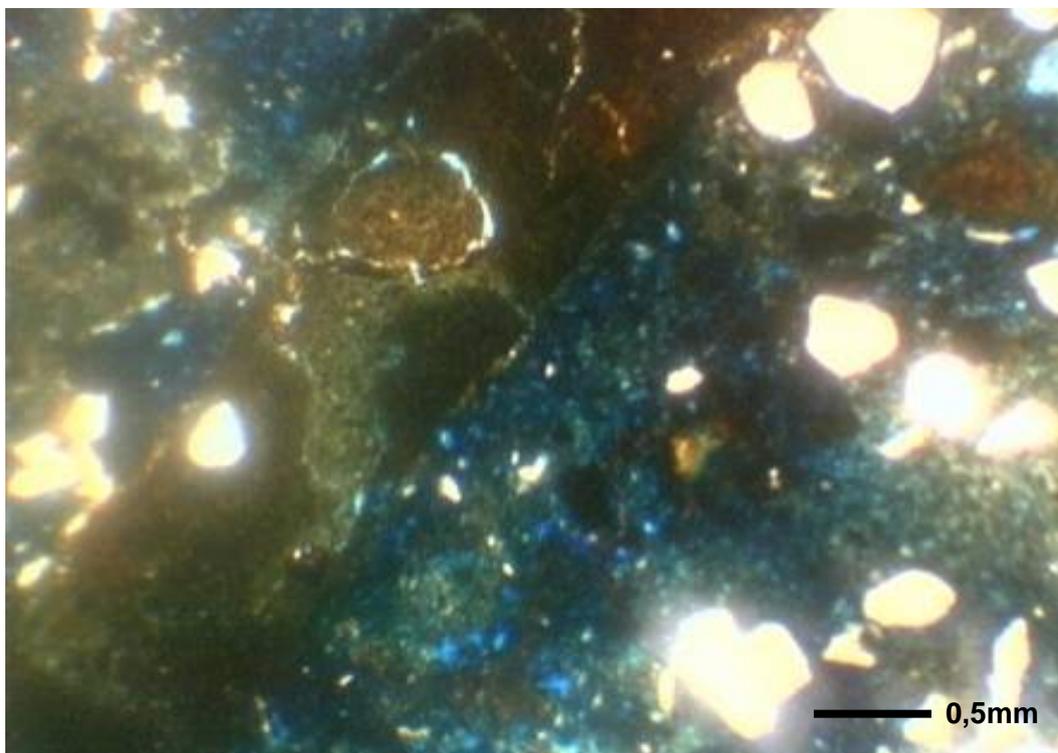


Figura 5.46 – Fotomicrografia do solo Laranja. Pedotúculo. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

Solo Amarelo

Na Figura 5.47 e na Figura 5.48 observa-se um plagioclásio muito alterado. Isto confirma que o solo Amarelo se encontra menos intemperizado que o Laranja já que, no solo Laranja, as formas dos minerais já não são mais distinguidas.

Na Figura 5.49 observa-se minerais muito alterados, quartzo e epidoto.

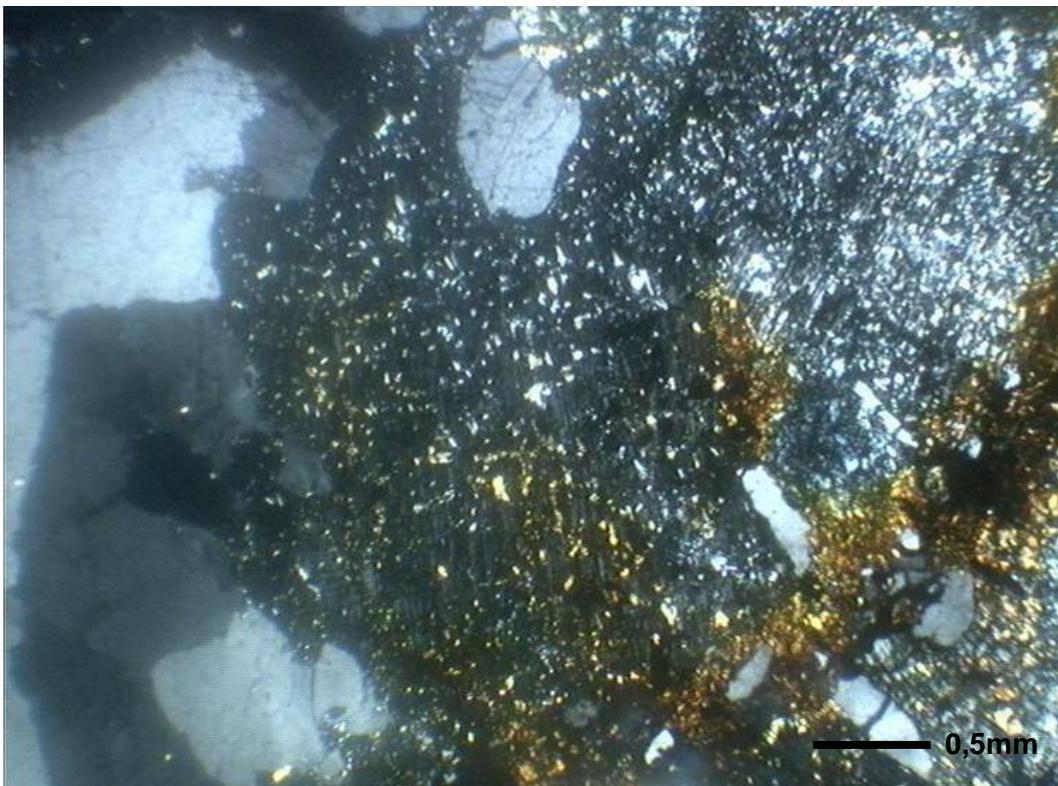


Figura 5.47 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Plagioclásio. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

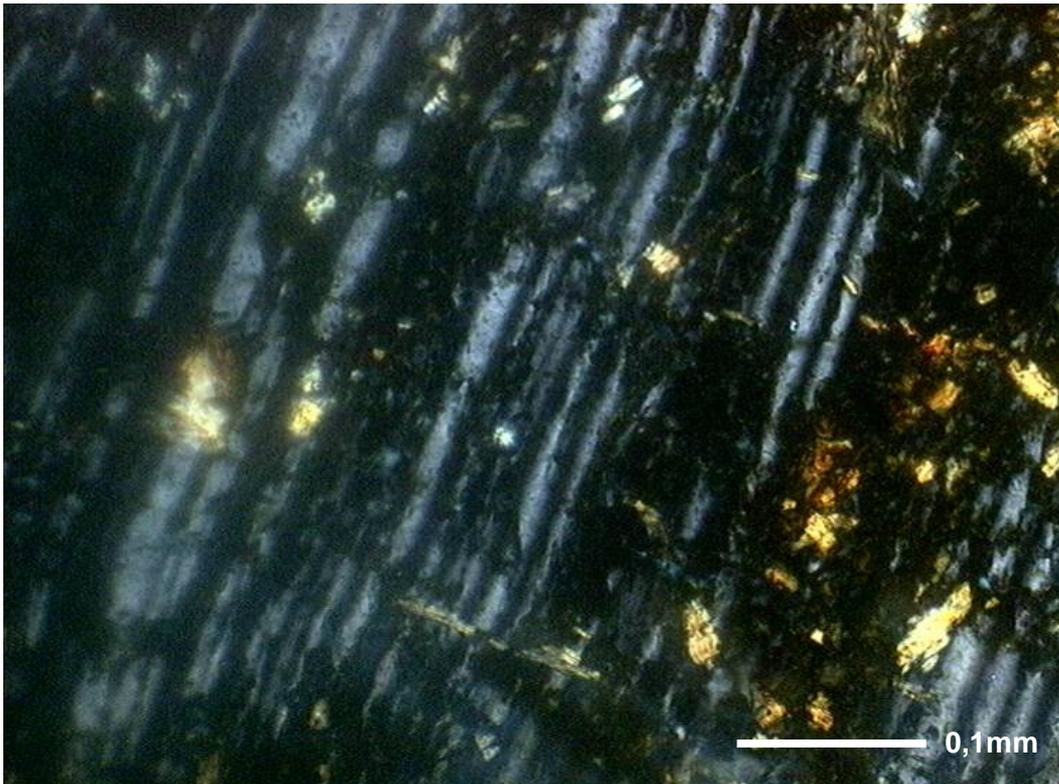


Figura 5.48 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Plagioclásio. Aumento de 200 vezes. *Luz plana*

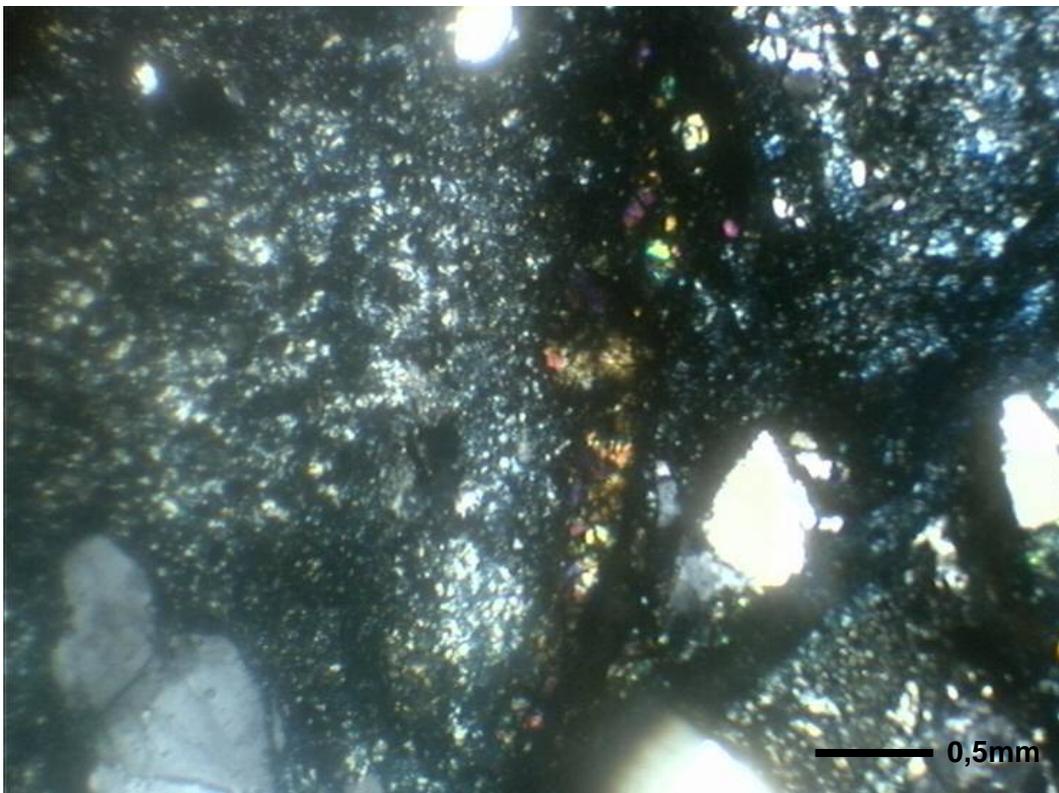


Figura 5.49 – Fotomicrografia do solo Amarelo. Epidoto. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

Solo Branco

Na Figura 5.50 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.

