

6

Caracterização físico-química, mineralógica e estrutural dos solos

6.1.

Introdução

Além dos ensaios físicos convencionais, ensaios químicos e mineralógicos foram executados para auxiliar na avaliação da influência do processo de saturação no comportamento tensão-deformação-resistência dos solos estudados, assim como para subsidiar as análises dos ensaios de compressibilidade. Estes ensaios ainda serviram para fazer uma análise comparativa dos solos de Duque de Caxias. O programa de ensaios executados em cada material consta na Tabela 9.

A seguir são apresentadas as metodologias dos ensaios, enfatizando-se a finalidade e importância de cada um. Resultados e discussões serão apresentados por local de coleta de amostra.

Devido às abrangentes pesquisas sobre perfil de alteração realizadas por diversos pesquisadores (e.g. Polivanov, 1998; Oliveira, 2006; Moncada, 2008; Buback 2008; Boszczowski, 2008) e por este não ser o foco principal deste trabalho, considerou-se desnecessário apresentar revisão bibliográfica sobre este tema. À medida que definições e conceitos forem sendo requeridos durante a apresentação dos resultados, os mesmos serão inseridos no texto de forma objetiva.

6 Caracterização físico-química, mineralógica e estrutural dos solos

Tabela 9: Ensaio físico-químico-mineralógicos executados.

Local	Solo	Caracterização física						Caracterização química				Caracterização mineralógica e estrutural			
		G _s	Granulometria	Límites de Atterberg	Porosimetria de mercúrio	Curva de retenção	Perda ao fogo	pH	Complexo sortivo	Química total	Ataque Sulfúrico	DRX	Lupa Binocular	ATD	MEV
Duque de Caxias (Migmatito)	Feição Melanocrática	DC01	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		DC02	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		DC05*	x	x	x	-	-	x	x	x	x	x	x**	x	-
	Feição Leucocrática	DC03	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-
		DC04	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Tanguá (Solo residual de rocha alcalina)	T	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	x	x	x	x

* Amostras amolgadas; ** apenas da fração areia.

6.2.

Metodologias e considerações sobre os ensaios

6.2.1.

Caracterização física

Os ensaios de caracterização física foram executados em amostras deformadas representativas de cada solo com o objetivo de determinar as características básicas das mesmas. Para tanto, foram realizados ensaios de limites de consistência, peso específico dos grãos (G_s) e análise granulométrica. As amostras foram preparadas de acordo com o procedimento de secagem prévia (NBR 6457/84).

6.2.1.1.

Granulometria

A granulometria dos solos residuais pode fornecer características do seu grau de intemperismo. De forma geral, quanto maior a porcentagem de partículas finas mais intemperizado o solo se encontra.

Como os solos estudados são constituídos por frações grossas e finas, a análise granulométrica foi obtida pela combinação dos ensaios de peneiramento e de sedimentação (granulometria conjunta).

Os ensaios de granulometria seguiram as prescrições da norma NBR 7181/84a. A ABNT recomenda a realização de ensaios de sedimentação com material passante na peneira de 2 mm (#10). No entanto, neste trabalho, foi utilizado o material passante na peneira de 0,42 mm (#40) de acordo com o método empregado no LGMA.

6.2.1.2.

Limites de Atterberg

Os valores dos limites de Atterberg estão intrinsicamente ligados à composição mineralógica da fração fina do solo.

Os solos residuais jovens apresentam a maioria dos minerais primários em várias fases de decomposição herdados da rocha matriz. Podem ocorrer também minerais neo-formados dos grupos dos argilominerais 2:1 que podem evoluir de acordo com os processos intempéricos para argilominerais do grupo 1:1. Os solos residuais maduros praticamente não possuem minerais primários, a exceção daqueles resistentes ao intemperismo, como é o caso do quartzo,

turmalinas, etc. A presença de maior ou menor concentração de minerais e de argilominerais, bem como o tipo dos mesmos, é refletida diretamente nos Limites de Consistência.

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade seguiram as determinações das normas NBR 6459/84b e NBR 7180/84c, respectivamente. Todos os ensaios foram realizados com amostras destorroadas, secas ao ar e passantes na peneira # 40.

6.2.1.3.

Densidade dos grãos (G_s)

Na determinação do peso específico dos grãos empregou-se o método estabelecido pela NBR 6508/1984d.

6.2.1.4.

Porosimetria por injeção de mercúrio

De acordo com Camapum de Carvalho (2004), os solos residuais jovens apresentam agregação entre partículas pequenas, estrutura influenciada pela rocha mãe e distribuição de poros relativamente homogênea (mono-modal). Na medida em que o intemperismo avança, a estrutura original da rocha deixa de ser tão marcante. Nos solos extremamente 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.

De forma geral, o intemperismo conduz a uma estrutura porosa devido à lixiviação de elementos, o que gera novos vazios, ou seja, quanto maior o grau de intemperismo, maior é a lixiviação dos elementos. Logo, deveria ser observada uma estrutura mais porosa e a diminuição do peso específico com o intemperismo.

Uma das formas de se avaliar a distribuição, o tamanho e a quantidade dos vazios é através do ensaio de porosimetria de mercúrio. Moncada (2008) e Boszczowski (2008) ao estudarem o perfil de alteração de um gnaiss facoidal e de um granito-gnaiss, respectivamente, observaram o aumento da micro-porosidade, determinada por este método, com o grau de intemperismo.

Diante do exposto acima, ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio foram executados em todos os solos, exceto no solo DC05.

O princípio da técnica de porosimetria de mercúrio está baseado na lei da capilaridade que governa a penetração de líquidos em pequenos poros. O

volume de mercúrio que penetra nos poros é função da pressão aplicada e é calculado com o auxílio da equação de Washburn, apresentada a seguir, que assume que os poros têm forma cilíndrica e que o mercúrio é o fluido não molhante.

$$p = \frac{4T_{nw} \cos \theta_{nw}}{D}$$

Onde θ_{nw} = ângulo de contato do mercúrio que possui o valor de 130° ;

p = pressão;

D = diâmetro dos poros;

T_{nw} = tensão superficial do mercúrio ($485 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$).

A injeção de um fluido não molhante é equivalente à expulsão de água para o mesmo diâmetro de poros. Romero *et al.* (1999) propõem uma expressão, considerando o conteúdo de água residual, para calcular o grau de saturação equivalente a cada pressão de mercúrio aplicada:

$$Sr = (1 - Sr_{nw}) + \frac{w_r \times Sr_{nw}}{w_s}$$

Onde w_r = é a umidade higroscópica;

w_s = é a umidade correspondente à saturação;

Sr = grau de saturação equivalente;

Sr_{nw} = grau de saturação do mercúrio;

Todas as amostras indeformadas foram enviadas para o Laboratório de Apoio à Física e à Química da Universidade de São Carlos, onde foi empregado o porosímetro *Micromeritics Pore Size 9320*. Por meio deste equipamento é possível investigar poros de diâmetros a partir de 0,7mm, a uma pressão de aproximadamente 1,7 kPa até poros de 0,000006mm ou 60 ângstrons de diâmetro, que correspondem pressão de 212 MPa.

6.2.1.5.

Curva de retenção de umidade

A curva de retenção de umidade, ou curva característica de sucção, é a relação existente entre o teor de umidade e a sucção nos solos. A quantidade de água pode ser representada pela umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica (θ) ou pelo grau de saturação (S). Os valores de S, θ e w estão relacionados entre si através das seguintes equações:

$$\theta = \frac{Se}{1+e} = S_n$$

$$\theta_w = \rho_d w$$

Onde: e = índice de vazios;

ρ_d = densidade seca;

n = porosidade.

A sucção matricial está relacionada ao tipo de partícula e ao arranjo estrutural, sendo definida como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água ($u_a - u_w$).

Resultados de estudos experimentais sugerem que o comportamento dos solos não saturados é influenciado principalmente pela sucção matricial para baixos níveis de sucção (Alonso *et al.*, 1987). No entanto, Blight (1983) constatou que o potencial osmótico tem efeito significativo no comportamento deformacional de solos finos.

Na Figura 106 tem-se a configuração de uma curva característica típica, da variação do teor de umidade volumétrica com a sucção matricial com seus principais aspectos destacados. Ao longo da curva, partindo da condição de maior teor de umidade, à medida que a sucção aumenta, identifica-se o valor de entrada de ar, a partir do qual o ar começa a entrar nos vazios maiores do solo, e a umidade residual (θ_r), conteúdo de umidade a partir do qual é necessária uma grande variação de sucção para remover mais água do solo.

Fredlund e Xing (1994) sugerem um procedimento gráfico para a determinação da sucção correspondente à entrada de ar e ao valor de umidade volumétrica residual. A entrada de ar é encontrada a partir da intersecção da reta horizontal, correspondente ao estado saturado, com a reta tangente que passa pelo ponto de inflexão da curva. O valor de umidade volumétrica residual é determinado a partir do cruzamento da última com a reta tangente a curva compreendendo a zona de saturação residual (Figura 106).

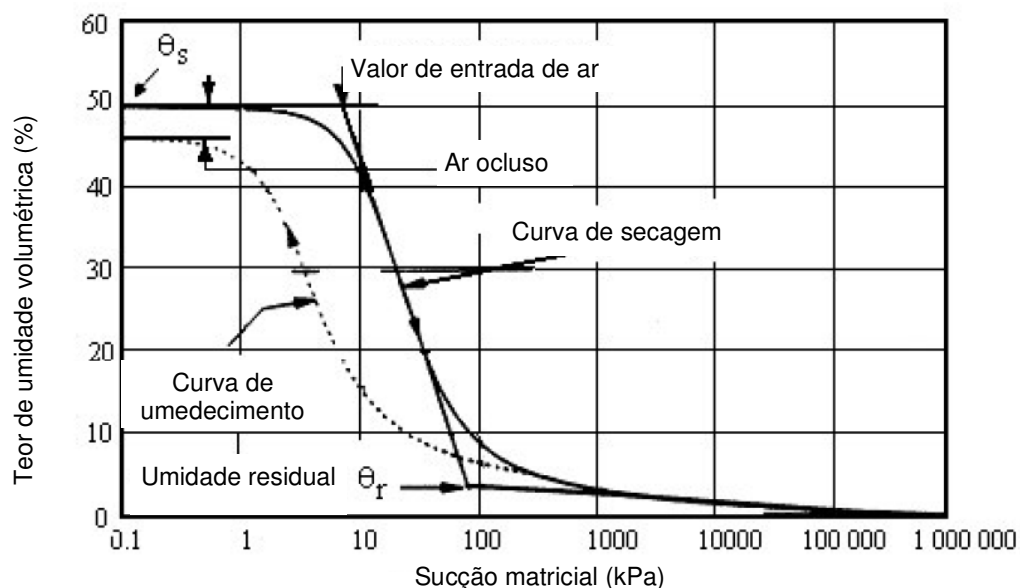


Figura 106 – Curva de retenção típica (Fredlund e Xing, 1994)

As curvas de retenção de umidade foram determinadas utilizando a técnica do papel filtro. Apesar de alguns autores recomendarem o uso de tal técnica para sucções superiores a 300 kPa, (e.g. Villar, 2000; Marinho 1997), as curvas características completas dos materiais foram determinadas a partir deste método devido à sua relativa simplicidade e por fugir do escopo da presente pesquisa estudar o comportamento do material não saturado.

A metodologia de ensaio empregada foi baseada na estabelecida por Moncada (2008). A autora apresenta no referido trabalho uma vasta revisão crítica sobre este tipo de ensaio e define uma rotina que é seguida atualmente no laboratório de Geotecnia da PUC-Rio.

Os corpos de prova foram moldados com anéis de aço ou alumínio com altura de 20 mm e diâmetro de 50mm. Para cada ponto da curva, um anel era moldado. A partir da umidade natural, os corpos de prova foram umedecidos ou secados para obter o teor de umidade desejado, esperando-se um período de ao menos dois dias para a equalização da umidade. Neste período, os corpos de prova ficavam embrulhados em papel filme dentro de um isopor em uma sala com temperatura controlada. Vale ressaltar que, Moncada (2008), ao avaliar o comportamento de solos residuais oriundos de diferentes rochas e de solos sedimentares, não detectou variações significativas nos resultados de ensaios de curva característica realizados a partir de amostras apenas umedecidas, secas ou com a umidade natural.

O papel filtro empregado foi o Whatman 42 retirado diretamente da caixa. Moncada (2008) verificou que a calibração proposta por Chandler *et al.* (1992) era apropriada para este tipo de papel, não sendo necessária a execução de novas calibrações.

Após a obtenção do corpo de prova com a umidade desejada, o papel filtro era colocado em contato com cada uma das superfícies da amostra para a determinação da sucção matricial. O conjunto era então embrulhado com várias camadas de papel filme plástico, seguido por uma camada de papel alumínio. Cada amostra, devidamente identificada, era colocada em uma caixa de isopor dentro de uma sala com temperatura controlada durante um período de 7 a 10 dias.

Passado este período, os embrulhos eram abertos um a um ao lado de uma balança de 4 casas decimais, utilizada para medir a variação de massa do papel filtro a cada 10 segundos durante 1 minuto. Assim, obtinha-se a massa para o tempo zero. Após a pesagem, os papéis eram levados à estufa (100-110 °C) por um período de no mínimo 2 horas. Uma vez secos, os papéis eram

novamente pesados seguindo-se a mesma metodologia. Para obtenção da umidade dos corpos de prova, os mesmos eram secos em estufa.

Com a umidade dos papéis filtros e a curva de calibração de Chandler *et al.* (1992) foram determinados os valores de sucção. Para cada corpo de prova foram obtidos dois valores de sucção matricial, correspondentes aos papéis filtros do topo e da base. Os pontos muito afastados da reta de ajuste ($R^2 < 0,98$) foram eliminados e os resultados do ensaio correspondente desconsiderados na definição da curva característica de sucção.

Os dados experimentais foram ajustados com o modelo matemático de van Genuchten (1980). Moncada (2008) não observou diferenças significativas entre este tipo de ajuste e os propostos por Fredlund e Xing (1994) e Kosugi (1999), ao contrário de Boszczowski (2008) que notou um melhor ajuste das equações de Fredlund e Xing (1994) a alguns dos solos estudados pela autora.

O método de van Genuchten (1980) é subsequente ao método desenvolvido por Brooks e Corey (1964) que propuseram a equação abaixo para definir a forma da curva característica de sucção:

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda \quad \text{com} \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Onde S_e = grau de saturação efetivo ou teor de umidade reduzido;

ψ = sucção;

ψ_b = sucção correspondente ao valor de entrada de ar;

λ = índice relacionado com a distribuição de tamanhos de poros;

θ_r e θ_s = conteúdo de umidade volumétrica residual e saturada, apresentados na

Figura 106.

Baseado no mesmo princípio, van Genuchten (1980) propõe a seguinte equação:

$$S_e = \frac{1}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m} \quad \text{ou} \quad \theta(w) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m}$$

Onde α , n e m são parâmetros de ajuste que dependem do tipo de solo.