Na Figura 5.51 observa-se um plagioclásio em processo de alteração. Esta estrutura mais preservada pode ser comparada com os plagioclásios encontrados nas amostras de rocha.

Observa-se na Figura 5.52 a presença de poros maiores que nos solos Amarelo e Laranja.

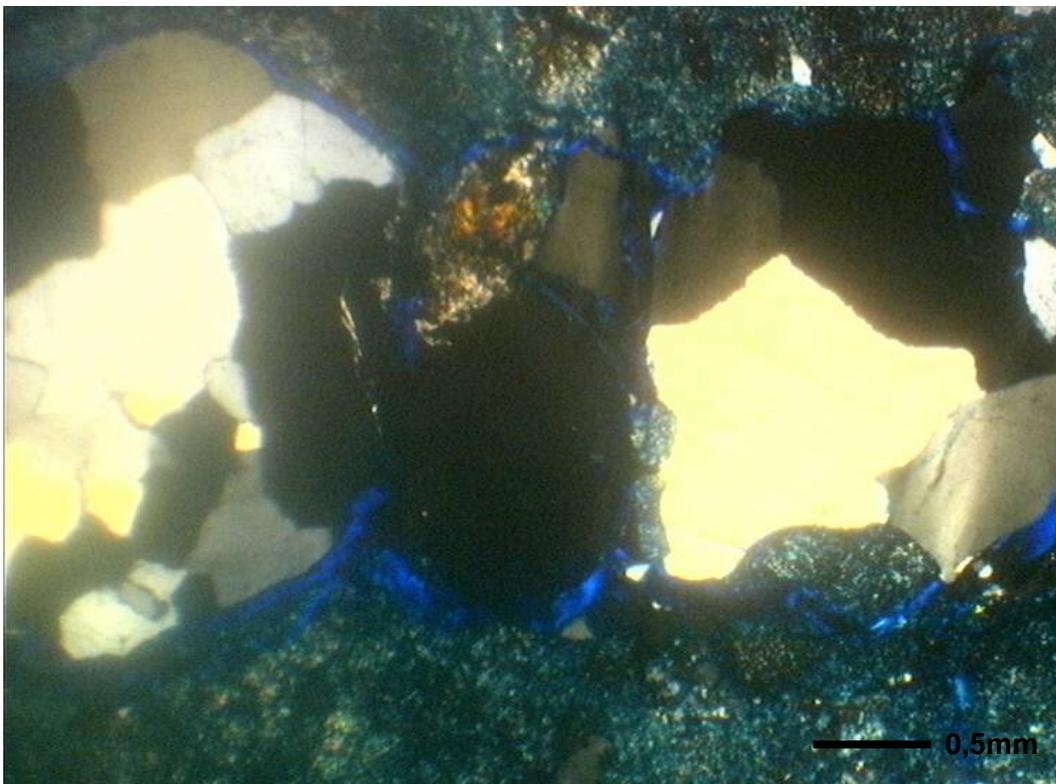


Figura 5.50 – Fotomicrografia do solo Branco. Quartzo. Aumento de 25 vezes. *Nicóis cruzados*

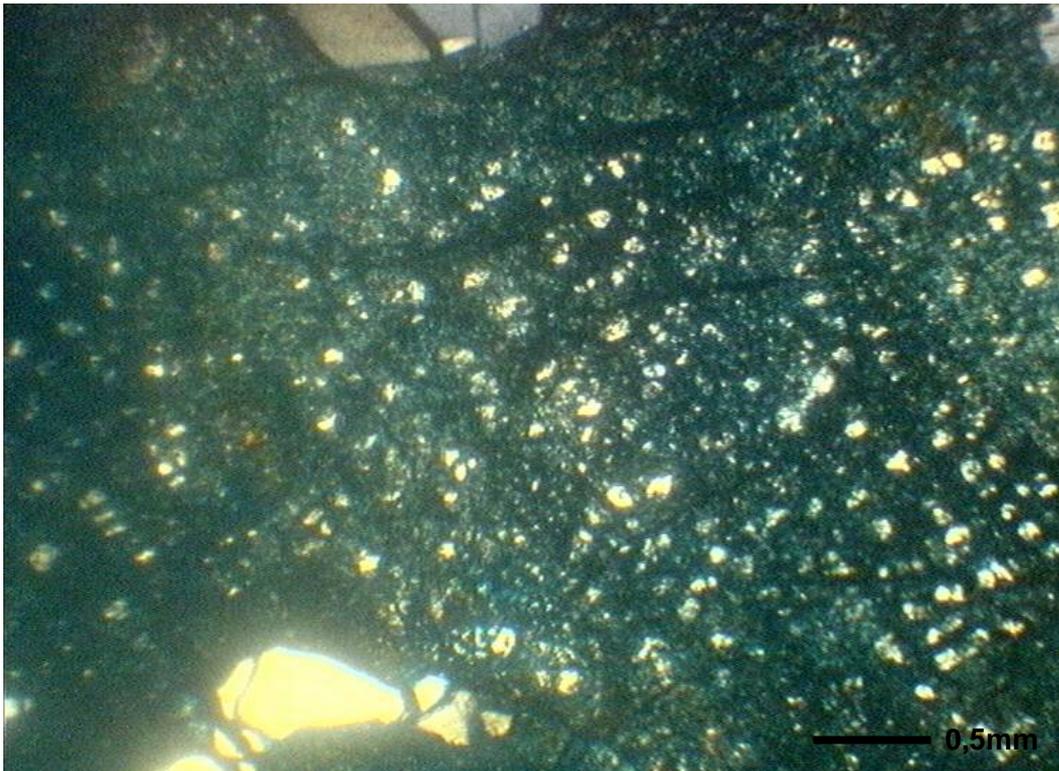


Figura 5.51 – Fotomicrografia do solo Branco. Mineral se alterando. Aumento de 25 vezes. *Nicóis cruzados*

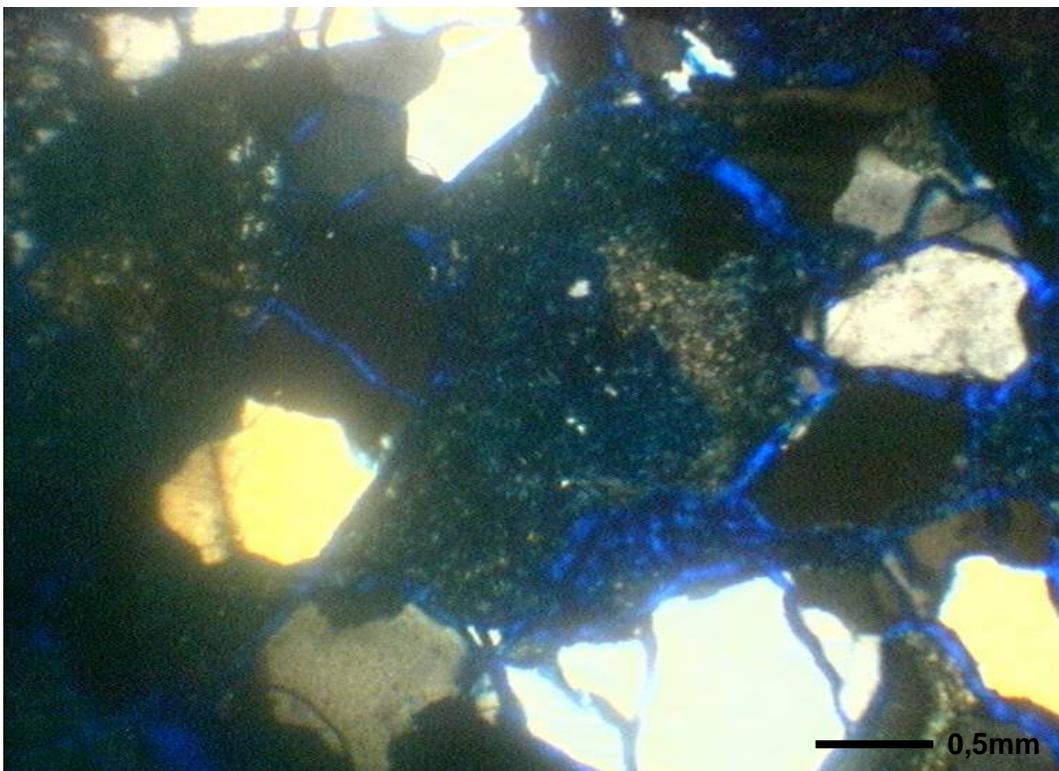


Figura 5.52 – Fotomicrografia do solo Branco. Porosidade. Aumento de 25 vezes. *Luz plana*

A Tabela 5.13 apresenta a frequência dos constituintes da lâmina que pôde ser contabilizada através de contagem de pontos. Frequência refere-se à abundância de determinada fração no campo visual observado, indicada em porcentagem. As frações observadas na micromorfologia são: poros, plasma e esqueleto.

Esqueleto é a parte observada na lâmina formada por partículas maiores que 2 μm , granulometricamente classificadas como areia e silte. Constitui-se de minerais primários (quartzo, feldspatos, micas etc.).

O plasma é composto por partículas menores que 2 μm , granulometricamente classificadas como fração argila. O plasma pode conter argilominerais, matéria orgânica, sais, óxidos, hidróxidos etc. As partículas do plasma em geral não podem ser unitariamente identificadas por microscopia óptica, necessitando para isso de corantes, difração de raios-X, observação por microscopia eletrônica de varredura ou de transmissão, entre outros meios. O solo Marrom é o que apresenta quantidade mais significativa de plasma. É também o único que apresenta macroporos muito finos, indicando tratar-se do solo mais intemperizado dentre os estudados.

Já os poros são os volumes “vazios”, isto é, orifícios ou aberturas desprovidos de materiais sólidos que atuam de diferentes formas, capazes de reter líquidos (soluções) e/ou permitir sua percolação, bem como a passagem de ar (gases), de animais, raízes etc. Podem ter diversas origens, formas e dimensões.

A Tabela 5.13 mostra que existe uma correlação entre o grau de intemperismo e a porcentagem de poros, de plasma e de esqueleto. Com o aumento da profundidade ocorre um aumento da porcentagem de esqueleto e uma diminuição na quantidade de plasma e poros. Isso só se inverte no solo Laranja. Os poros foram classificados segundo sua dimensão e segundo sua forma. Detalhes desta classificação são encontrados no Apêndice I.

A pedalidade é a constituição física de um solo, expressa pelo tamanho, pela forma e pelo arranjo dos agregados elementares, podendo ser avaliada segundo seus graus de desenvolvimento. O grau de pedalidade indica o grau de desenvolvimento dos agregados argilosos com base na extensão dos poros em seu contorno. O grau de pedalidade aumenta à medida que vai havendo a formação de argilominerais. Portanto está ligado ao grau de evolução dos solos. Os dados de grau de pedalidade da Tabela 5.13 evidenciam mais uma vez que no perfil de solo estudado o grau de intemperismo aumenta com a diminuição da profundidade.

Tabela 5.13 – Resumo da descrição micromorfológica⁹

Registro da amostra	Solo	Mineralogia	Frequência (% da área da lâmina)			Dimensão dos poros	Forma dos poros	Grau de pedalidade	Forma dos pedes	Textura dos pedes	Distribuição relativa dos pedes
			Esqueleto	Plasma	Poros						
2.4113.05	Marrom	Quartzo, óxidos de ferro e alumínio e argilominerais	18,23	40,89	40,89	Macroporos muito finos (entre 75 e 1000µm)	canal e planar oblíqua	Média a alta	subangular	ondulada	porfirica
2.4042.05	Laranja	Quartzo, vestígios de plagioclásio mica (biotita), óxidos de ferro e alumínio e argilominerais	26,2	47,4	26,4	Mesoporos	planar	média	subangular	ondulada	porfirica
2.4049.05	Amarelo	Quartzo, hematita, muscovita, vestígios de plagioclásio altamente sericitizado (mas ainda mantém as macias) e epidoto intemperizado e não intemperizado	34,8	35,3	30,1	Macroporos (+- 200µm)	planar	baixa	angular	ondulada	porfirica
2.4026.05 2.4089.05	Branco	Quartzo, óxidos de ferro e de alumínio, e mica (muscovita)	45,3	30,5	24,4	Macroporos e mesoporos	planar	baixa	subangular	ondulada	porfirica

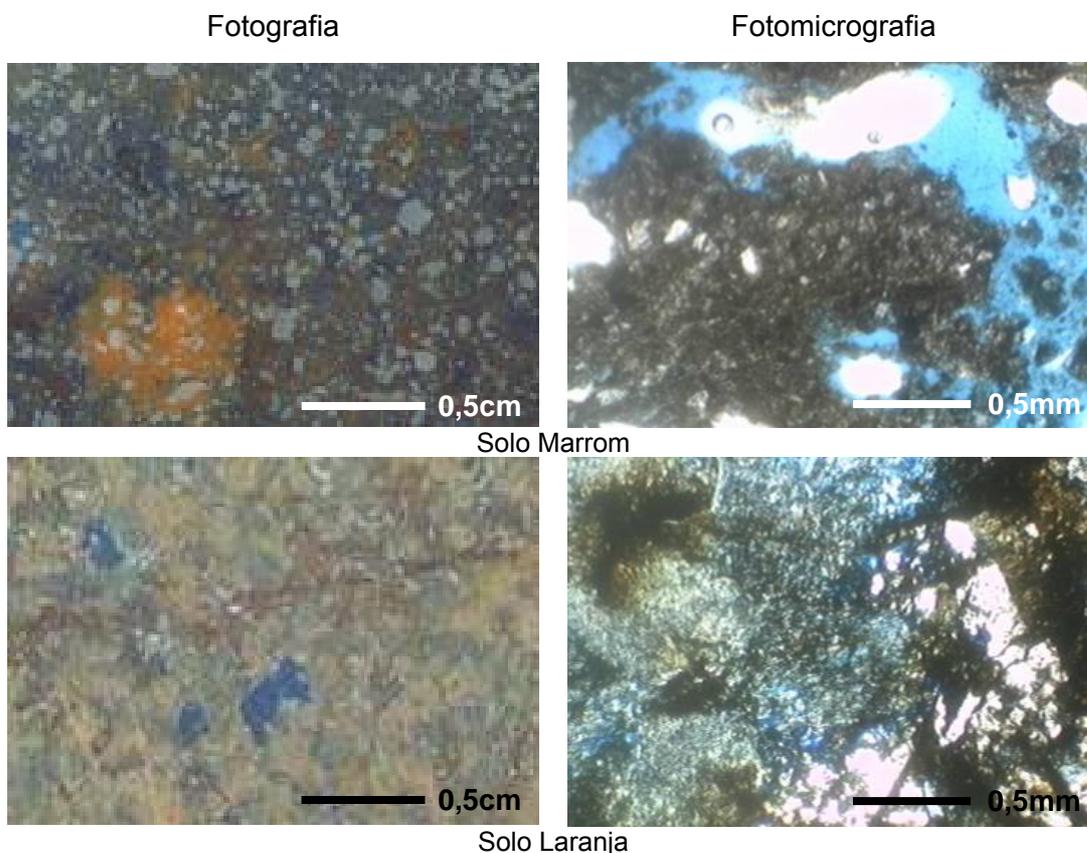
⁹ Ver Apêndices I e II

A forma dos pedes é dada por seu grau de arredondamento. O grau de arredondamento trata da característica superficial relacionada à agudeza dos cantos. De modo simplificado, pode-se classificar a superfície como angular quando apresenta facetas com vértices agudos, como subangular quando as facetas apresentam vértices ligeiramente arredondados, como subarredondado quando as curvas intercalam-se a facetas, como arredondado quando apresenta curvas não concordantes e como bem arredondado quando apresenta somente curvas suaves e concordantes.

A textura dos pedes é dada principalmente por sua rugosidade. Maiores detalhes sobre a classificação da pedalidade dos solos estudados são encontrados no Apêndice II.

5.3.5. Evolução microestrutural do perfil

Com base na petrografia e na micromorfologia dos solos, é apresentada a seguir uma seqüência de fotografias e de fotomicrografias das lâminas de solo e de rocha.



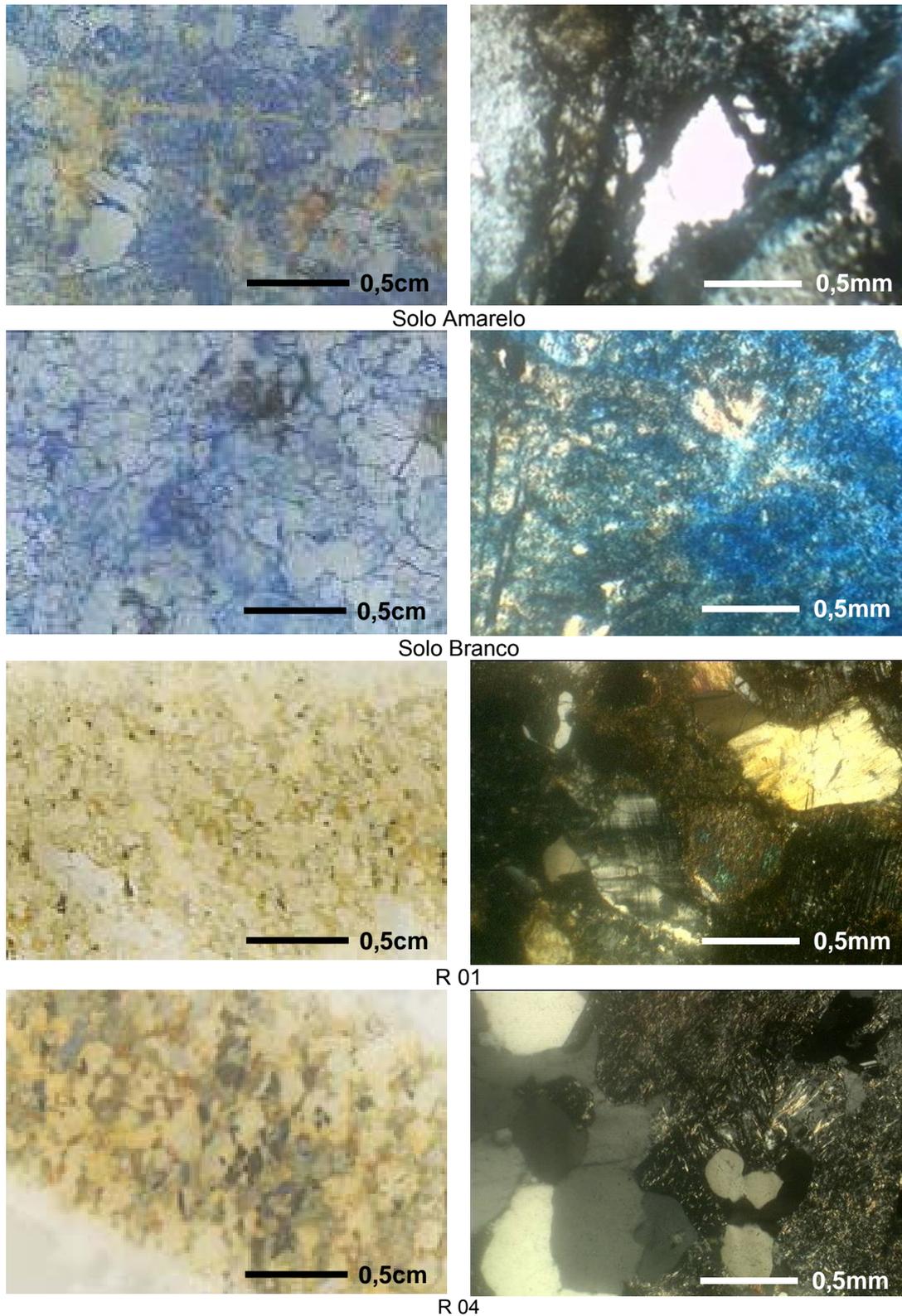


Figura 5.53 – Evolução microestrutural do perfil estudado

Na Figura 5.53, especialmente nas fotomicrografias (fotos das lâminas microscópicas) observa-se toda a transição da microestrutura da rocha até o solo mais superficial, em função do aumento do intemperismo. Nas amostras de

rocha observa-se a presença de minerais primários e o contato entre eles, características microestruturais da rocha são. É possível perceber que à medida que a profundidade diminui, ocorre a formação dos minerais secundários bem como o aumento da porosidade estipulada por estes minerais.