6.2.2.

Caracterização química

A caracterização química dos solos é executada com o objeto de determinar os elementos químicos que os compõem, refletindo seu estado de intemperização. Os resultados podem fornecer subsídios para um melhor entendimento das características ou propriedades físicas e mineralógicas dos solos em estudo.

Dois tipos de análise foram executados. A análise química parcial, que corresponde somente às frações constituídas por argilominerais e óxi-hidróxidos

de ferro, alumínio e manganês, além de amorfos de ferro silício e alumínio. Outro método executado, denominado análise química total abrange todas as frações do solo.

A maioria dos ensaios químicos foi realizada no Centro Nacional de Pesquisas de Solos CNPS/EMBRAPA. As análises seguiram as metodologias apresentadas no Manual de Métodos de Análise de Solo (CNPS/EMBRAPA, 1997), sendo executados os seguintes ensaios: pH em água e KCl, complexo sortivo e ataque por ácido sulfúrico e carbono orgânico. Além destes, ensaios de análise química total, que abrange todas as frações do solo, inclusive as constituídas por minerais primários, foram executados. Os mesmos foram executados no Laboratório de Fluorescência e Difração de Raios-X do Depto. de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ em todas as amostras de solo.

A determinação do pH fornece a acidez ou alcalinidade do solo e a solubilidade de alguns elementos. O pH determinado em KCl apresenta valores mais baixos que os determinados em H_2O , exceto no caso de solos extremamente intemperizados. A diferença entre ambos pH's expressa o balanço de cargas elétricas dos colóides do solo, sendo diretamente proporcional à atividade (Barreto, 1986).

O teor de carbono orgânico foi determinado através da oxidação da matéria orgânica com bicromato de potássio 0,4N. Multiplicando o valor obtido por 1,7 é calculada a quantidade de matéria orgânica, em g/kg.

O ensaio de ataque por ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1:1 foi empregado para a determinação dos íons SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 dos minerais secundários (argilominerais, óxidos de ferro e alumínio). O processo inicial de intemperismo causa a lixiviação dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos, a concentração de sílica, alumínio e sesquióxido de ferro, sendo, desta forma, os resultados deste ensaio empregados para o cálculo de relações moleculares (Ki e Kr), que servem para indicar o grau de alteração dos solos. Moncada (2008), após avaliar a aplicabilidade de diversos índices de intemperismo, assim como outros autores, concluiu que a utilização dos mesmos deve ser limitada aos solos maduros, potencialmente já em processo de laterização. Deve-se notar aqui que não é objetivo deste trabalho estabelecer ou avaliar o grau de intemperismo por meio de índices.

O ensaio de complexo sortivo serviu para a determinação dos íons Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , Al^{+3} e H^+ permutáveis e o valor de capacidade de troca catiônica (CTC). A capacidade de troca de cátions é a soma das cargas elétricas. Quando

o número de cargas elétricas negativas é alto, tem-se uma argila de atividade alta. A ocorrência do ferro na sua forma mais solúvel (Fe^{2+}) está associada a condições anaeróbicas, que são aquelas em que há falta de oxigênio no meio ambiente, normalmente verificada em áreas próximas a rios e drenagens. Quando a condição é aeróbia, a alta concentração de oxigênio favorece a presença do ferro menos solúvel (Fe^{3+}). O nível do lençol freático também influencia no tipo de ferro presente no solo, pois está diretamente relacionado às condições aeróbicas ou anaeróbicas (Oliveira, 2006). Com base nos valores da CTC dos solos, é possível determinar também a superfície específica (SE), multiplicando-se os mesmos por 7,8043. Este fator está relacionado às dimensões da molécula de azul de metileno. 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.

O ensaio de análise química total fornece o teor de cada elemento do solo, compreendendo tanto os minerais primários como os secundários. Os elementos foram determinados por fluorescência de raios-X em amostras fundidas com tetraborato de lítio. Através destas análises foi possível determinar os teores de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de titânio (TiO_2), ferro (Fe_2O_3), cálcio (CaO), magnésio (MgO), sódio (Na_2O) e potássio (K_2O), dentre outros elementos presentes nos solos.

Além destes ensaios, foi executado o ensaio de perda ao fogo. O índice de perda ao fogo está diretamente relacionado ao grau de alteração dos minerais e à formação dos argilominerais e hidróxidos de ferro e alumínio Boszczowski, (2008).

6.2.3. Caracterização mineralógica e estrutural

Os solos foram caracterizados do ponto de vista mineralógico por meio da avaliação das suas frações grossa e fina (silte e areia) separadamente, bem como por intermédio de lâminas produzidas a partir de amostras indeformadas.

A avaliação da fração areia teve como objetivo principal identificar seus componentes, que podem servir de indicativo da maturidade e do estágio de intemperização dos materiais, que, dependendo do tipo de solo, se reflete em uma maior quantidade de quartzo e minerais neoformados como concreções ferruginosas. Para tanto, foram observados na lupa binocular, pertencente ao

Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, o material retido na peneira #40 (areia grossa, média e pedregulho) e a areia fina (material passante na peneira #40 e retido na # 200).

Já a fração fina (silte e argila), bem como a fração areia fina, foram avaliadas por meio de ensaios de difração por raios-X. Os mesmos foram executados no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da PUC-Rio, utilizando um difratômetro Siemens D5000, com irradiações realizadas no intervalo de 2 a 30°. A velocidade de varredura da amostra no difratômetro foi de 0,02° por segundo. Para análise conjunta da areia fina, silte e argila empregou-se o material passante na peneira #40, sendo a análise feita pelo método do pó. Já para caracterizar separadamente as frações silte e argila foram feitas lâminas orientadas pelo método do gotejamento com material passante nas peneiras # 200 e # 400.

Além dos aspectos de identificação, a DRX presta-se para a determinação do grau de cristalinidade e do tamanho de partícula. Quanto mais largo é o pico do difratograma, menor o tamanho da partícula (cristal) ou pior o grau de cristalinidade.

Em complemento às análises de difração por raios-X, análises térmicas diferenciais foram executadas nas frações silte e argila. Esta análise consiste no aquecimento, em velocidade constante, do material juntamente com uma substância termicamente inerte, registrando as diferenças de temperatura entre o padrão e o solo em função da temperatura. Quando ocorrem transformações endo ou exotérmicas, estas aparecem como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial. Os ensaios foram executados no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM), com o auxílio de um equipamento do fabricante Perkin Elmer e do sistema de aquisição de dados Pyris. As amostras foram aquecidas até 1050 °C, com aumento de 15 °C/min.

Além da avaliação das frações dos solos separadamente, os mesmos foram analisados por intermédio de observação na lupa binocular de lâminas delgadas fabricadas a partir de amostras indeformadas. As lâminas foram preparadas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ. O procedimento consiste no desbaste mecânico de amostras indeformadas previamente secas ao ar e lentamente impregnadas com Araldite e corante azul, com o intuito de visualizar os poros das lâminas.

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram executados após a análise dos demais resultados de caracterização dos solos,

sendo realizados apenas nos solos selecionados para avaliação da influência do processo de saturação nos ensaios triaxiais na estrutura (solo DC02 e o residual de Tanguá).

A técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite uma observação das amostras ampliadas em muitas vezes com boa resolução de imagens, proporcionando a caracterização morfológica dos constituintes do solo. Além disso, em contraste com a microscopia óptica, a imagem do microscópio eletrônico é obtida de uma amostra tridimensional. Essa técnica acoplada ao analisador de energia dispersiva (EDS) contribui significativamente na identificação da constituição química do mineral, pois permite a análise detalhada do mesmo, assim como suas alterações.

Nesta tese, a preparação das amostras seguiu os seguintes passos: torrões dos solos com dimensões aproximadas de 0,5 x 0,5 x 0,5 cm foram secos ao ar; após a secagem, cada amostra foi submetida a alto vácuo e à deposição de um filme fino de ouro por bombardeamento iônico com o objetivo de garantir a condutividade elétrica da superfície, necessária para a formação da imagem; algumas imagens foram selecionadas com as feições microestruturais de interesse, em diferentes escalas de aumento e armazenadas digitalmente.

Os ensaios foram executados no Laboratório de Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio – DCMM, com auxílio do equipamento modelo DSM 960 da marca Zeiss.

6.3.

Resultados e discussões

Os resultados são apresentados por local de coleta das amostras.

6.3.1.

Duque de Caxias

Os solos coletados em Duque de Caxias, resultantes da ação intempérica em um migmatito, são oriundos de duas feições – a melanocrática (máfica) e a leucocrática (félsica).

Cada feição representa uma frente de intemperismo, não sendo possível no campo perceber a evolução da alteração no sentido vertical, uma vez que a reatividade dos minerais em cada feição é diferente e o maciço encontra-se extremamente fraturado.

Vale ainda ressaltar que, determinar a evolução do intemperismo neste tipo de formação é complexo, não sendo o foco deste trabalho. Além disso,

amostras de rocha não foram coletadas para este fim. No entanto, considerações referentes ao intemperismo em perfis de migmatito puderam ser feitas.

i. Caracterização física básica

A avaliação dos solos deste perfil teve início com a análise dos resultados de caracterização física básica, que são apresentados na Tabela 10. A curva granulométrica está indicada na Figura 107.

Tabela 10 – Resultados de ensaios de caracterização dos solos do perfil de Duque de Caxias

Amostra	Granulometria - ABNT (%)				Limites de Atterberg (%)		γ_d (kN/m ³)	γ_{nat} (kN/m ³)	w_{nat} (%)	G_s	Índice de vazios	S (%)
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila	LL	LP						
DC01*	0,0	69,5	23	7,5	-	-	14,08	16,74	18,91	2,840	0,98	54,98
DC02*	0,2	53,5	35,4	10,8	-	-	12,51	16,29	30,28	2,880	1,26	69,26
DC05*	0,0	54,6	33,6	11,8	-	-	-	-	-	2,827	-	-
DC03	5,3	57,1	27,7	9,9	33,5	26,1	14,29	15,75	10,59	2,618	0,80	34,73
DC04	2,3	36,4	37,6	23,7	51,1	29,4	13,76	16,59	20,54	2,647	0,89	61,55

* Solos oriundos da decomposição da feição melanocrática do perfil migmatítico

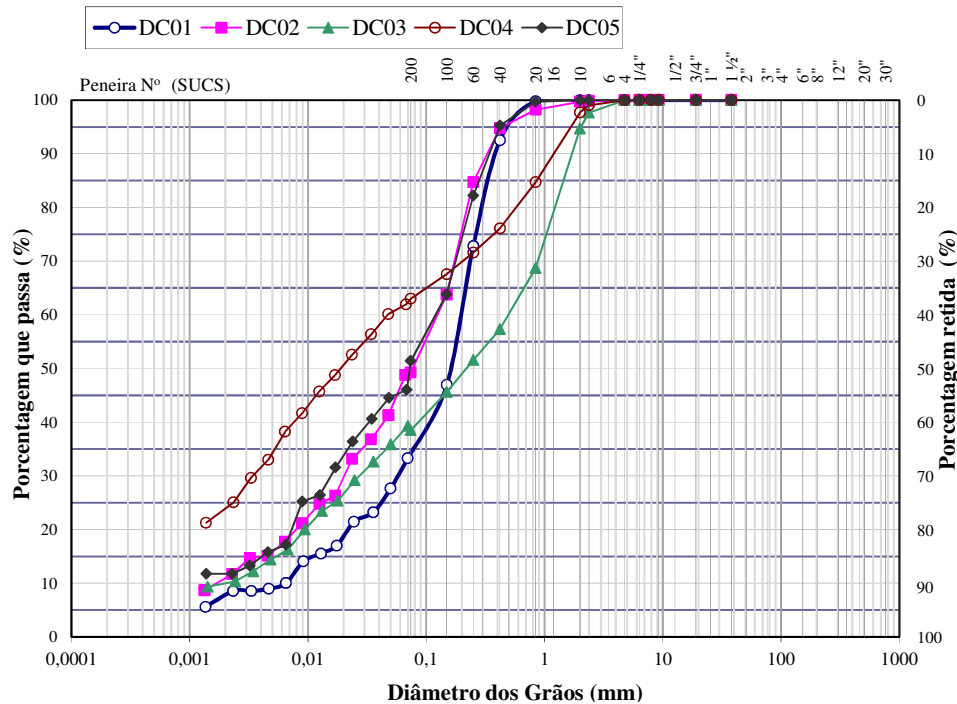


Figura 107 – Curva granulométrica das amostras de Duque de Caxias.

A diferença entre as duas porções fica evidente nos valores do peso específico relativo dos grãos. Enquanto os solos correspondentes à feição melanocrática apresentam valores típicos de solos ricos em biotita (2,8), os solos pertencentes à porção leucocrática possuem valores típicos de solos

provenientes de rochas quartzo-feldspáticas (2,6). Além disso, os solos originados a partir da feição melanocrática não apresentam limites de consistência devido ao seu caráter micáceo.

Em perfis clássicos, onde o grau de intemperismo avança com a diminuição da profundidade, o peso específico tende a aumentar e, conseqüentemente, o índice de vazios tende a diminuir. Entretanto, o perfil avaliado, além de ter duas frentes de intemperismo originadas de duas feições distintas, encontra-se extremamente fraturado. Por isso, as amostras foram retiradas praticamente na mesma cota, não sendo possível fazer este tipo de correlação. Considerando a porção formada a partir da rocha melanocrática, o solo residual DC01 apresenta maior peso específico e menor índice de vazios que o solo DC02, indicando que o primeiro está menos alterado que o segundo. Já o solo residual DC03 (porção leucocrática) possui maior densidade e menor índice de vazios que o solo DC04, indicando menor grau de alteração do solo DC03.

Solos provenientes de rochas ígneas e metamórficas apresentam maior quantidade de fração argila com a redução da profundidade (Souza Neto *et al.* 2001), ou, de forma mais genérica, com o aumento do grau de intemperismo. De fato, os solos residuais DC02 e DC05, pertencentes à frente de intemperismo da feição melanocrática, apresentam composição granulométrica semelhante, com cerca de 55% de areia e 45% de material fino (silte e argila). Já o solo residual DC01 contém fração areia de cerca de 70% e fração fina de cerca de 30%, corroborando com as observações de campo, com os dados de peso específico e informações subseqüentes que indicam que o solo residual DC01 é o menos intemperizado desta porção. O mesmo ocorre com a porção leucocrática, onde o solo residual DC03 apresenta menor teor de finos que o solo residual DC04.

Devido ao baixo teor de argila e presença significativa de material micáceo em suas composições, os solos oriundos da feição melanocrática (DC01, DC02 e DC05) não apresentaram limites de consistência, sendo classificados pelo SUCS como areia siltosa, os dois primeiros, e como silte de baixa compressibilidade, o último. Se forem empregadas as divisões recomendadas pela ASTM D2487, onde há a subdivisão em grupos das classes do SUCS, os solos DC01 e DC02 continuam com a mesma classificação e o solo DC05 passa a ser classificado como um silte arenoso. De acordo com o índice de atividade (Ia) proposto por Skempton, as três amostras são inativas.