5.4. Análises microbiológicas

Foram determinadas a quantidade de microorganismos viáveis e cultiváveis bem como a atividade microbiana degradadora total dos solos do perfil. A seguir estão apresentados, sob a forma de tabelas e gráficos, os resultados obtidos para as cinco camadas de solo identificadas no Capítulo 3.

A Tabela 5.14 mostra a variação da quantidade de microorganismos ao longo do perfil estudado. A contagem foi realizada em duplicata para cada uma das camadas de solo. Os valores não apresentados na tabela não puderam ser determinados em função de contaminação de materiais e/ou falhas de execução. A Figura 5.54 apresenta valores médios dessas contagens.

Tabela 5.14 - Microrganismos viáveis e cultiváveis no meio TSA 10%

Registro da amostra	Solo	UFC/g de solo seco
2.4518.05	Marrom	$6,92 \times 10^6$
2.4518.05	Marrom	$1,20 \times 10^7$
2.4517.05	Vermelho	$1,53 \times 10^5$
2.4517.05	Vermelho	$1,70 \times 10^6$
2.4516.05	Laranja	$2,44 \times 10^6$
2.4516.05	Laranja	*
2.4515.05	Amarelo	$9,80 \times 10^5$
2.4515.05	Amarelo	$1,74 \times 10^5$
2.4514.05	Branco	$1,87 \times 10^6$
2.4514.05	Branco	*

*valores não determinados

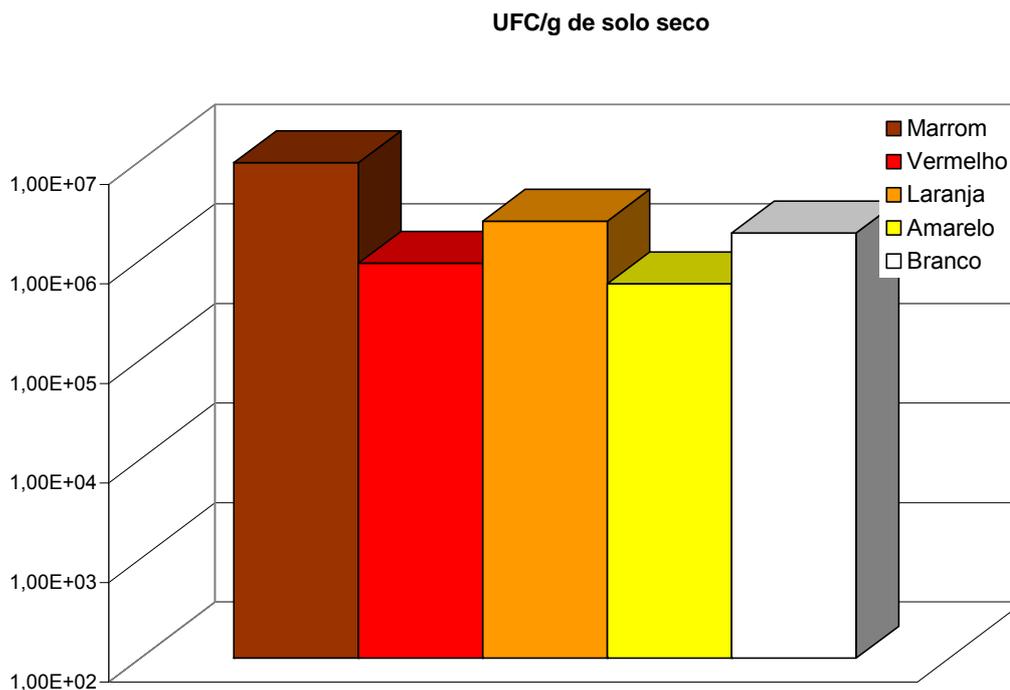


Figura 5.54 – Contagem de microrganismos viáveis e cultiváveis no meio TSA 10% - valores médios

Observa-se no gráfico que a variação na quantidade de microrganismos foi pequena entre os solos Marrom, Laranja e Branco, dentro da mesma ordem de grandeza. Já os solos Vermelho e Amarelo apresentaram uma quantidade significativamente menor, uma ordem de grandeza, de microrganismos viáveis e cultiváveis (bactérias e fungos).

Os resultados se mostram contrários aos encontrados na literatura (Moreira e Siqueira, 2002) que apontam para uma diminuição progressiva da quantidade de microrganismos com o aumento da profundidade em um perfil de solo.

A análise morfológica das colônias observadas na presente dissertação sugere haver diferença nas populações das diferentes camadas em concordância com o observado por Fierer *et al.* (2002). No entanto, para consolidar esta hipótese, mais investigações precisam ser realizadas, utilizando-se outras metodologias para determinação da biomassa microbiana como: taxa de respiração, análise de ácidos graxos de membrana entre outras.

Na Tabela 5.15 estão apresentados os dados relativos à atividade de enzimas degradadoras de matéria orgânica. A determinação foi realizada em duplicata para cada uma das camadas de solo.

Na Figura 5.55 observa-se que o solo Marrom, mais rico em matéria orgânica, apresenta uma taxa metabólica quase 15 vezes maior que a média dos demais. Dentre o restante dos solos não houve variação considerável, estando todos na mesma ordem de grandeza. Estes dados são esperados uma vez que esta atividade está diretamente relacionada a quantidade de matéria orgânica disponível para degradação. Sugere-se que ensaios utilizando atividades metabólicas microbianas como a desidrogenase, ou outras relacionadas a elementos presentes no perfil de solo estudado, sejam executadas.

Tabela 5.15 – Atividade microbiana degradadora total

Registro da amostra	Solo	μg de fluoresceína/g de solo seco/hora
2.4518.05	Marrom	12,827
2.4518.05	Marrom	17,594
2.4517.05	Vermelho	0,934
2.4517.05	Vermelho	2,532
2.4516.05	Laranja	0,842
2.4516.05	Laranja	0,955
2.4515.05	Amarelo	0,610
2.4515.05	Amarelo	0,693
2.4514.05	Branco	0,733
2.4514.05	Branco	0,938

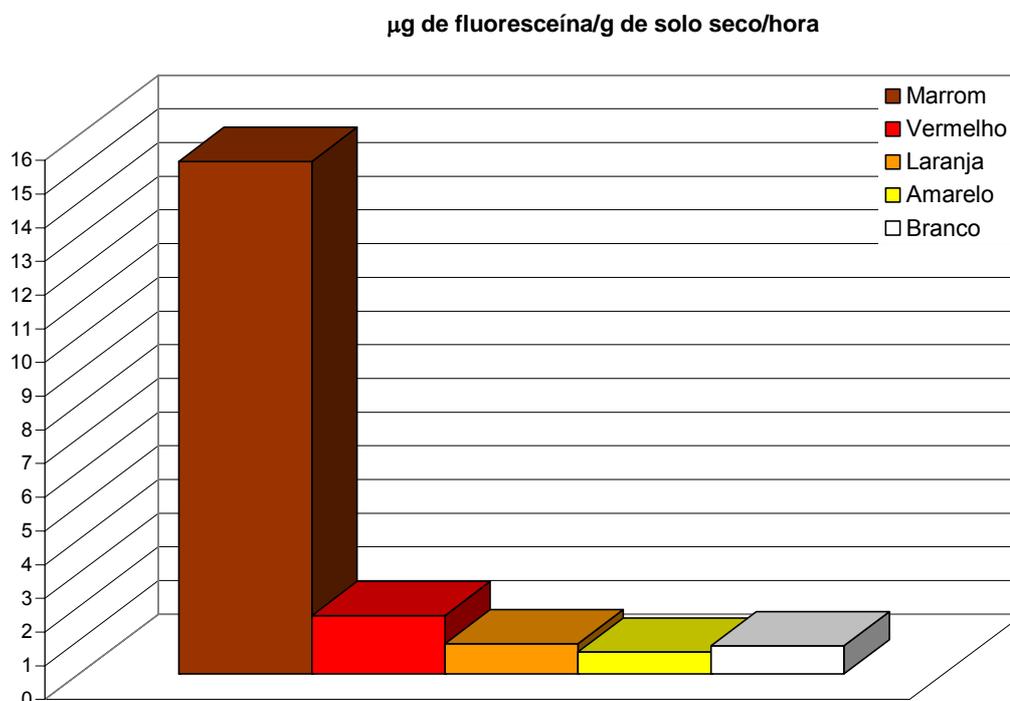


Figura 5.55 - Atividade microbiana degradadora total determinada pelo método do FDA – valores médios

Para melhor conhecimento da distribuição populacional microbiana neste perfil, sugere-se também o uso da biologia molecular como ferramenta complementar diagnóstica. Com isto, busca-se a possibilidade de encontrar algum fator biológico que apresente correlação com o grau de intemperismo físico-químico de perfis de alteração.

5.5. Ensaio de desagregabilidade

A erodibilidade de um solo pode também ser analisada a partir de observações do comportamento das amostras na presença de água.

No presente trabalho, duas amostras de solo Branco, de diferentes profundidades, foram ensaiadas por apresentarem características morfológicas muito distintas. Além destas, foram submetidas a este ensaio uma amostra de cada uma das outras camadas de solo com exceção da camada de solo Vermelho. Amostras de solo Vermelho não foram ensaiadas porque esta camada foi acrescentada ao perfil posteriormente, em função de se observar que a camada de solo superior apresentava comportamentos muito distintos para amostras visualmente similares. Nesta ocasião, estes ensaios já estavam concluídos e a realização de um novo ensaio atrasaria o andamento dos trabalhos.

Para a realização do ensaio de desagregabilidade, os corpos-de-prova, com 5 centímetros de lado, foram colocados dentro de duas bandejas metálicas e sobre pedras porosas saturadas cobertas com papel filtro. Em seguida, observaram-se suas reações ao processo de submersão.

Na primeira bandeja, após colocados os corpos-de-prova sobre as pedras porosas, o nível d'água foi mantido na altura da base das amostras por um período de 30 minutos (Figura 5.56).



Figura 5.56 – Desagregabilidade - corpos-de-prova colocados sobre pedra porosa no início do ensaio por imersão progressiva - água na altura da base

Passados os 30 minutos, a altura da água foi aumentada até atingir $1/3$ da altura total da amostra (Figura 5.57).



Figura 5.57 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 30 minutos - nível d'água a $1/3$ da altura total do corpo

A seguir, os corpos foram mantidos com este nível d'água por mais 15 minutos e, na seqüência, o nível d'água foi elevado até $2/3$ da altura total do corpo (Figura 5.58).



Figura 5.58 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 45 minutos do início do ensaio - nível d'água a $2/3$ da altura total do corpo

Os corpos-de-prova foram mantidos com o nível d'água a 2/3 da altura total do corpo por mais 15 minutos e em seguida o nível foi elevado a 3/3 da altura total do corpo ficando assim todos eles inteiramente submersos (Figura 5.59).

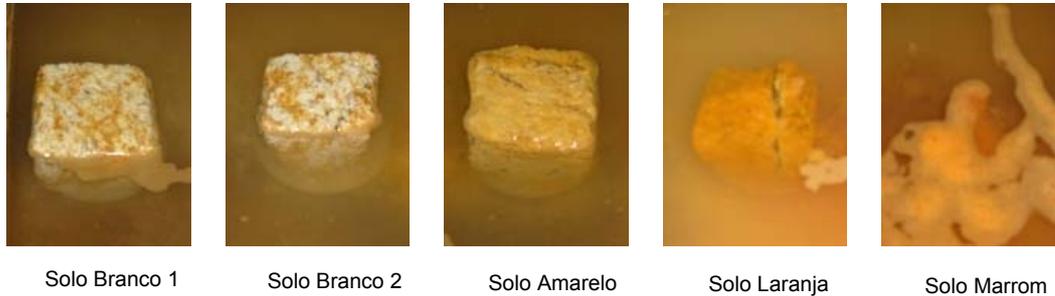


Figura 5.59 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 60 minutos do início do ensaio - totalmente submersos

Prosseguiu-se com o ensaio até que as amostras completassem um ciclo de 24 horas inteiramente submersas (Figura 5.60).

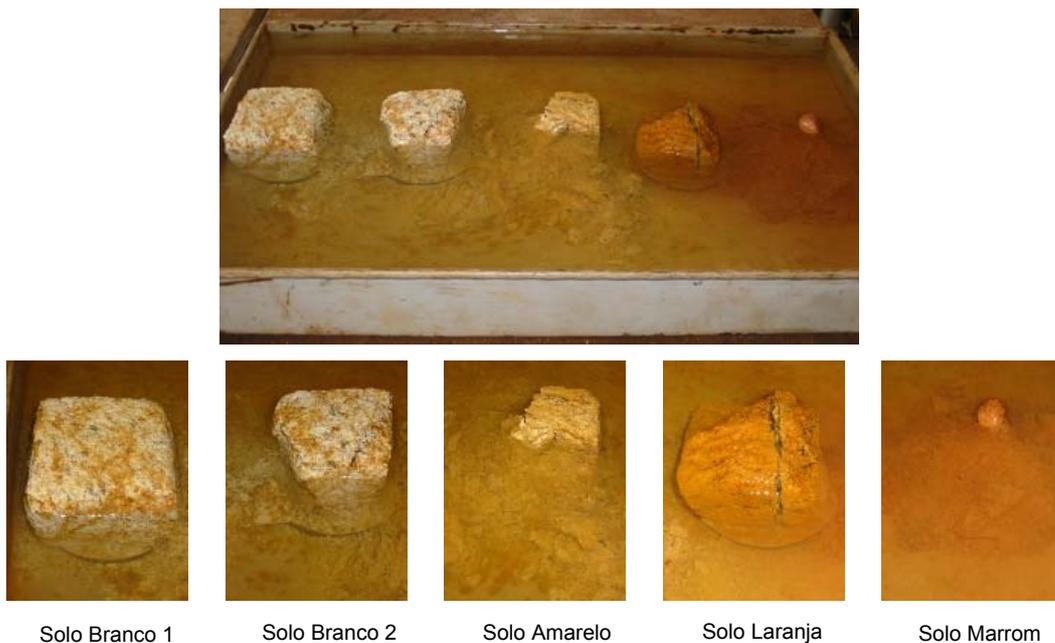


Figura 5.60 – Desagregabilidade - corpos-de-prova após 24 horas do início do ensaio - totalmente submersos

Na segunda bandeja, depois de colocados os corpos-de-prova sobre as pedras porosas, estes foram submetidos a imersão total desde o início do ensaio e mantiveram esta condição por 24 horas. Foram registrados os períodos de 15 minutos da primeira hora e o resultado final após as 24 horas. Os registros estão apresentados da Figura 5.61 à Figura 5.66.



Figura 5.61 – Desagregabilidade - corpos-de-prova logo após a inundação no início do ensaio por imersão total desde o início



Figura 5.62 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 15 minutos



Figura 5.63 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 30 minutos



Figura 5.64 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 45 minutos



Figura 5.65 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 1 hora



Figura 5.66 – Desagregabilidade por imersão total desde o início após 24 horas

De uma forma geral, pôde-se verificar que as amostras de solo Branco mais inferiores (solo Branco 1) não apresentaram nenhuma alteração na sua forma em nenhum estágio dos ensaios realizados. No entanto, finalizados os ensaios, desagregaram-se muito facilmente ao serem tomados na mão.

Por outro lado, as outras amostras de solo Branco (solo Branco 2) não se desagregaram mesmo quando tomadas na mão e submetidas a fortes pressões dos dedos. Estas amostras apresentaram desagregação apenas após estarem saturadas, muito depois da primeira hora de ensaio. Enquanto no ensaio de imersão progressiva uma parte do canto da amostra tombou para a esquerda, decorridas várias horas de ensaio, no de imersão total desde o início a amostra se dividiu ao meio tombando uma metade para a direita.

O solo Amarelo, quando submetido ao ensaio de imersão progressiva, apenas começou a se desmanchar depois de estar totalmente submerso. Ao final do ensaio se mostrou aproximadamente 50% desmanchado. Já no ensaio de imersão total desde o início, este solo se desmanchou imediatamente após estar submerso, se desmanchando totalmente e permanecendo assim, como o mais desagregado dos solos, até o término das 24 horas.

Por outro lado, o solo Laranja foi o que se comportou de maneira mais intacta nos dois ensaios. Em nenhum deles este solo apresentou qualquer desagregação de partículas. Até mesmo no momento de desmontar o ensaio, quando tomadas na mão, as amostras de solo Laranja permaneceram intactas.

O solo Marrom, no ensaio de imersão progressiva, foi o primeiro a iniciar seu processo de desagregação. Antes mesmo de estar totalmente submerso, com apenas 2/3 de sua altura sob a água, este solo já se apresentava quase que 50% desagregado. Ao término do ensaio era, dentre os solos analisados, o mais desmanchado. No ensaio de imersão total desde o início, o solo Marrom já se apresentava quase que totalmente desagregado logo após o início do ensaio, quando foi todo submerso. No decorrer das 24 horas, o restante da amostra se desfez e o solo se encontrava totalmente desagregado ao término do ensaio.

Conclui-se neste ensaio que, o solo Marrom, o que apresenta maior teor de argila, é o mais erodível dentre os solos estudados, seguido do solo Amarelo e do solo Branco. Visualmente o solo Amarelo pareceu menos coeso que o Branco, mas, quando tomados na mão os corpos-de-prova, esta tendência não se verificou. Os solos Brancos se desmancharam totalmente enquanto o Amarelo permaneceu da maneira como estava na bandeja. O solo Laranja foi o que se mostrou menos erodível.

5.6. Ensaio de cisalhamento direto

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto estão apresentados da Figura 5.67 a Figura 5.71 sob a forma de curvas que mostram a variação da tensão cisalhante e da altura dos corpos-de-prova em função dos deslocamentos horizontais. Nos gráficos, considerou-se redução de altura como sendo positiva, com a expansão correspondendo a valores negativos.

Nos ensaios não é possível distinguir claramente picos de resistência. O comportamento do material é distinto também quanto à variação de volume durante o cisalhamento – a altura da maioria dos corpos-de-prova tendeu a diminuir com a evolução dos deslocamentos.