Os solos DC03 e DC04, pertencentes à porção formada a partir da feição leucocrática, são classificados como areia siltosa e silte de alta

compressibilidade, respectivamente, pela classificação do SUCS. O índice de atividade de Skempton encontrado para o solo DC3 foi de 0,77 e para o solo DC4 foi de 0,91 sendo a fração argila de ambos os solos classificada como de atividade normal.

As classificações citadas acima consideram os solos, dentre outras simplificações, com a fração fina (argila e silte) dispersa. Uma análise qualitativa da fração fina dos solos foi realizada repetindo-se o procedimento de sedimentação sem o emprego de defloculante. Todos os solos decantaram por completo em um período inferior a 30 minutos, mostrando o caráter floculado dos mesmos.

Outras classificações, como a AASHO e a HRB, são empregadas para classificar os solos. Entretanto, assim como a classificação SUCS, as mesmas não refletem a estrutura e a mineralogia dos solos tropicais. Dentre as propriedades que não são consideradas nestas classificações Cozolino e Nogami (1993) destacam o fato de solos lateríticos possuírem agregações de finos; a natureza físico-química da fração argila; a natureza porosa e fragmentada dos grãos de silte e areia dos solos saprolíticos e a influência dos microcristais de mica e caulinita dos solos saprolíticos.

Vargas (1988, 1992) sugere uma adaptação da classificação SUCS para solos tropicais. O mesmo utiliza o índice de atividade de Skempton (Ia) para identificar se a fração argilosa é de natureza micácea ou caulinitica e o limite de liquidez para definir o solo como de alta ($LL > 50\%$) ou baixa ($LL < 50\%$) plasticidade. No entanto, este método não considera a atividade da fração silte, como ressalta o próprio autor, que pode ser composta por grumos de argilominerais ativos. Além disso, Souza Neto (2000), após analisar diversos solos de litologias diferentes, observou que esta classificação agrupou solos de comportamentos diferentes na mesma categoria. Outros autores como Ferreira (1995) e Silva (2001) também não obtiveram uma classificação coerente dos solos tropicais avaliados pelos mesmos.

Logo, os sistemas de classificação existentes além de não refletirem as características dos solos residuais (estrutura, cimentação, mineralogia), podem ainda classificar solos que são nitidamente diferentes no mesmo grupo.

ii. Porosimetria de mercúrio

Para determinar a porosidade e a distribuição dos tamanhos dos poros, a técnica de porosimetria por injeção de mercúrio foi empregada. Este ensaio

fornece basicamente duas curvas, a de volume acumulado e um histograma de frequência contínuo dos diâmetros dos poros do solo.

Na Figura 108 tem-se a distribuição acumulativa dos diâmetros dos poros. Nota-se que os solos formados a partir da feijão leucocrática (DC03 e DC04) apresentam dois patamares na curva de distribuição acumulativa dos diâmetros dos poros, enquanto os solos pertencentes à porção melanocrática apresentam curvas em formato de “S”.

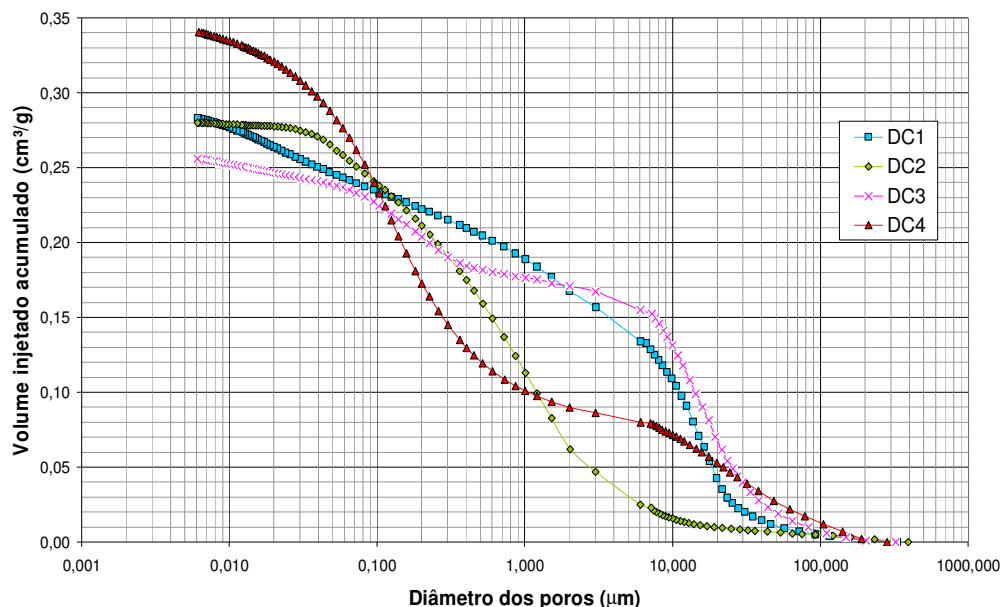


Figura 108 – Distribuição acumulativa dos poros dos solos de Duque de Caxias

A Tabela 11 apresenta os valores de porosidade total. Já na

Tabela 12, tem-se a distribuição de poros de acordo com a classificação da IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada) para micro, meso e macroporos. De acordo com esta classificação, os solos da porção melanocrática, DC01 e DC02, possuem uma maior concentração de macroporos, enquanto o mesmo só ocorre na porção leucocrática com o solo DC03. O solo DC04 possui cerca de 50 % de microporos. Esta distribuição também fica evidente na Figura 109, onde consta o gráfico da distribuição incremental dos poros com a classificação da IUPAC indicada.

Os picos de distribuição dos solos DC03 e DC04 são similares, indicando dois picos principais de diâmetro de poros correspondentes a 0,13 e 15 μm . Nesta porção, fica evidente o aumento da microporosidade e a diminuição da porosidade com o aumento do intemperismo. Esta tendência não é observada na

porção melanocrática, onde os solos DC01 e DC02 apresentam, respectivamente, picos correspondentes aos diâmetros 15 e 1,2 μm .

Tabela 11 – Porosidade por injeção de mercúrio dos solos de Duque de Caxias

Amostra	Porosidade por injeção de mercúrio (%)
DC1	45,23
DC2	38,24
DC3	42,06
DC4	49,21

Tabela 12 - Distribuição de poros em porcentagem segundo a IUPAC

Amostra	Microporos (%) $\Phi < 0,2 \mu\text{m}$	Mesoporos (%) $0,2 \mu\text{m} < \Phi < 0,5 \mu\text{m}$	Macroporos (%) $\Phi > 0,5 \mu\text{m}$
DC1	21,47	6,69	72,20
DC2	24,64	22,06	53,30
DC3	20,42	8,67	70,91
DC4	49,41	15,55	35,04

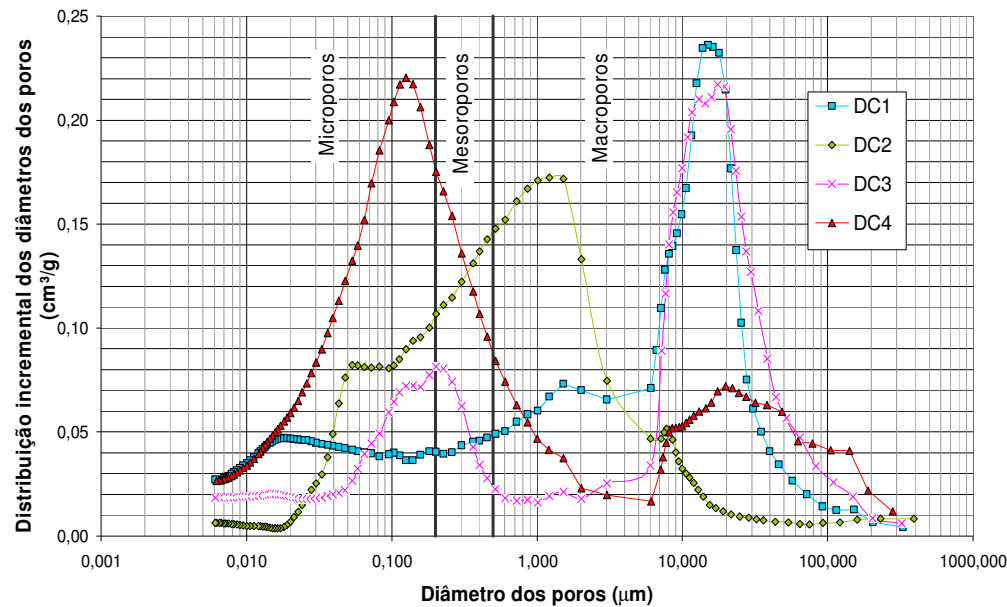


Figura 109 – Distribuição incremental dos poros com a classificação dos poros segundo a IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada).

iii. Curva de retenção

São apresentados a seguir os resultados obtidos no ensaio de papel filtro para determinação das curvas de retenção dos solos determinadas com o único intuito de caracterizar os mesmos.

Antes de apresentar os resultados, vale ressaltar que, não foi observada variação de volume como consequência dos procedimentos de umedecimento e secagem utilizados no preparo das amostras. Da mesma forma, não foi detectada variação significativa do índice de vazios, avaliada por meio das relações lineares entre a umidade gravimétrica e volumétrica e/ou grau de saturação, onde se obteve um fator de correlação superior a 0,98, como pode ser observado nas Figuras 110 a 113. Logo, em todos os gráficos, o coeficiente angular da relação entre a umidade gravimétrica e a volumétrica é igual à média do peso específico seco do solo.

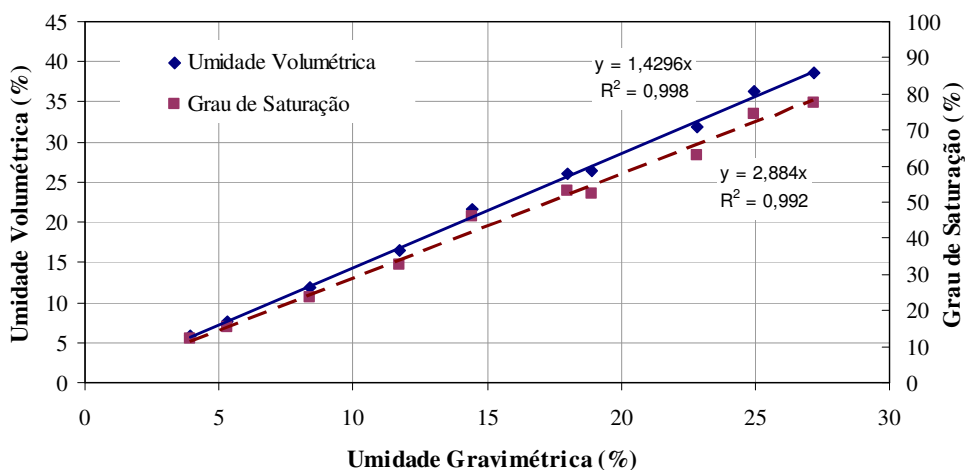


Figura 110 – Relação entre o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo DC01.

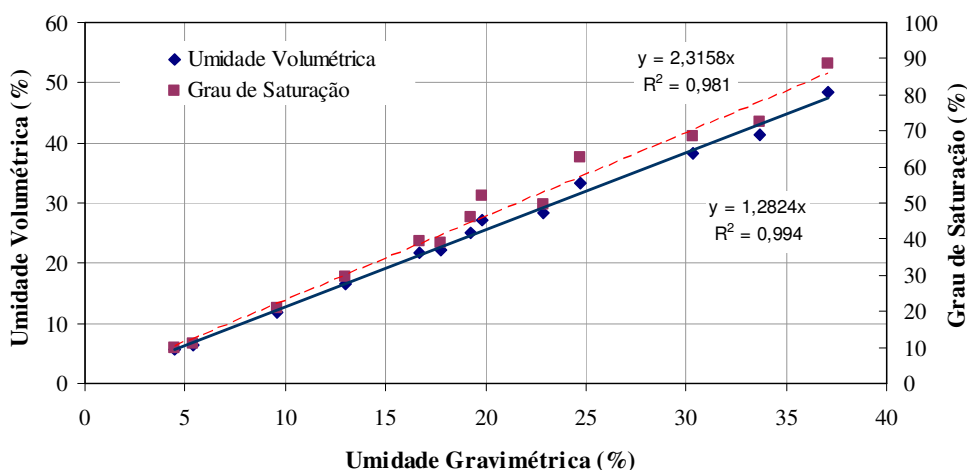


Figura 111 – Relação entre o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo DC02.

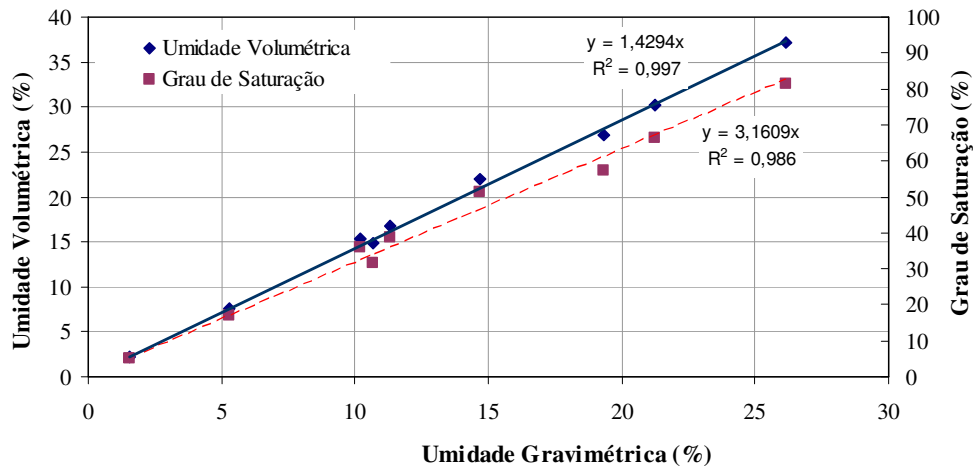


Figura 112 – Relação ente o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo DC03.