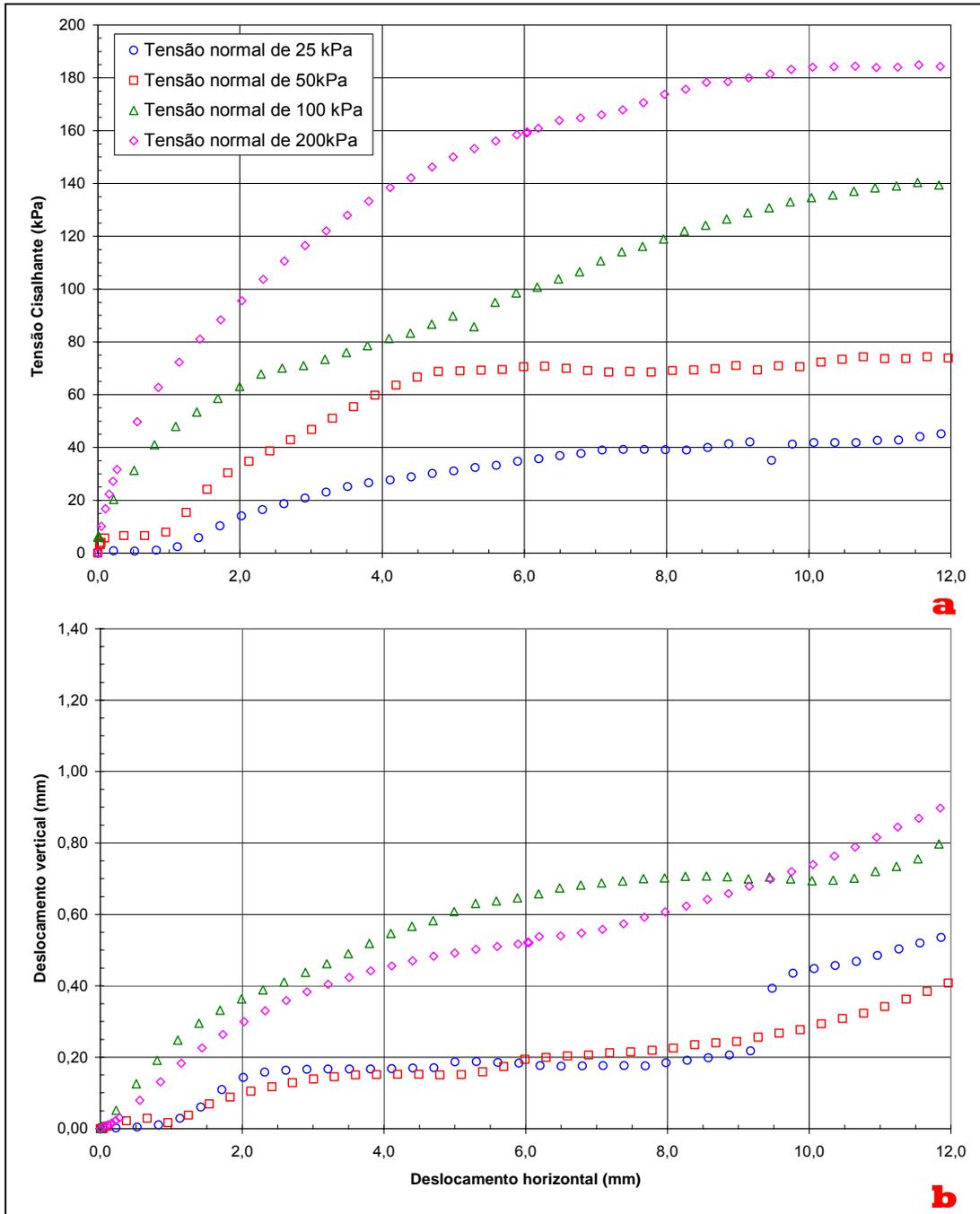


Figura 5.67 – Solo Branco: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

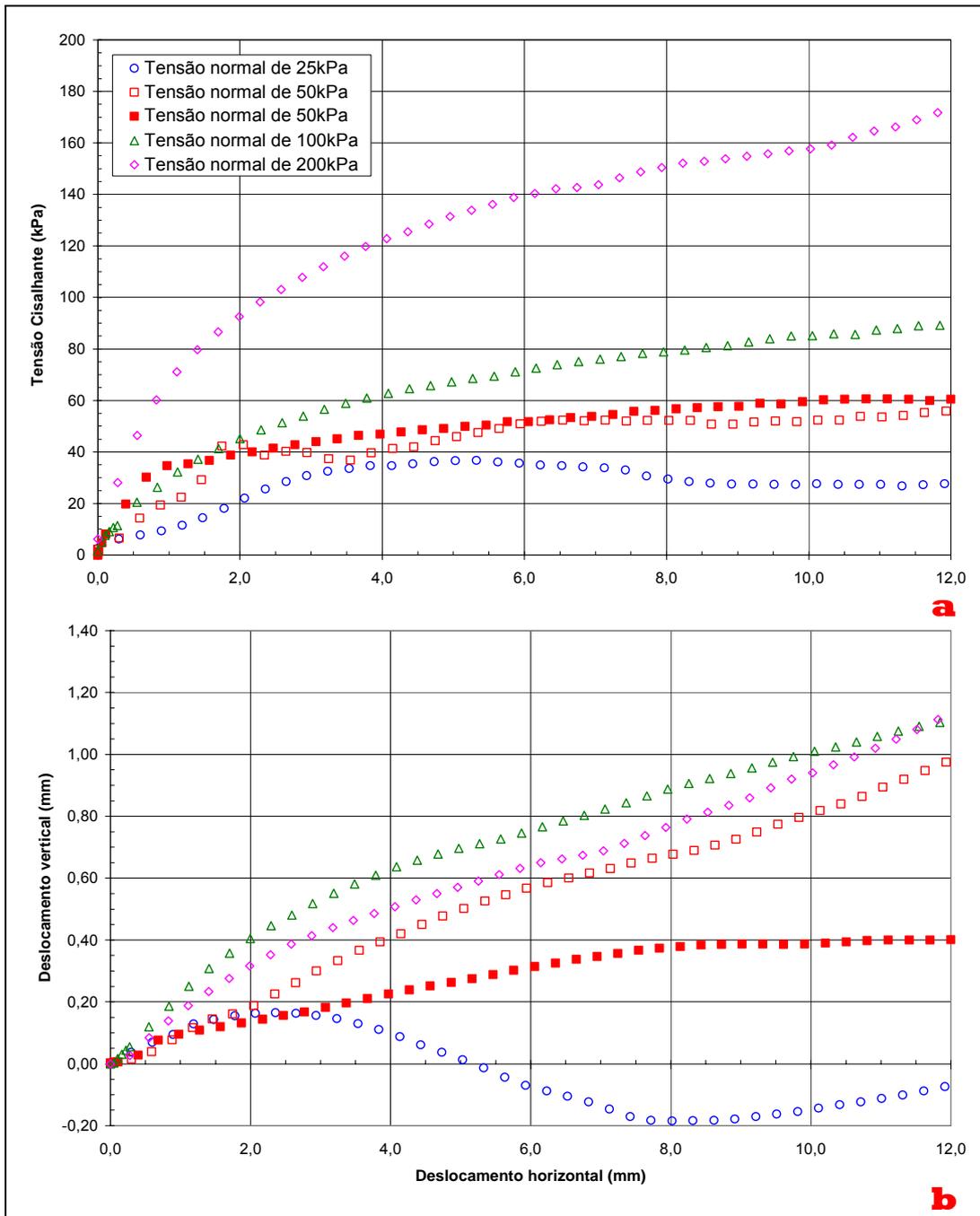


Figura 5.68 – Solo Amarelo: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

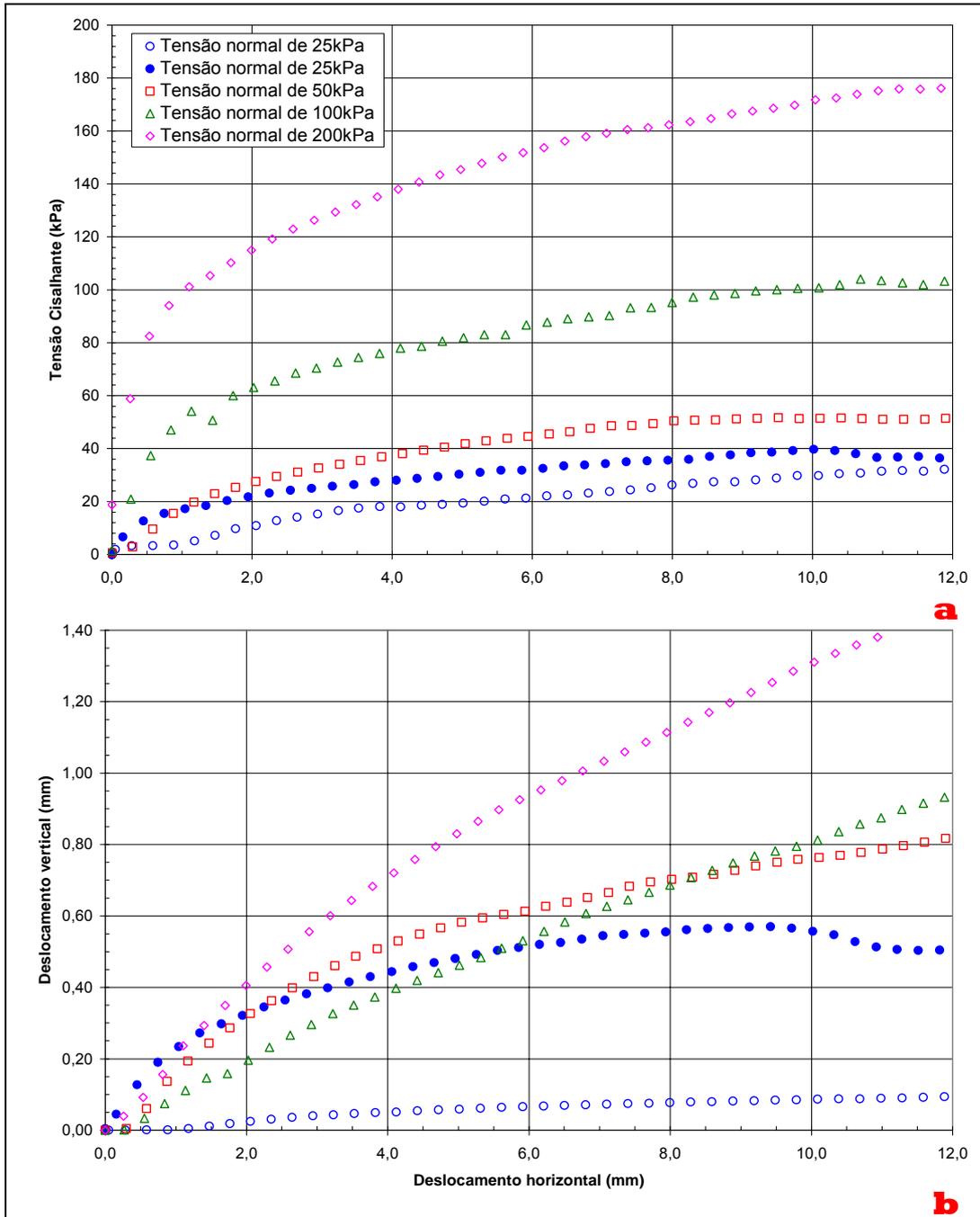


Figura 5.69 – Solo Laranja: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

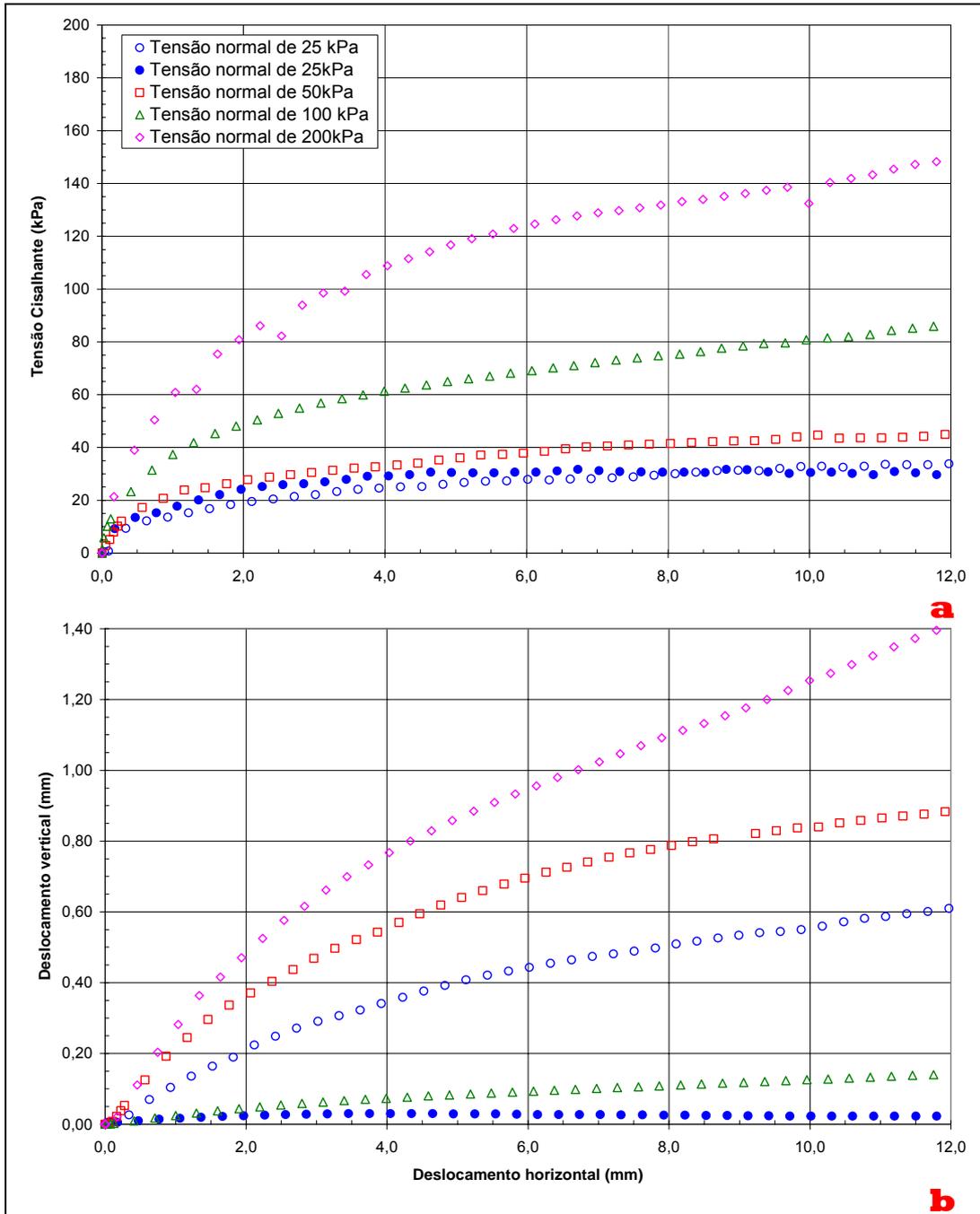


Figura 5.70 – Solo Vermelho: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

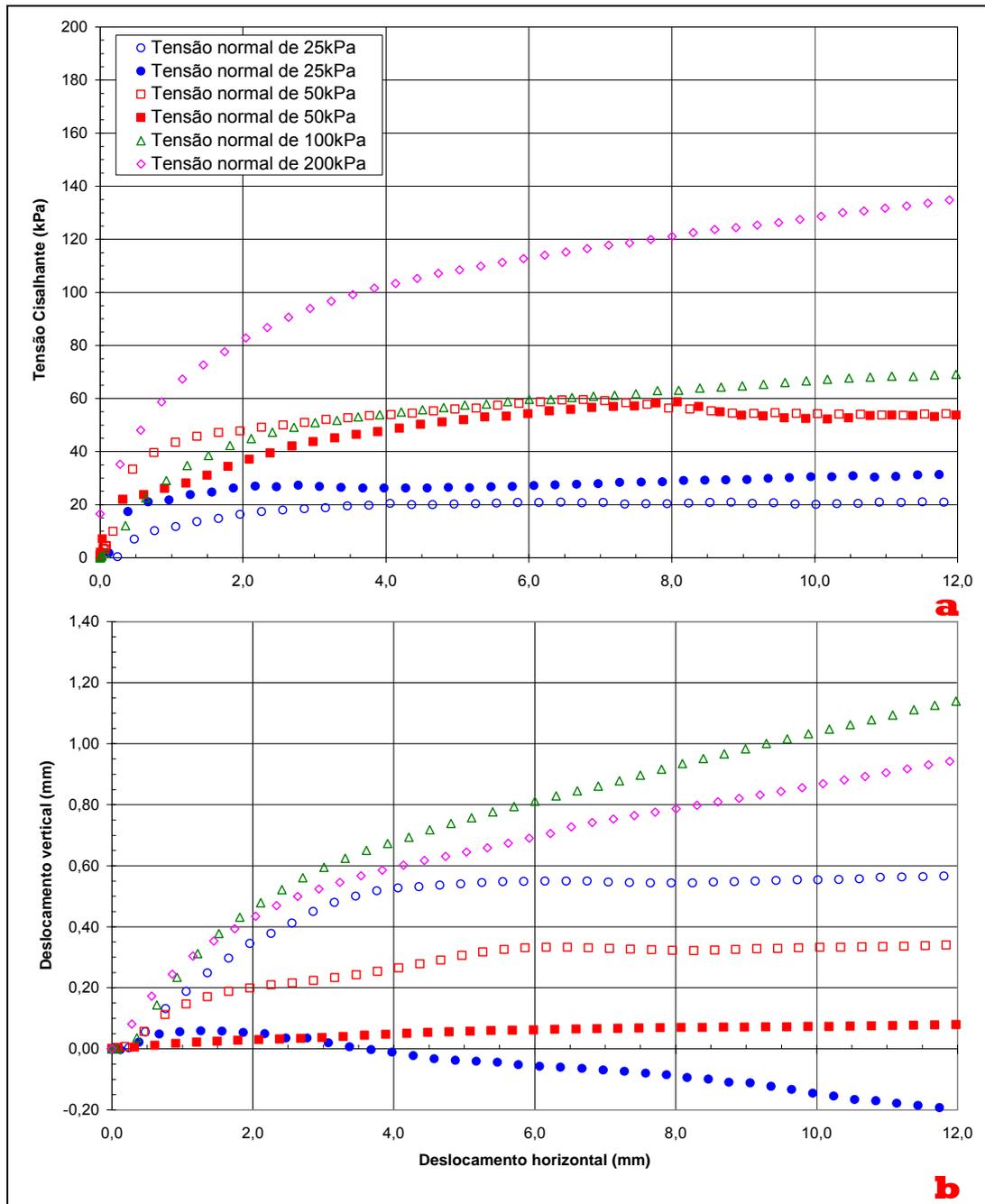


Figura 5.71 - Solo Marrom: (a) tensão cisalhante x deslocamento, (b) variação de altura durante os ensaios

A Figura 5.72 ilustra o aspecto de um dos corpos-de-prova após o cisalhamento.

Na Figura 5.73 os resultados dos ensaios estão representados como pontos em um diagrama tensão cisalhante máxima versus tensão normal. Para efeito de comparação, são apresentadas as retas (envoltórias assumindo como válido o critério de Mohr-Coulomb) que melhor se ajustam a cada conjunto de ensaios.