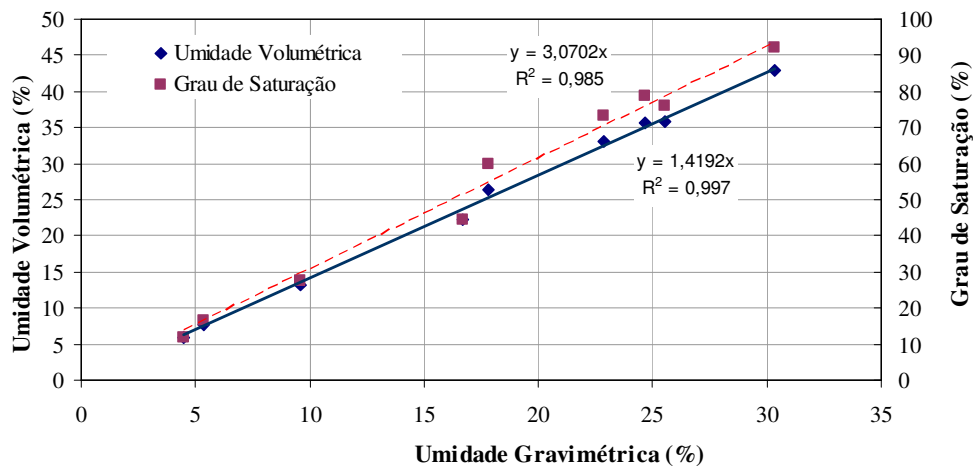


Figura 113 – Relação ente o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo DC04.

Nas Tabelas 13 a 16 constam os dados obtidos nos ensaios, além dos valores dos parâmetros físicos correspondentes a cada anel. Nas Figuras 114 a 117 são apresentados os teores de umidade gravimétrica em função do valor de sucção para cada solo.

A equação sugerida por van Genuchten (1980) foi ajustada com o auxílio do programa RETC (van Genuchten *et al.*, 1991), sendo o ajuste exposto na figura correspondente. Os dados de entrada para este ajuste, os valores da umidade volumétrica saturada e da umidade volumétrica residual, foram obtidos por meio de gráficos seguindo o método das tangentes (Fredlund e Xing, 1994). Como todas as curvas apresentaram-se bimodais, foram realizados ajustes para

as duas partes da mesma. Este comportamento pode estar relacionado ao fato das curvas terem sido obtidas de forma mista – umedecimento e secagem - e/ou a distribuição de poros do solo. Enquanto os resultados de porosimetria de mercúrio indicam uma distribuição bimodal dos poros dos solos DC03 e DC04, os solos DC01 e DC02 possuem comportamento unimodal.

Tabela 13 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo DC01

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial (kPa)		e	γ_d (kN/m³)	γ_{nat} (kN/m³)
18,01	26,05	53,13	94,54	74,32	0,961	14,50	17,10
3,94	5,81	12,10	23654,41	23074,08	0,924	14,70	17,40
5,31	7,62	15,43	14544,26	13775,79	0,976	14,40	17,20
8,41	11,85	23,55	5895,87	6370,49	1,013	14,10	16,70
11,71	16,51	32,81	1237,23	1348,67	1,013	14,10	16,90
14,45	21,68	45,99	288,62	339,43	0,892	15,00	17,70
18,88	26,45	52,28	42,35	41,98	1,024	14,00	16,60
22,83	31,97	63,13	14,76	15,46	1,026	14,00	16,70
24,96	36,24	74,23	7,70	7,48	0,954	14,50	17,20
27,19	38,67	77,54	6,75	6,66	0,995	14,20	17,00

* Peso específico seco obtido a partir da média destes valores = 1,43g/cm³

Tabela 14 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo DC02.

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial (kPa)		e	γ_d (kN/m³)	γ_{nat} (kN/m³)
24,69	33,27	62,53	62,90	65,32	1,137	13,50	17,10
4,49	5,57	9,77	10693,60	10028,15	1,325	12,40	16,20
5,38	6,43	11,00	9265,21	10104,15	1,409	12,00	15,70
9,58	11,87	20,82	4031,95	4763,07	1,326	12,40	16,40
16,68	21,64	39,36	1084,47	1133,85	1,221	13,00	17,00
17,78	22,15	39,03	988,28	842,77	1,312	12,50	16,40
22,89	28,32	49,66	74,83	131,11	1,327	12,40	15,90
25,52	35,22	67,62	54,61	55,13	1,087	13,80	17,80
37,10	48,44	88,61	8,93	8,34	1,206	13,10	16,90
33,66	41,45	72,41	27,15	29,27	1,339	12,30	16,20
19,82	27,18	51,89	776,52	499,18	1,100	13,70	17,50
19,28	25,13	45,90	888,27	810,73	1,210	13,00	16,90
12,98	16,54	29,68	4411,31	4006,94	1,259	12,88	18,00

* Peso específico seco obtido a partir da média destes valores = 1,288g/cm³

Tabela 15 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo DC03.

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial (kPa)		e	Y _d (kN/m³)	Y _{nat} (kN/m³)
1,57	2,24	4,96	15980,00	13712,61	0,825	14,30	16,10
5,28	7,63	17,09	2569,60	2742,43	0,807	14,50	16,10
10,22	15,30	35,82	811,32	753,44	0,746	15,00	16,30
11,29	16,72	38,57	487,97	635,28	0,765	14,80	16,60
14,70	22,00	51,46	55,75	49,23	0,747	15,00	16,60
19,34	26,88	57,41	11,17	11,66	0,88	13,90	15,30
21,23	30,24	66,47	7,28	7,76	0,835	14,20	15,60
26,15	37,12	81,26	5,61	6,48	0,841	14,20	15,70
10,68	14,85	31,72	176,50	198,34	0,88	13,90	15,40

* Peso específico seco obtido a partir da média destes valores = 1,43g/cm³

Tabela 16 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo DC04.

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial (kPa)		e	Y _d (kN/m³)	Y _{nat} (kN/m³)
24,69	35,66	78,61	62,90	65,32	0,83	14,40	17,50
4,49	5,95	11,93	10693,60	10028,15	0,996	13,20	16,10
5,38	7,61	16,36	9265,21	10104,15	0,87	14,10	17,00
9,58	13,17	27,45	4031,95	4763,07	0,923	13,70	16,50
16,68	22,15	44,51	1084,47	1133,85	0,991	13,30	16,20
17,78	26,36	60,02	988,28	842,77	0,783	14,80	17,80
22,89	33,12	73,18	74,83	131,11	0,827	14,50	17,20
25,52	35,73	76,00	54,61	55,13	0,887	14,00	17,20
30,34	42,87	92,11	31,20	29,09	0,871	14,10	16,80
37,10	52,01	100	8,93	8,34	0,885	14,00	16,80

* Peso específico seco obtido a partir da média destes valores = 1,41g/cm³

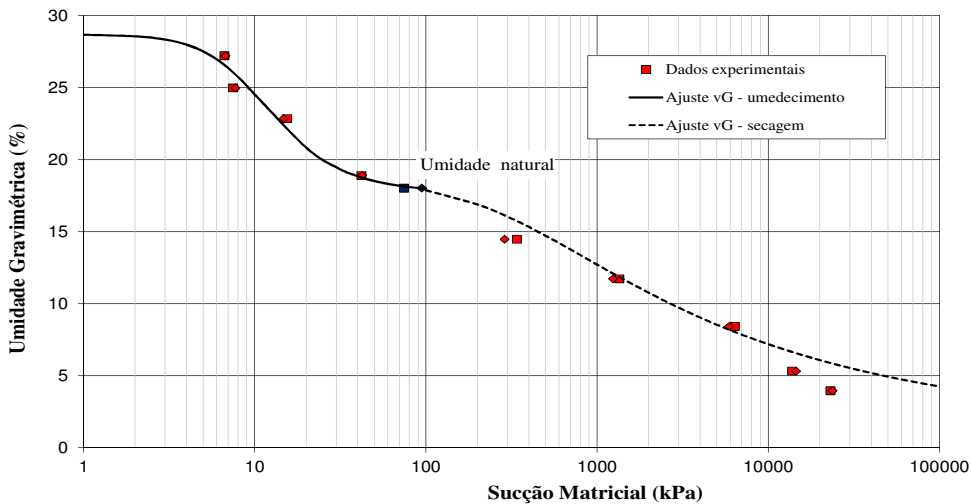


Figura 114 – Curva de retenção do solo residual DC01. Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980).

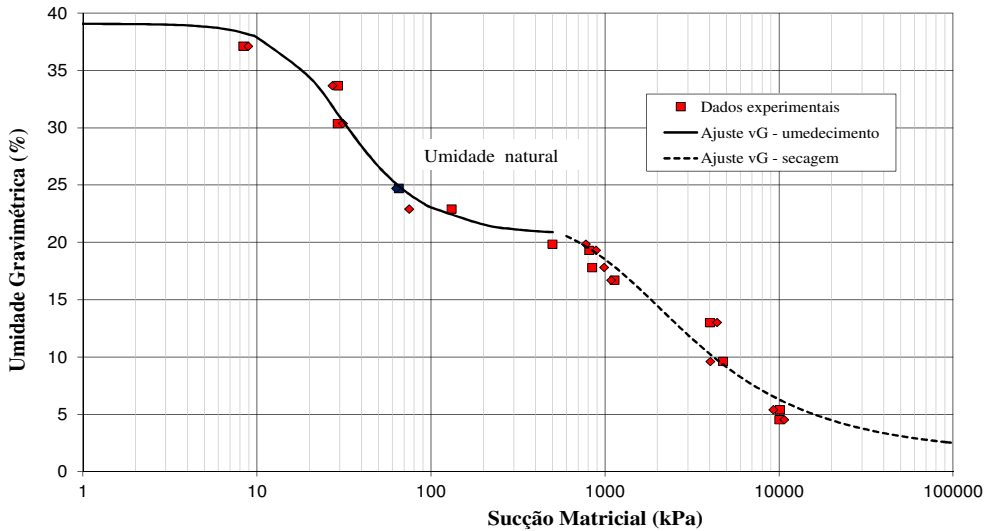


Figura 115 – Curva de retenção do solo residual DC02. Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980).

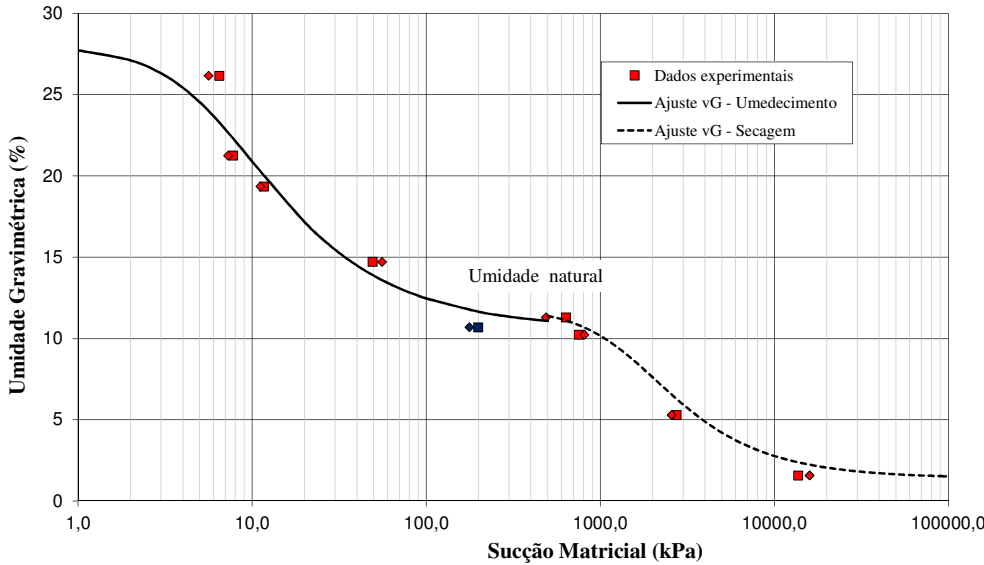


Figura 116 – Curva de retenção do solo residual DC03. Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980).

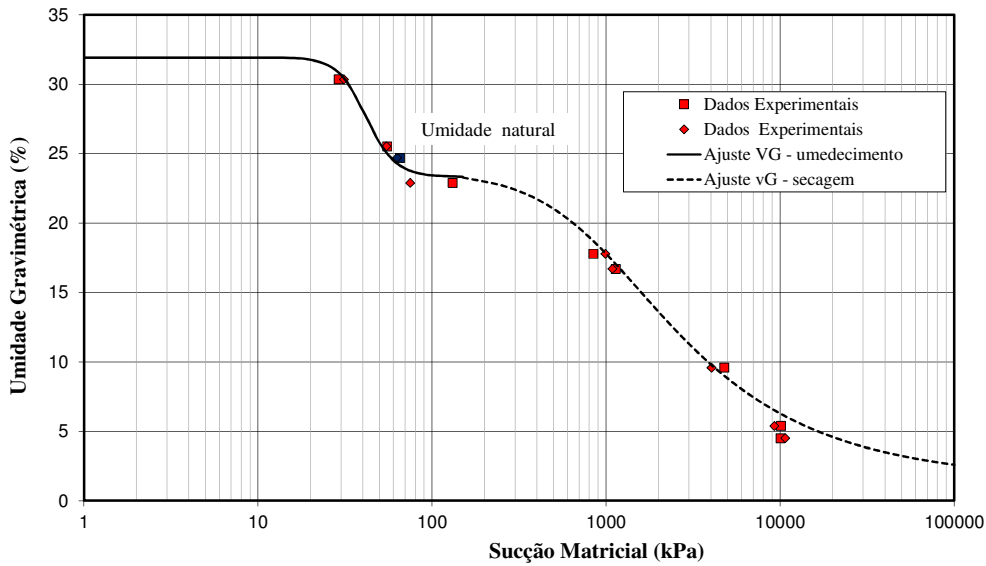


Figura 117 – Curva de retenção do solo residual DC04. Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980).

Os dados de entrada bem como os parâmetros obtidos ao ajustar as curvas de retenção pelo modelo de van Genuchten (1980) são apresentados na Tabela 17. O sub-índice 1 está relacionado com a curva de umedecimento e o 2 com a de secagem. O ajuste foi dividido de tal forma devido às descontinuidades das curvas.

Os solos DC02 e DC04 apresentam uma menor porcentagem de macroporos e de fração areia que os solos DC01 e DC03, respectivamente. Estas características se refletem no valor do teor de umidade gravimétrica de saturação e da sucção de entrada de ar, que estão diretamente relacionados com a composição mineralógica e distribuição dos poros dos solos. Desta forma, quanto maior a macroporosidade e a quantidade de areia, menor o valor de sucção de entrada de ar e da umidade gravimétrica de saturação, como observado nos solos das duas feições estudadas (DC01 e DC02, feição melanocrática, e DC03 e DC04, feição leucocrática).

Tabela 17 – Parâmetros das curvas de retenção e dos ajustes pela equação de van Genuchten (1980).

Solo	Curva Umedecimento								Curva Secagem							
	ws ₁ (%)	wr ₁ (%)	Ψar ₁ (kPa)	Ψres ₁ (kPa)	n	m (1-1/n)	α	R ²	ws ₂ (%)	wr ₂ (%)	Ψar ₂ (kPa)	Ψres ₂ (kPa)	n	m (1-1/n)	α	R ²
DC01	28,7	18,4	4,7	30	2,54	0,61	1,061	0,99	18,8	1,4	115	10000	1,31	0,24	2,220	0,99
DC02	39,1	21,1	12	90	2,41	0,59	0,411	0,97	22,7	1,6	590	8200	1,71	0,42	0,008	0,98
DC03	28,0	10,6	2,8	60	1,80	0,44	1,549	0,93	11,9	1,5	780	7000	1,82	0,52	0,010	0,99
DC04	31,9	23,32	28	68	4,57	0,82	0,249	0,98	23,8	1,4	420	10000	0,01	0,38	1,621	0,99

ws: umidade gravimétrica de saturação; wr: umidade gravimétrica residual; Ψar: sucção de entrada de ar; Ψres: sucção residual; n, m e α: parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980); R²:fator de correlação obtido com o ajuste dos dados.

iv. Caracterização mineralógica e estrutural

A análise mineralógica por Difração de Raios-X foi realizada nas frações mais finas dos solos, correspondentes ao material passante nas peneiras #40 (areia fina, silte e argila), #200 (silte e argila) e #400 (argila). Já a fração mais grossa, solo retido na peneira #40, e a fração areia fina, passante na peneira #40 e retida na peneira #200, foram analisadas na lupa binocular.

As Figuras 118 a 120 apresentam os difratogramas da feição máfica colocados em ordem decrescente com o grau de intemperismo, sendo o solo DC01 o menos intemperizado. Da mesma forma, os difratogramas da feição félsica constam nas Figuras 121 a 123, com o solo DC03 sendo o menos intemperizado.

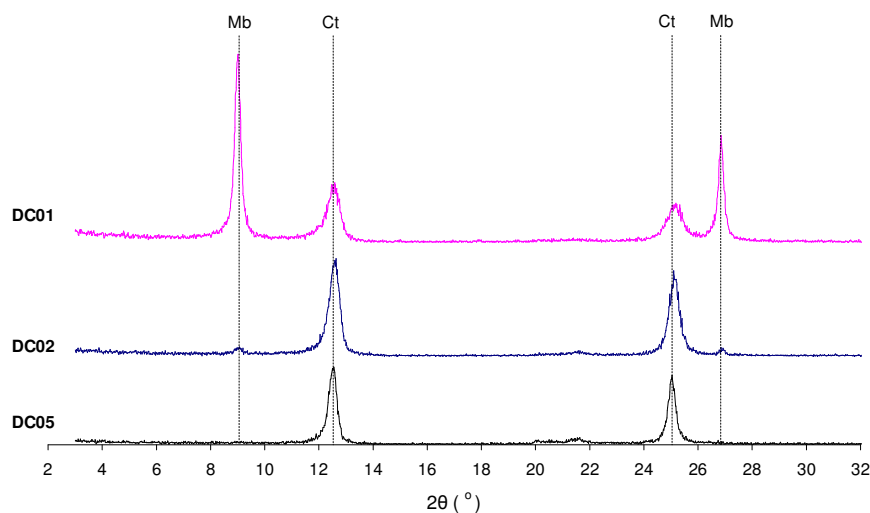


Figura 118 – Difratograma material passante na peneira #40 MB = biotita, Ct = caulinita.

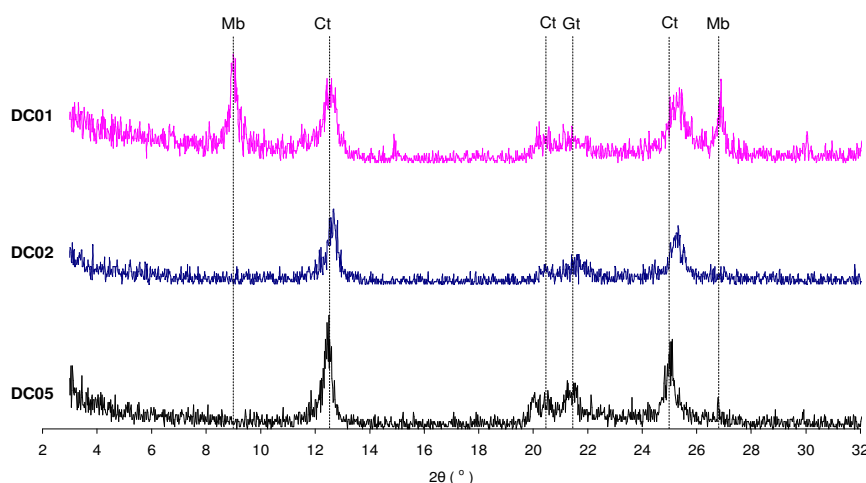


Figura 119 – Difratograma material passante na peneira #200 (feição máfica). MB = biotita, Ct = caulinite e Gt = goethita.

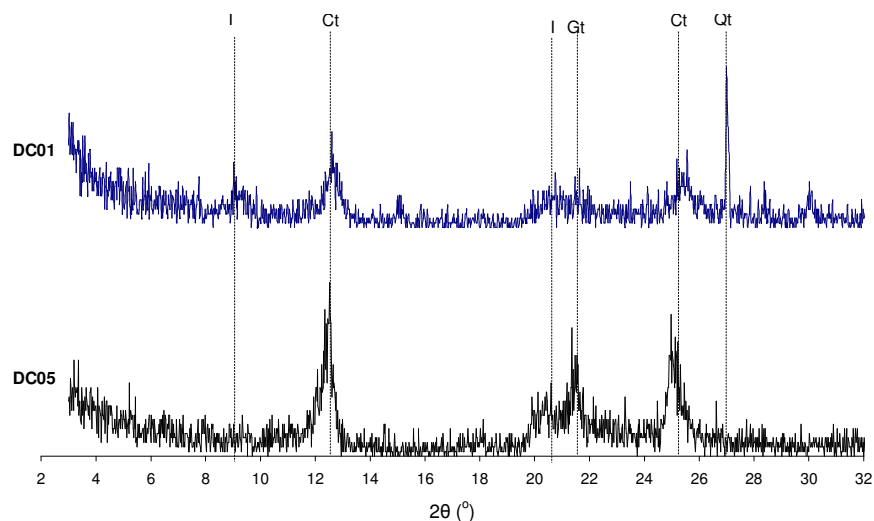


Figura 120 – Difratoograma material passante na peneira #400 (feição máfica). MB = biotita, Ct = caulinita e Gt = goethita, I = illita, Qt = quartzo.

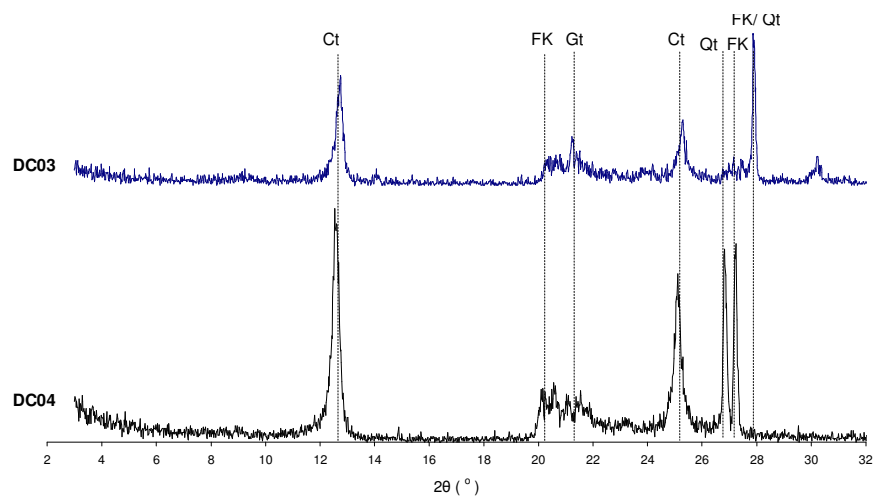


Figura 121 – Difratoograma material passante na peneira #40 (feição félsica). Ct = caulinita, FK = feldspato potássico, Gt = Goethita, Qt = quartzo.

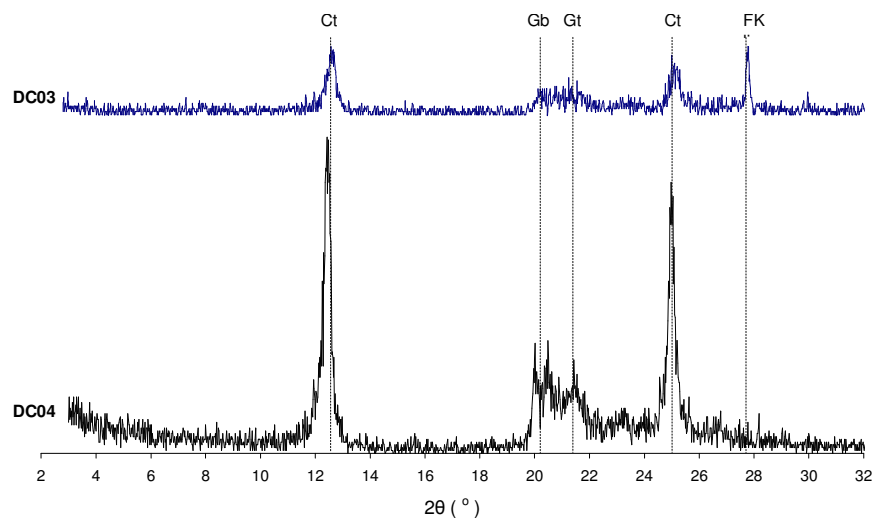


Figura 122 – Difratoograma material passante na peneira #200 (feição félsica). Ct = caulinita, FK = feldspato potássico, Gt = Goethita, Qt = quartzo.

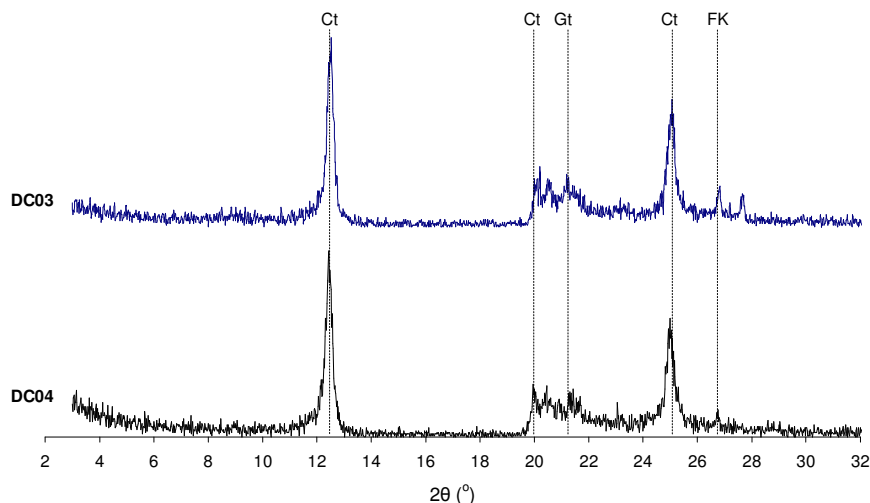


Figura 123 – Difratograma material passante na peneira #400 (feição félsica). Ct = caulinita, FK = feldspato potássico, Gt = Goethita, Qt = quartzo.

Os difratogramas dos solos provenientes da feição máfica indicam a presença de biotita, caulinita, goethita e ilita. Os picos difratados correspondentes à biotita no solo DC01, o menos intemperizado, são intensos, principalmente na fração fina, indicando uma maior concentração e cristalinidade deste mineral em relação aos argilominerais. Já no solo DC02 e DC05, o argilomineral caulinita apresenta-se mais cristalino e concentrado que a biotita e a goethita. Fica evidente nos difratogramas a evolução do intemperismo, com a biotita, mineral índice, evoluindo para caulinita sem passar pela vermiculita ou ilita de forma clara. O quartzo presente na fração argila no solo DC05 é possivelmente fruto do processo empregado para fabricação das lâminas, peneiramento, elaboradas a partir do material passante na peneira #400.

O solo DC03, oriundo da feição félsica e menos intemperizado, apresenta feldspato potássico em todas as frações finas. Já o solo DC04 possui este mineral basicamente na fração areia fina e silte. Nos solos provenientes desta porção não fica tão evidente a evolução do mineral índice, feldspato potássico, com o intemperismo, ao contrário dos solos provenientes da feição máfica. Ambos os solos são formados também por caulinita, goethita e quartzo.

De forma complementar, ainda foram executados ensaios de análise térmica diferencial na fração fina dos solos (silte e argila). Neste ensaio, como já mencionado, a perda de água é indicada por reações endo ou exotérmicas com o aumento de temperatura da amostra. Quando ocorrem estas transformações, elas aparecem como deflexões em sentidos opostos no difratograma. A maioria

dos minerais secundários possui temperaturas específicas para estas reações quando há perda de água de constituição.

A água adsorvida, isto é, a água que está como uma fase líquida preenchendo capilares nos minerais secundários apresenta um pico endotérmico para uma temperatura de 110 °C. Este pico é evidente em todos os solos ensaiados (Figura 124). A pequena deflexão para a temperatura de 320 °C nos solos da feição máfica está relacionada a goethita, que aparece em quantidade inferior a caulinita, representada por sua vez pelo pico endotérmico a 550 °C. Quanto maior a quantidade do argilomineral, maior a área da deflexão correspondente no termograma. Desta forma, tem-se que a quantidade de caulinita aumenta com o grau de alteração do solo. O pequeno pico exotérmico a cerca de 950 °C está relacionado também a caulinita.

Da mesma forma, os solos da feição félsica possuem os picos característicos da caulinita, bem como o correspondente ao de perda de água adsorvida. Nota-se, no entanto, que o solo DC04 apresenta o pico endotérmico, correspondente à água adsorvida, mais pronunciado que o solo DC03, indicando a presença de outros argilominerais que não foram detectados nesta análise.

O aumento do teor de caulinita com o grau de alteração é corroborado com os dados dos ensaios de perda ao fogo a 600 °C apresentado na Tabela 18.