Figura 5.72 – Corpo-de-prova após o cisalhamento

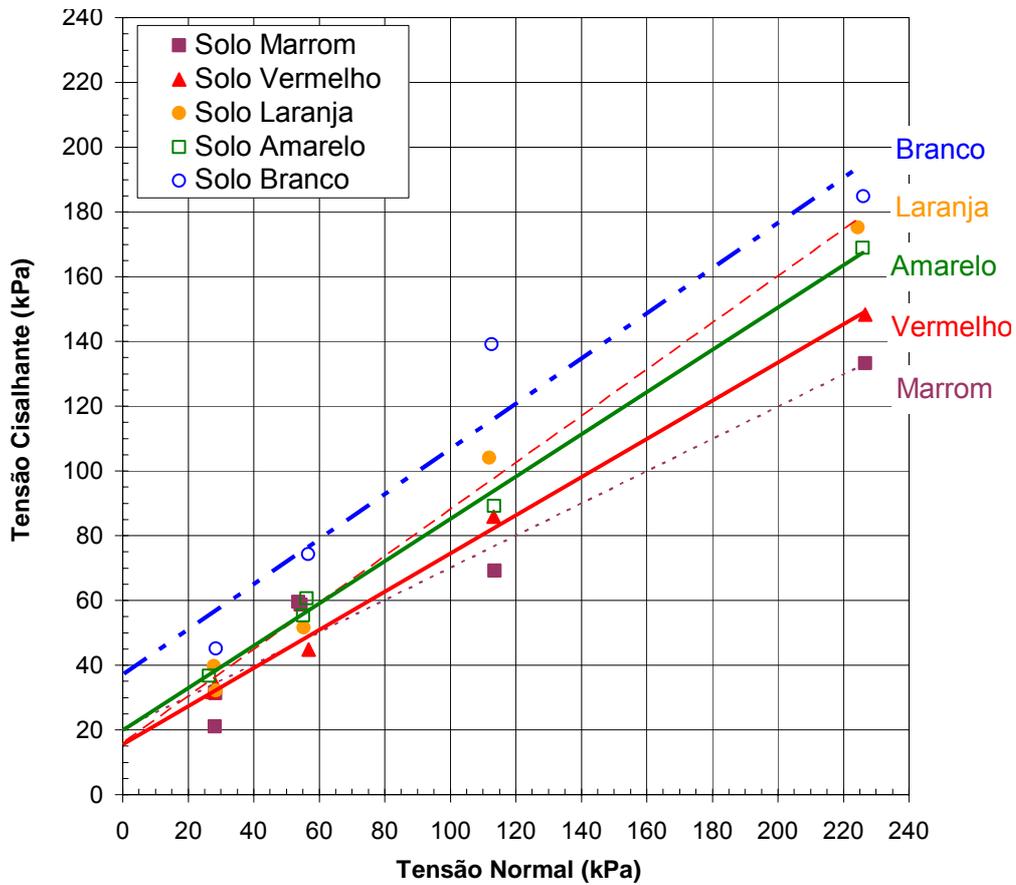
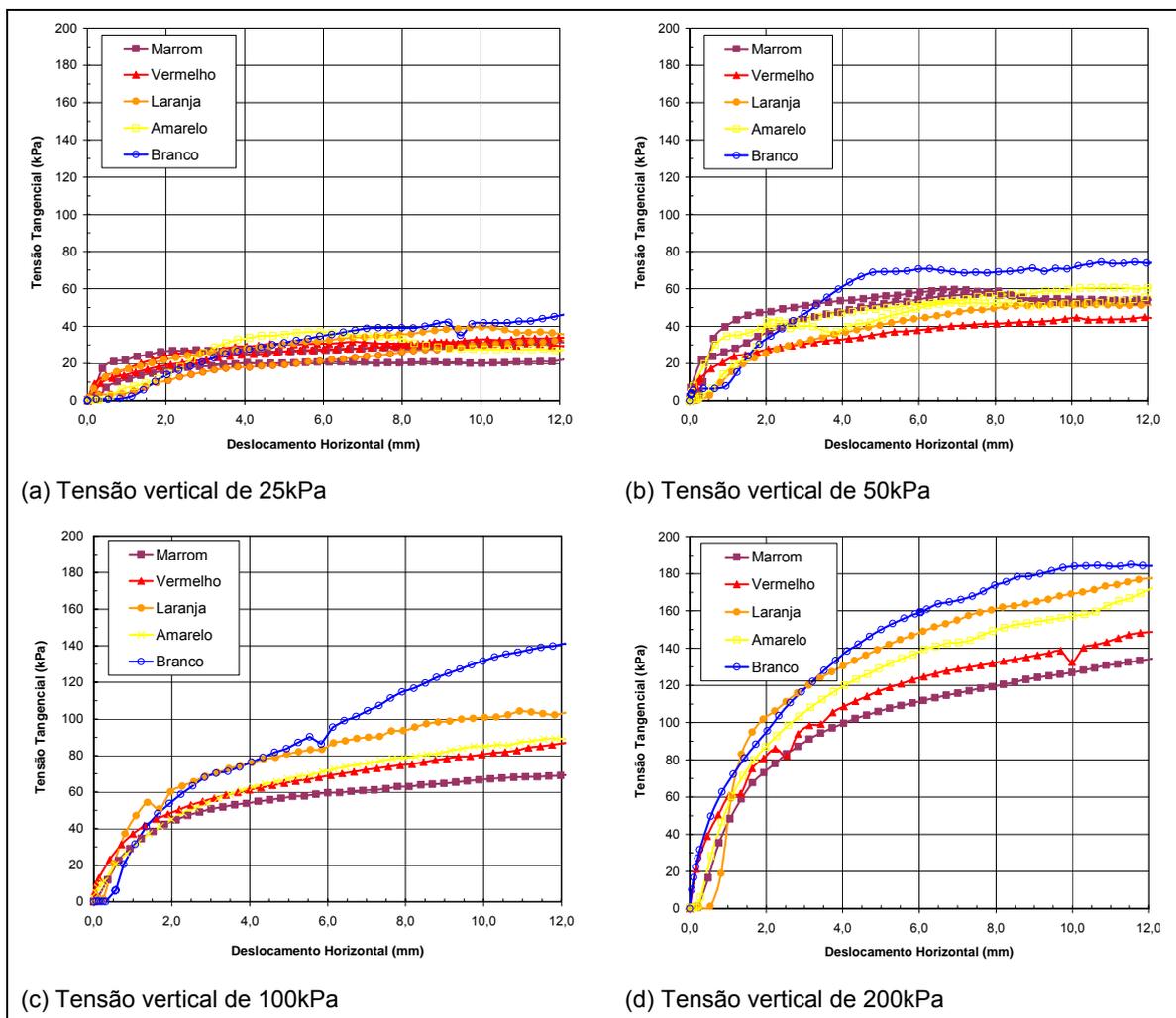


Figura 5.73 – Envoltória de resistência assumindo como válido o critério de Mohr-Coulomb

Tabela 5.16 – Resumo dos ensaios de cisalhamento direto

	Coesão (c')	Ângulo de atrito (ϕ')
Marrom	20,3	26,5
Vermelho	15,6	30,5
Laranja	16,0	35,8
Amarelo	19,9	33,2
Branco	37,0	34,9

Na Figura 5.74, as curvas tensão cisalhante \times deslocamento dos ensaios de cisalhamento direto são comparadas. Os resultados estão agrupados conforme a tensão normal. Analisando-se as informações reunidas na figura, pode-se notar a tendência das curvas dos corpos-de-prova não exibirem pico.

Figura 5.74 – Ensaios de cisalhamento direto – curvas tensão cisalhante \times deslocamento

A Figura 5.75 mostra a variação das alturas dos corpos-de-prova ao longo dos ensaios agrupadas de acordo com a tensão normal aplicada. Observa-se que a maior parte das amostras tende a contrair apesar das curvas tensão

cisalhante x deslocamento apresentar um comportamento de endurecimento, ou seja, um aumento da tensão cisalhante com o deslocamento horizontal.

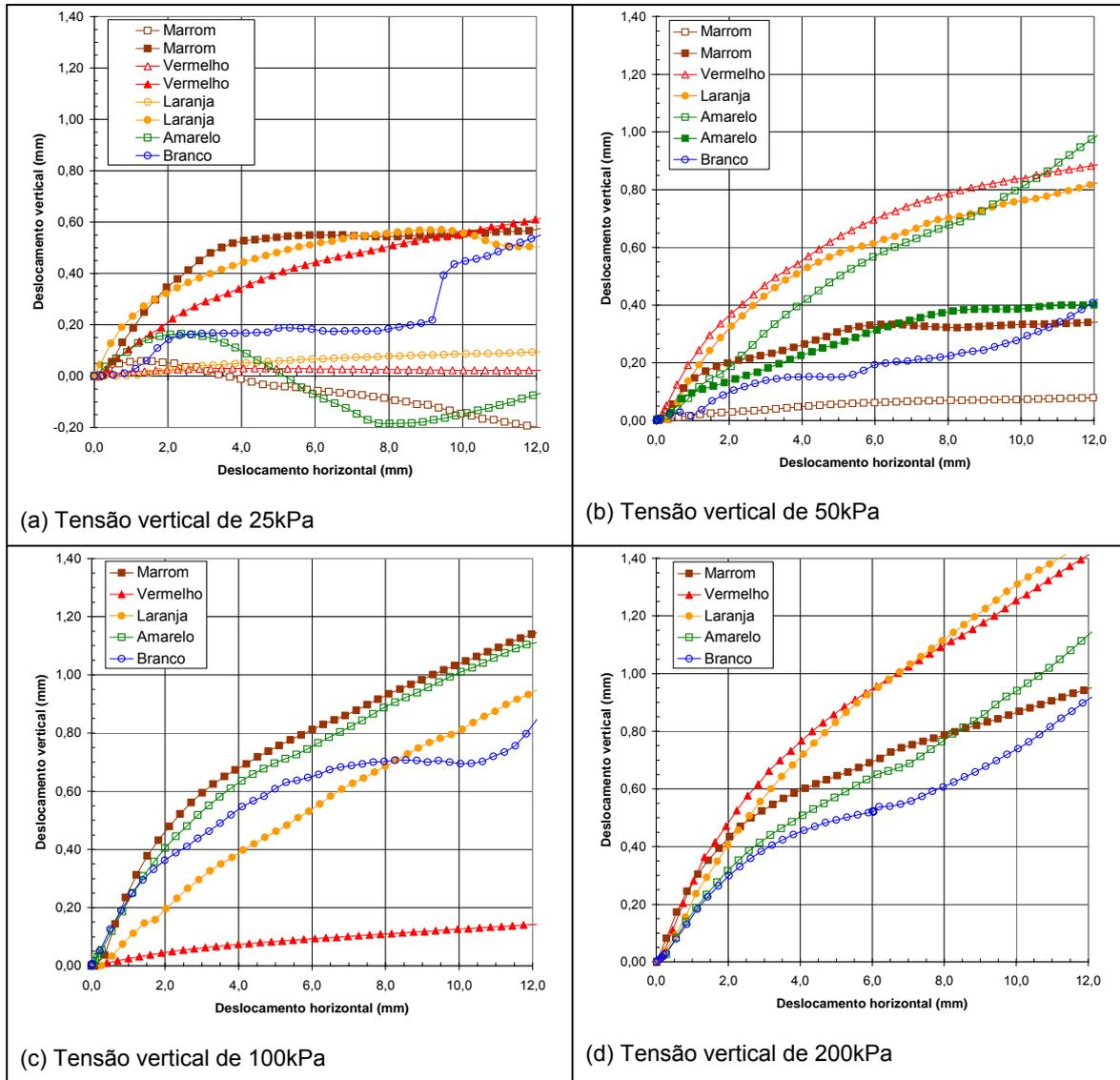


Figura 5.75 – Variação das alturas dos corpos-de-prova ao longo dos ensaios