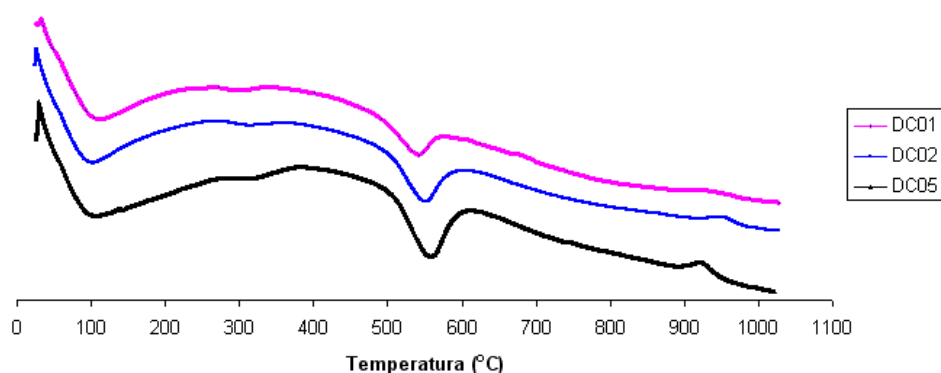


Figura 124 – Termograma dos solos oriundos da feição máfica de Duque de Caxias

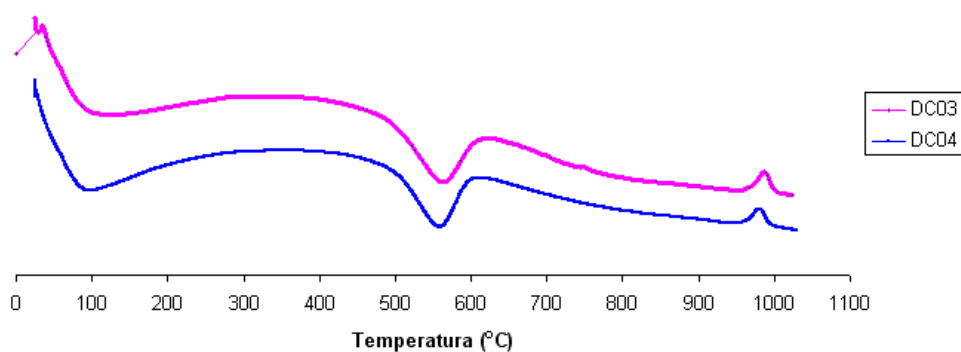


Figura 125 - Termograma dos solos oriundos da feição félsica de Duque de Caxias

Tabela 18 – Perda ao fogo a 600 °C dos solos residuais do perfil de migmatito.

Solo	Perda ao fogo 600°C
DC01	2,97
DC02	7,19
DC05	8,86
DC03	1,17
DC04	7,91

As características da fração areia também distinguem os solos residuais das duas porções. Apesar dos solos apresentarem, de forma geral, a mesma porcentagem de areia, os da porção leucocrática têm esta fração composta basicamente por areia grossa com quartzo-feldspato alterado, enquanto os solos da feição melanocrática apresentam essencialmente fração areia fina e média, constituída por pequenos agregados de biotita alterada com ou sem óxi-hidróxido de ferro precipitado, conforme mostrado Tabela 19.

Com a finalidade de avaliar o arranjo espacial dos constituintes e da distribuição da porosidade, de modo a complementar as análises físicas e o estudo da mineralogia, foram analisadas sob microscópio binocular lâminas delgadas obtidas a partir de amostras indeformadas dos solos em questão.

Como mostra a Figura 126, o solo DC01 é predominantemente formado por biotita alterada com oxidação nas extremidades. O início de alteração deste mineral se dá pelas bordas das lâminas, e se caracteriza pela perda da cor original devido a este processo. Os grãos vão ficando dourados e depois completamente descorados. A caulinita presente é proveniente do feldspato plagioclásio, que se encontra completamente intemperizado.

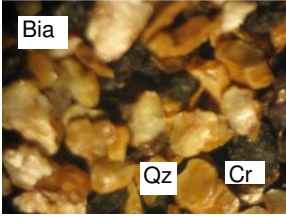

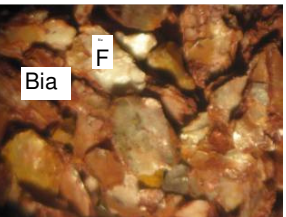

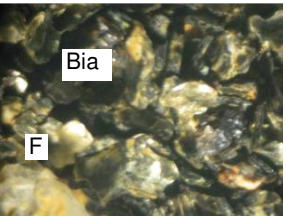
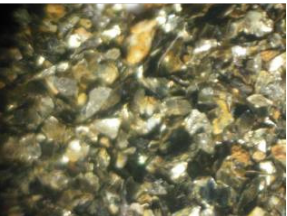
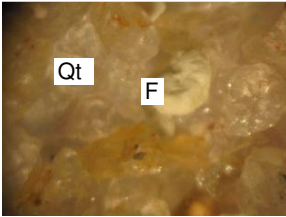
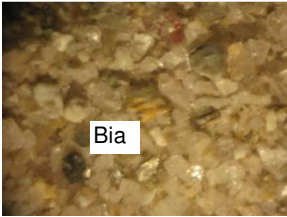
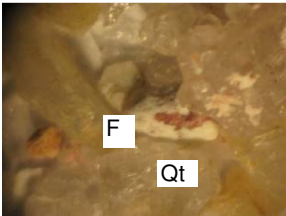

Já o solo DC02, encontra-se com a biotita mais intemperizada que o solo DC01. Neste, a biotita já se apresenta em processo de derreificação, sendo o

ferro liberado depositado nos vazios do solo, diminuindo sua macroporosidade que, apesar de não ser visível nas lâminas, é indicada nos resultados de porosimetria por injeção de mercúrio.

Oxi-hidróxido de ferro juntamente com o material fino (silte e argila – principalmente a goethita) atuam como cimento. O papel da goethita como agente cimentante é ressaltado por Collins (1985) que afirma que este argilomineral pode contribuir com o aumento da resistência ao cisalhamento do solo em termos de coesão aparente.

Vale ressaltar que, este tipo de cimentação é mais frágil que a formada por óxido-hidróxido de ferro puro. Parte do material fino pode ter sido transportado de feições superiores mais intemperizadas.

Tabela 19 Fração areia dos solos pertencentes ao perfil de intemperismo de Duque de Caxias.

Amostra	Material retido na peneira nº 40	Material passante na peneira nº 40 e retido na peneira nº 200	Observações
DC05			<ul style="list-style-type: none"> • Biotita alterada (Bia); • Possui ainda granada alterada; • Presença de concreções de manganês (20%) (Cr); • Traços de quartzo (Qz) (<2%)
DC02			<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta biotita alterada, principalmente nas bordas (Bia); • Biotita mais alterada que no solo DC01 e menos que no solo DC05; • Traços de feldspatos (F); • Traços de quartzo (<1%).
DC01			<ul style="list-style-type: none"> • Predominância de mica (biotita), com início de alteração nas bordas (Bia); • Traços de quartzo (<5%) • Traços de feldspato alterado (F) (<1%); • Os minerais estão menos alterados que os dos solos DC05 e DC02.
DC03			<ul style="list-style-type: none"> • Presença de feldspato alterado (F) (<3%); • Os grãos de quartzo predominam, não sendo lisos nem arredondados (Q); • Presença de magnetita; • Contém cerca de 3% de mica alterada (Bia).
DC04			<ul style="list-style-type: none"> • Presença de feldspato alterado ou caulinita (F); • Alto teor de grãos de quartzo, com alguns apresentando incrustações de caulinita (Qz); • Fração passante na #40 apresentando cerca de 3% de mica alterada; • Nesta fração ainda há concentração de cerca de 20% de feldspato alterado;

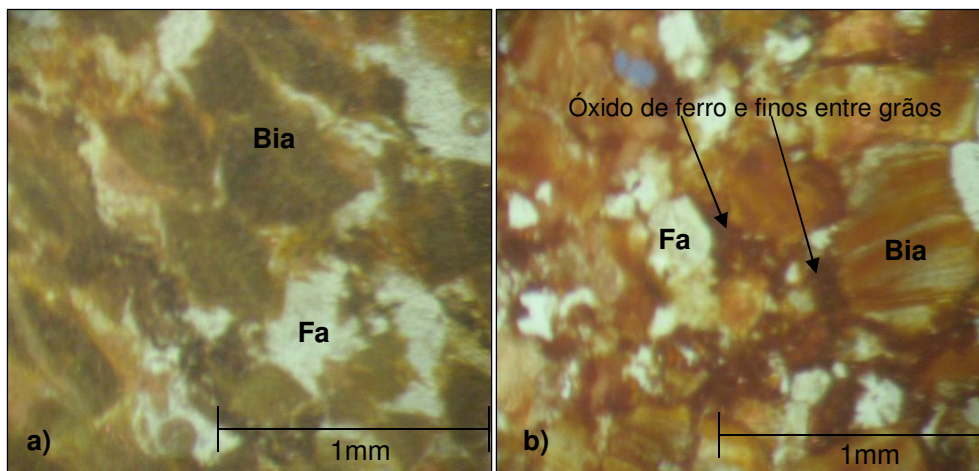


Figura 126 – Lâminas delgadas do solo DC01 (a) e DC02 (b) observadas na lupa binocular. Bia = Biotita alterada, Fa =feldspato alterado.

Ao analisar as lâminas do solo da feição félsica (Figura 127), identifica-se basicamente os minerais quartzo e feldspato potássico. Enquanto o solo DC03 apresenta macroporosidade e pouco material fino depositado, o solo DC04 possui minerais envoltos por uma matriz argilosa rica em óxido de ferro. A ação do intemperismo fica evidente nestes solos, com a diminuição da macroporosidade e aumento da microporosidade devido à deposição de material argiloso, fruto da alteração do feldspato. Esta diferença na porosidade é ratificada pelos resultados dos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio. Da mesma forma, o maior teor de argila do solo DC04, também observado no ensaio de granulometria, indica um grau de alteração maior do mesmo em relação ao solo DC03. Logo, espera-se que a macroestrutura, formada pelos grãos e pacotes de partículas com os vazios intergranulares, defina o comportamento do solo residual DC03, enquanto que no solo DC04 a ação conjunta de macro e micro estruturas (matriz fina com seu próprio arranjo) influencie de forma relevante o comportamento deste solo.

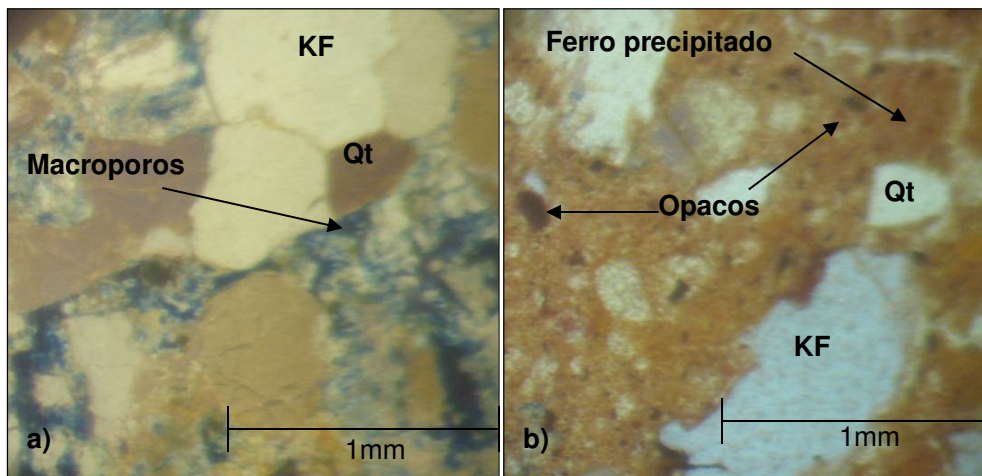
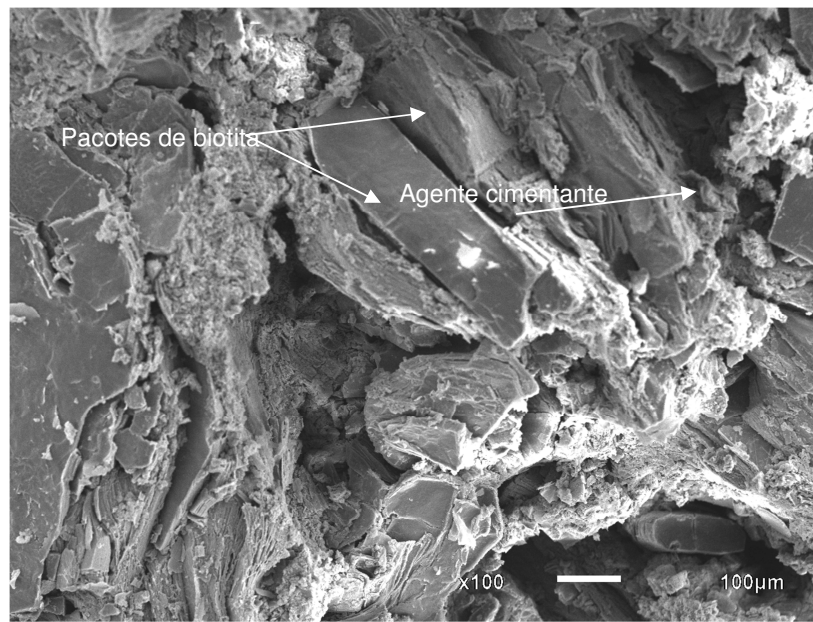


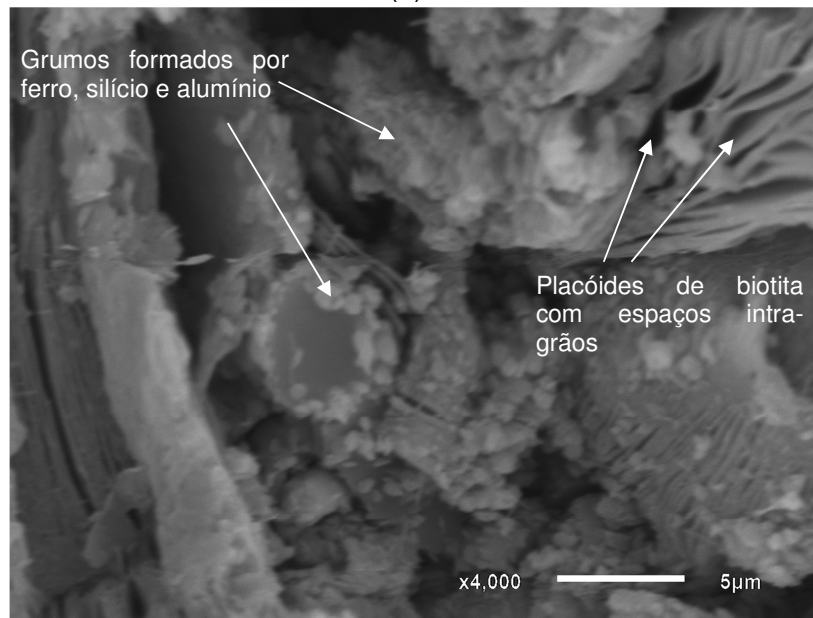
Figura 127 – Lâminas delgadas do solo DC03 (a), com luz polarizada, e DC04 (b) observadas na lupa binocular. KF = feldspato potássico e Qt = quartzo.

v. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 128 é formada por duas imagens do solo residual DC02 em diferentes escalas. Observa-se na Figura 128 (a) a presença de biotita alterada nas bordas, com macroporos entre pacotes deste mineral. A organização espacial mostra o aspecto estruturado do solo. Agentes cimentantes foram identificados entre pacotes. Na Figura 128 (b) fica evidente a presença de vazios intra-grãos entre os placóides de biotita em processo de alteração com material precipitado tanto sobre os pacotes como entre os mesmos, composto basicamente por silício, alumínio e ferro, sendo o último elemento em grande concentração. O ferro é oriundo, provavelmente, do processo de derrificação da mica, já observado nas lâminas delgadas. Quando ocorre entre grãos atua como cimento. O silício e o alumínio são constituintes básicos da mica e da caulinita, podendo ainda estar em estado amorfo. Uma pequena concentração de potássio, relacionada com uma pequena quantidade de K-feldspato presente neste solo, como já identificado nas análises de DRX, foi registrado em alguns pontos pela análise EDS.



(a)



(b)

Figura 128 – (a) Aspecto estruturado da amostra natural do solo residual DC02. Nota-se as placas de biotita intemperizadas nas bordas com a presença de cimentação entre os minerais; (b) As análises de EDS desta imagem indicam uma grande concentração de silício, alumínio e ferro nos grumos presentes na superfície das placas de biotita, bem como ligando partículas.

A Figura 129 apresenta uma imagem obtida no MEV do solo residual DC02 com a análise EDS de pontos de interesse. O elemento ouro presente nos EDS está relacionado com a preparação da amostra. Mais uma vez, fica evidente a estrutura do solo, com presença, entre as partículas de mica, de um material

com aspecto argiloso formado por caulinita e óxido de ferro precipitado (EDS do ponto 1 e 2).

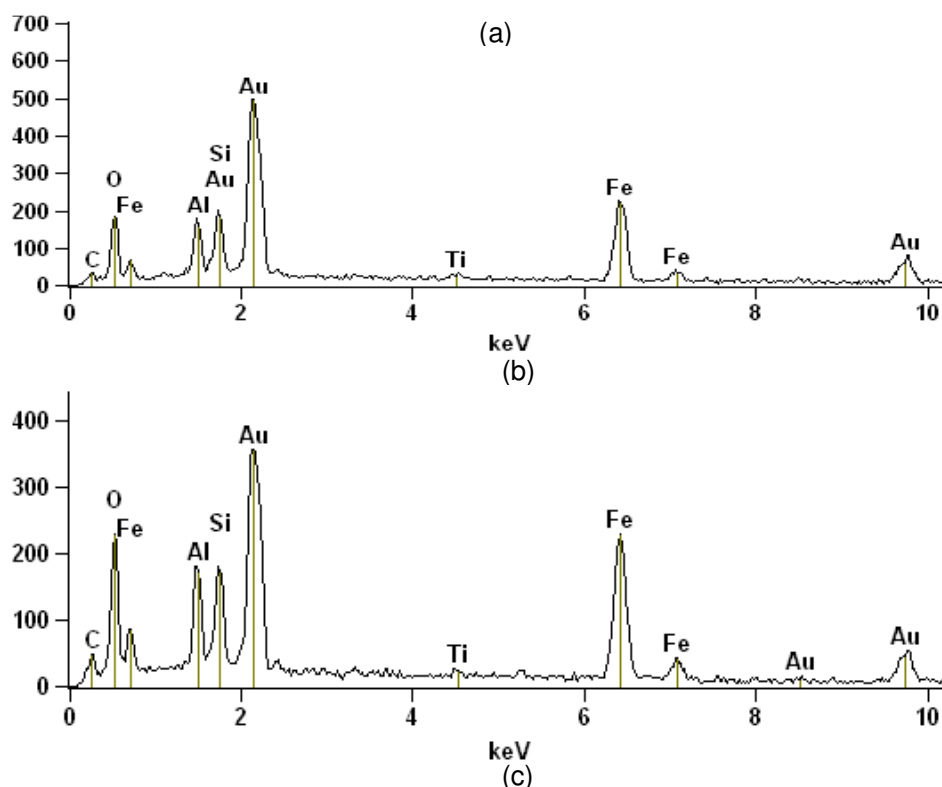
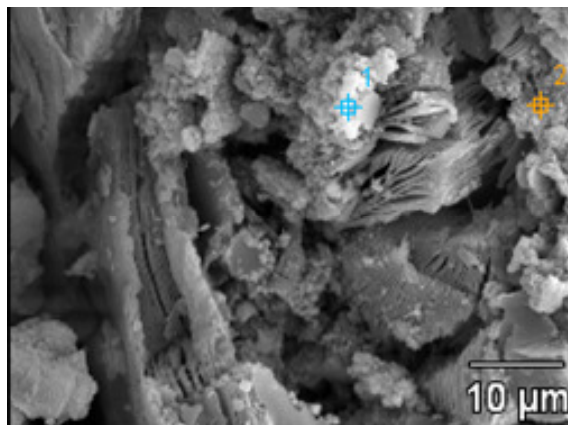


Figura 129 – a) Imagem da amostra natural do solo residual DC02; (b) e (c) EDS dos pontos 1 e 2, respectivamente, indicados em (a).

vi. Caracterização Química

Os dados provenientes da análise química total das amostras apresentados na Tabela 20 mostram os álcalis (K_2O , Na_2O , MgO , MnO e CaO) e os teores de TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 presentes nos solos de Duque de Caxias. Nos solos da feição máfica, tem-se um grande teor de ferro, que está vinculado à composição da biotita e da goethita, ou encontra-se precipitado, atuando como agente cimentante. Nota-se ainda que, dos elementos analisados, apenas o

alumínio e o ferro concentram-se com o aumento do grau de alteração, sendo a sílica e os álcalis lixiviados. O mesmo ocorre nos solos da feição félsica, no entanto, o teor de ferro nestes solos é cerca de 6 vezes menor.

O aumento do valor de perda ao fogo com o grau de alteração é fruto da intemperização da biotita (feição máfica) e dos feldspatos (feição máfica e félsica).

Nas análises de ataque sulfúrico e complexo sortivo, Tabela 21 e Tabela 22, respectivamente, apenas os minerais secundários, óxidos cristalinos de ferro e de alumínio e amorfos são decompostos.

Tabela 20 – Resultados da análise química total dos solos de Duque de Caxias

Solo	Análise Química Total												Elementos traços
	L.O.I.	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	
DC01	9,03	2,93	22,83	43,06	0,41	3,09	0,32	3,14	0,57	14,06	0,09	-	Na, S, Rb, Sr, Zr
DC02	11,56	-	26,04	39,98	0,29	-	-	4,18	0,35	18,16	-	-	Mg, S, K, Ca, Zr, Nb
DC05	13,09	-	27,02	38,32	0,46	-	-	2,86	0,24	18,10	-	-	S, K, Zr
DC03	8,92	-	27,66	56,72	-	4,53	-	-	-	2,09	-	-	P, Ti, Mn, Rb, Zr
DC04	12,59	-	33,34	49,84	-	-	-	0,82	-	3,77	-	0,24	P, S, K, Ca, Rb, Y

L.O.I. - Perda ao fogo 950°C

De acordo com Young (2001), o intercâmbio de cátions em solos acontece quando íons do fluido intersticial carregados positivamente são atraídos para a superfície da fração argila do solo. A ocorrência deste processo se deve à necessidade de satisfazer a eletroneutralidade e a estequiometria. Os quesitos de eletroneutralidade sugerem que os íons trocáveis devem suprir a deficiência de carga negativa não equilibrada presente naturalmente nas superfícies de materiais argilosos. Estes íons trocáveis são denominados “cátions trocáveis”. A capacidade de troca catiônica (CTC) indica a quantidade de cátions trocáveis que um solo possui, e pode ser expressa em número de miliequivalentes de cátions por 100 gramas de solo (meq/100g) ou por centimol por quilo (cmol_c/kg).

Nos solos ácidos, os cátions trocáveis predominantes são o alumínio e o hidrogênio.

Todos os solos apresentam valores baixos de capacidade de troca catiônica e de bases trocáveis. Os valores de CTC são compatíveis com suas composições mineralógicas e seu grau de intemperismo. A fração argila dos solos é composta predominantemente por caulinita, argilomineral cuja capacidade de troca catiônica varia entre 3 e 15 cmol_c/kg (Mitchell, 1976). Os valores podem ser utilizados para avaliar o grau de intemperismo dos solos.

Tabela 21 - Resultado de Ataque Sulfúrico dos solos de Duque de Caxias

Solo	Ataque Sulfúrico (%)						Ki (SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	Kr SiO ₂ /(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	Carbono orgânico (%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MnO			
DC01	23,8	19,1	9,6	2,88	-	-	2,12	1,61	0,16
DC02	21,6	19,5	12,5	3,08	-	-	1,88	1,33	0,09
DC05	23,2	21	12,4	2,38	-	-	1,88	1,36	0,12
DC03	20,4	20,8	2,3	0,12	-	-	1,67	1,56	0,16
DC04	26	23,3	2,7	0,52	-	-	1,9	1,77	0,16

Os valores obtidos para pH em água mostram que os solos estudados são ácidos (pH<7). De acordo com Agnelli e Albiero (1997), pode-se verificar através do pH se o solo possui capacidade de retenção de ânions ou cátions. Valores negativos de ΔpH indicam retenção de cátions, e valores positivos sugerem retenção de ânions. Todos os solos apresentaram ΔpH negativo.

Tabela 22 – Resultado de complexo sortivo e pH.

Solo	Complexo sortivo (cmol _c /dcm ³)								pH (1:2,5)		
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S _c [*]	Al ³⁺	H ⁺	CTC [#]	Água	KCl 1N	ΔpH
DC01	0,1	1,2	0,15	0,06	1,5	4,8	2,8	9,1	5,1	4,2	-0,9
DC02	0,8	0,08	0,03	0,9	1,9	2,6	5,4	4,7	4,7	4,4	-0,3
DC05	0,4	0,02	0,07	0,5	2,4	2,9	5,8	4,9	4,9	4,4	-0,5
DC03	0,4	0,04	0,01	0,4	1,4	1,6	3,4	4,6	4,6	4,3	-0,3
DC04	0,5	0,03	0,04	0,6	2,7	2,7	6	4,6	4,6	4,4	-0,2

* S_c = soma de cátions trocáveis ou de bases (S_c = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺)

CTC = capacidade de troca catiônica (S_c + Al³⁺ + H⁺)

6.3.2. Solo Tanguá

i. Caracterização física básica

Os resultados de caracterização física básica do solo residual de Tanguá (T) estão apresentados na Tabela 23. A curva granulométrica está indicada na Figura 130.

Tabela 23 – Resultados de ensaios de caracterização do solo de Tanguá (T)

Granulometria - ABNT (%)				Limites de Atterberg (%)		γ _d (kN/m ³)	γ _{nat} (kN/m ³)	w _{nat} (%)	G _s	Índice de vazios	S (%)
Pedregulho	Areia	Silte	Argila	LL	LP						
3,2	42,6	35,1	19,2	40,86	29,23	14,3	16,2	13,65	2,728	0,91	40,20

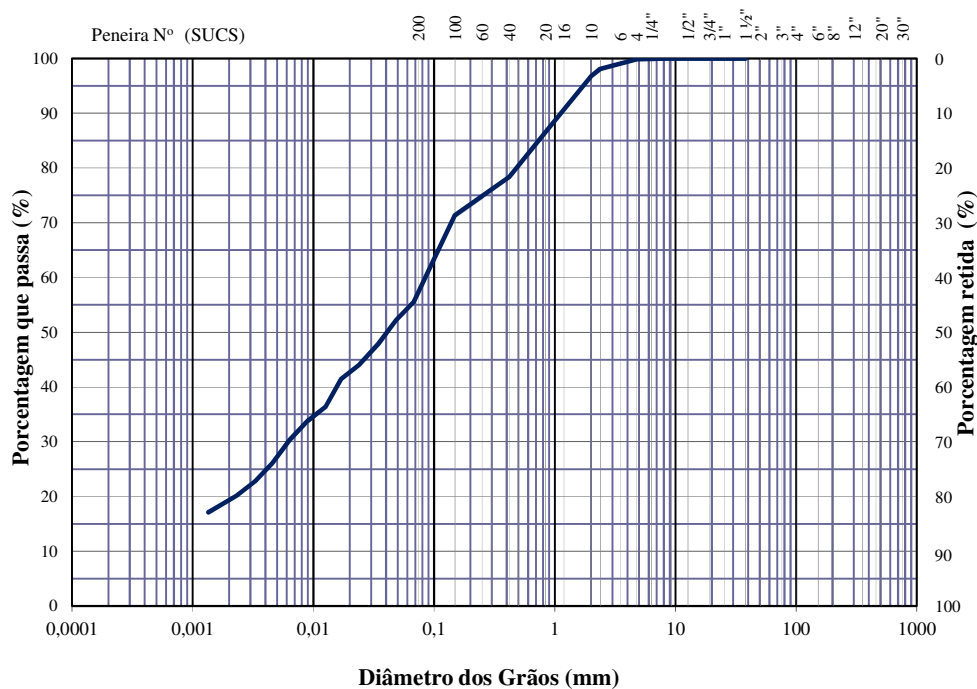


Figura 130 – Curva granulométrica do solo de Tanguá (T).

Os limites de consistência são compatíveis com solos que possuem na sua fração fina argilominerais com estrutura 1:1 como a caulinita, sendo classificado pelo SUCS como argila de baixa compressibilidade. Vale ressaltar, como será mostrado a seguir, que a fração areia deste solo é composta basicamente por grumos (concreções) caulínicos.

Assim como os solos residuais de Duque de Caxias, este solo apresenta a fração fina (silte e argila) completamente floculada, característica esta detectada ao se realizar sedimentação sem o emprego de defloculante.

De acordo com o índice de atividade (I_a) proposto por Skempton, o solo é inativo ($I_a = 0,60$). Considerações referentes à classificação de solos residuais constam no item 6.3.1.

ii. Porosimetria de mercúrio

A distribuição acumulativa dos diâmetros dos poros é apresentada na Figura 131. Nota-se, na figura, que o solo apresenta uma curva em formato de “S”.

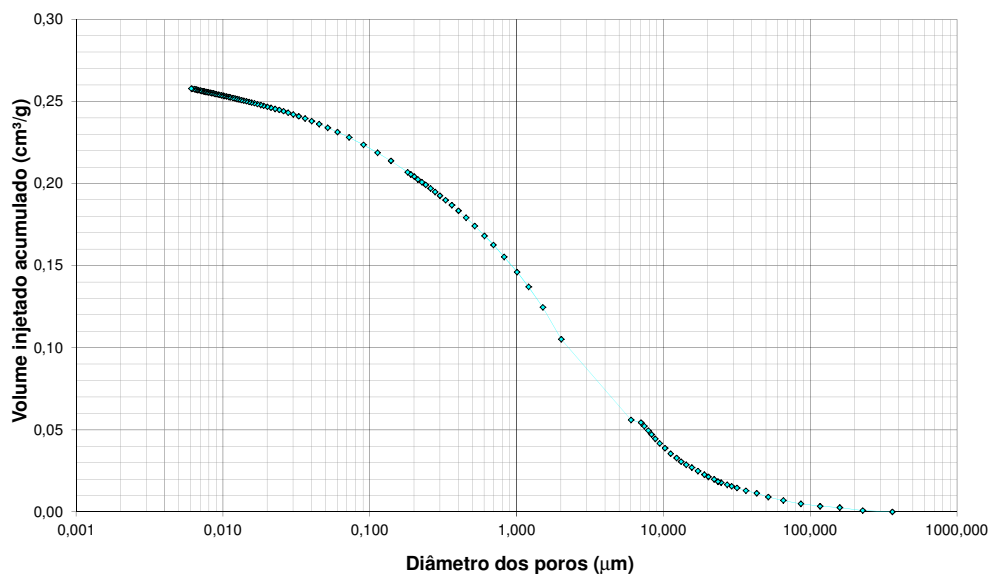


Figura 131 – Distribuição acumulativa dos poros do solo de Tanguá (T)

A porosidade total obtida neste ensaio foi de 40,75 %. Na Tabela 24 tem-se a distribuição de poros de acordo com a classificação da IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada) para micro, meso e macroporos. De acordo com esta classificação, o solo residual de Tanguá possui uma concentração maior de macroporos, distribuição esta que fica evidente na Figura 132, onde consta o gráfico da distribuição incremental dos poros com a classificação IUPAC indicada. Os picos de distribuição indicam dois picos principais de diâmetro de poros correspondentes a 2 e 8 μm , ambos na faixa de macroporos.

Tabela 24- Distribuição de poros em porcentagem segundo a IUPAC para o solo de Tanguá (T)

Microporos (%) $\Phi < 0,2 \mu\text{m}$	Mesoporos (%) $0,2 \mu\text{m} < \Phi < 0,5 \mu\text{m}$	Macroporos (%) $\Phi > 0,5 \mu\text{m}$
21,40	10,89	67,70

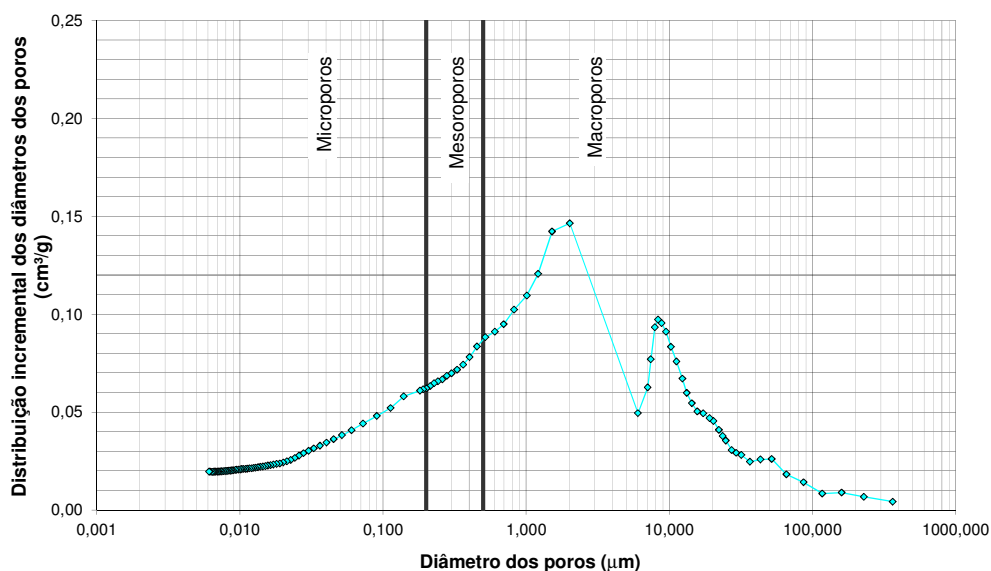


Figura 132 – Distribuição incremental dos poros com a classificação dos poros segundo a IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada). Solo de Tanguá (T).

iii. Curva de retenção

O ensaio para a determinação da curva de retenção deste solo foi executado com o único intuito de caracterizá-lo.

Nestes ensaios, não foi detectada variação significativa do índice de vazios, avaliada por meio das relações lineares entre a umidade gravimétrica e volumétrica e/ou grau de saturação, onde se obteve um fator de correlação superior a 0,99, como pode ser observado na Figura 133. Logo, o coeficiente angular da relação entre a umidade gravimétrica e a volumétrica é igual à média do peso específico seco do solo.

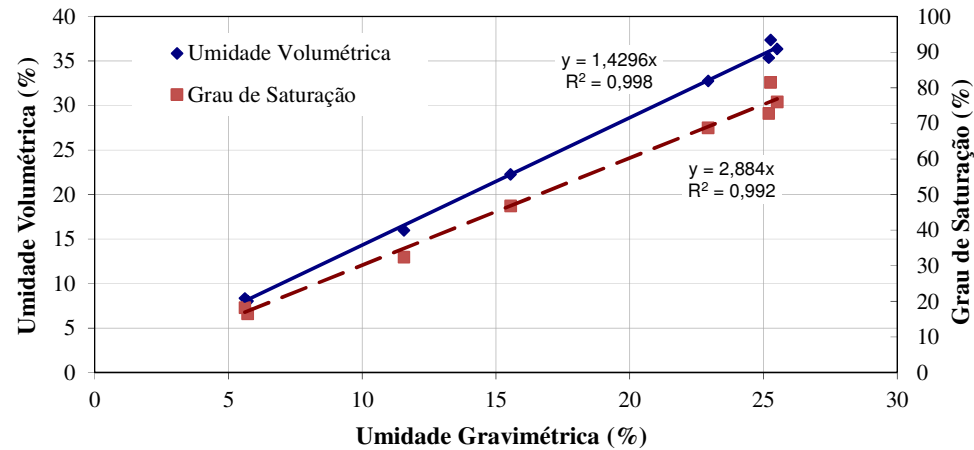


Figura 133 – Relação entre o teor de umidade gravimétrica e grau de saturação e a umidade volumétrica para o solo de Tanguá (T).

Nas Tabela 25 constam os dados obtidos nos ensaios, além dos valores dos parâmetros físicos correspondentes a cada anel. Na Figura 134 é apresentada a variação de teor de umidade gravimétrica em função do valor de sucção.

A equação sugerida por van Genuchten (1980) foi ajustada com o auxílio do programa comercial RETC (van Genuchten *et al*, 1991), sendo o ajuste exposto na mesma figura. Os dados de entrada para este ajuste, os valores da umidade gravimétrica saturada e da umidade gravimétrica residual foram obtidos por meio de gráficos seguindo o método das tangentes (Fredlund e Xing,1994). Como a curva apresenta-se bimodal, foram realizados ajustes para as duas partes.

Tabela 25 – Dados experimentais para obtenção da curva de retenção do solo Tanguá.

Umidade Gravimétrica (%)	Umidade Volumétrica (%)	Grau de Saturação (%)	Sucção Matricial (kPa)		e	Y _d * (kN/m³)	Y _{nat} (kN/m³)
15,55	22,23	46,71	423,60	449,25	0,908	14,30	16,40
5,72	8,01	16,47	10461,53	10512,20	0,948	14,00	16,00
5,62	8,31	18,17	9570,13	8944,52	0,843	14,80	16,70
11,56	15,97	32,35	3983,24	3958,83	0,975	13,80	16,20
22,93	32,74	68,70	62,19	64,82	0,911	14,30	16,10
21,68	31,83	68,91	27,76	27,17	0,858	14,70	16,60
25,27	37,34	81,47	14,51	13,99	0,846	14,80	16,90
25,20	35,34	72,73	10,90	10,54	0,945	14,00	15,90
25,52	36,34	76,01	9,11	8,98	0,916	14,20	15,80

* Peso específico seco obtido a partir da média destes valores = 1,43g/cm³

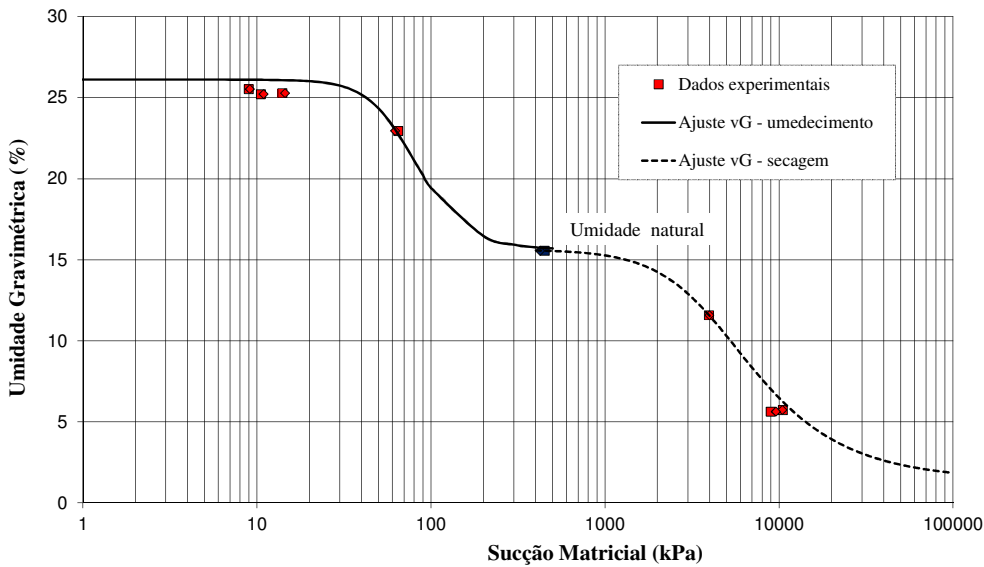


Figura 134 – Curva de retenção do solo residual de Tanguá (T). Ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980).

Os dados de entrada bem como os parâmetros obtidos ao ajustar as curvas de retenção pelo modelo de van Genuchten (1980) são apresentados na Tabela 26. O sub-índice 1 está relacionado com a curva de umedecimento e o 2 com a de secagem.

Tabela 26 - Parâmetros das curvas de retenção e do ajuste pela equação de van Genuchten (1980) para o solo residual de Tanguá (T).

Curva Umedecimento								Curva Secagem							
ws ₁ (%)	wr ₁ (%)	Ψar ₁ (kPa)	Ψres ₁ (kPa)	n	m (1-1/n)	α	R ²	ws ₂ (%)	wr ₂ (%)	Ψar ₂ (kPa)	Ψres ₂ (kPa)	n	m (1-1/n)	α	R ²
26,1	15,6	40	180	3,39	0,71	0,139	0,97	15,6	1,4	115	20000	2,09	0,52	0,002	0,99

ws: umidade gravimétrica de saturação; wr: umidade gravimétrica residual; Ψar: sucção de entrada de ar; Ψres: sucção residual; n, m e α: parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980); R²: fator de correlação obtido com o ajuste dos dados.

iv. Caracterização mineralógica

Para a caracterização mineralógica, os mesmos ensaios realizados nos solos de Duque de Caxias foram executados no de Tanguá (DRX, análise em microscópio binocular em lâmina delgada e na fração areia e análise térmica diferencial para melhor caracterizar a fração fina – silte e argila).

A Figura 135 apresenta o difratograma do material passante na peneira #40 do solo residual de Tanguá. É identificada no mesmo a presença de caulinita, illita e feldspato potássico. Os picos correspondentes ao feldspato são intensos e simétricos, indicando uma maior cristalinidade deste mineral em

relação aos argilominerais, que estão em formação. As mesmas observações valem para as amostras dos materiais passantes na peneira #200 (silte e argila) e #400 (argila). A presença marcante de feldspato nestas últimas frações pode ser explicada, em parte, à metodologia de preparação das amostras por peneiramento, devido à quebra de grãos.

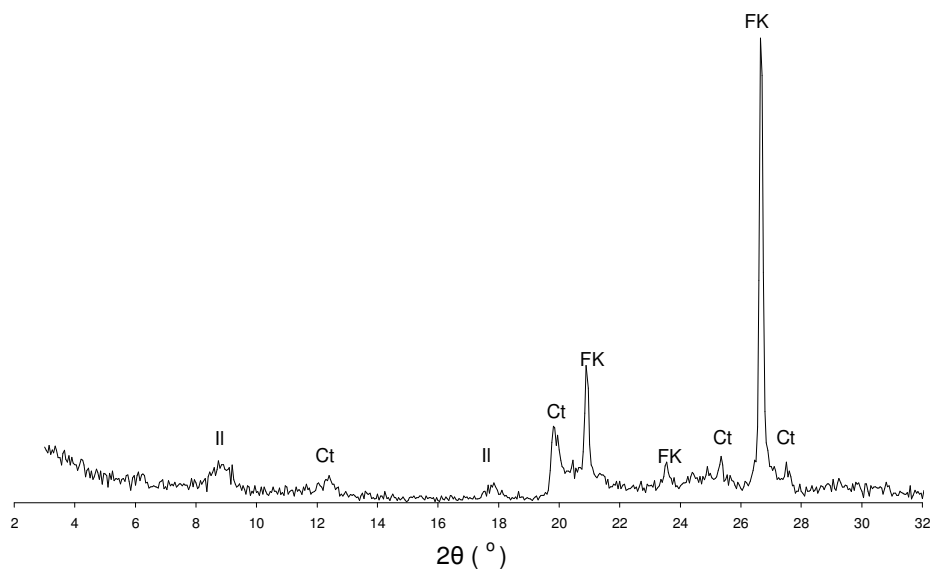


Figura 135 – Difratograma material passante na peneira #40 de Tanguá (T). Il = ilita, Ct = caulinita; FK = Feldspato potássico.

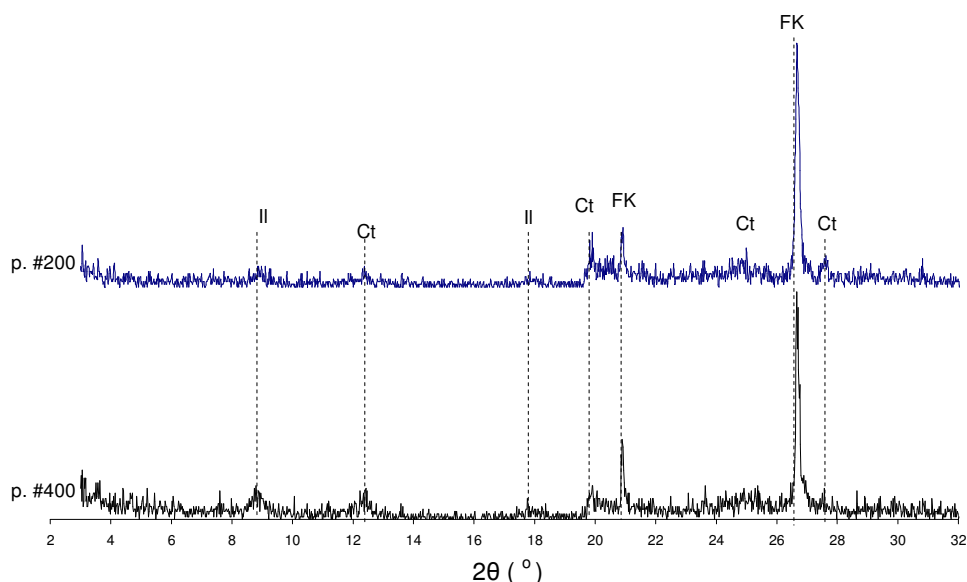


Figura 136 – Difratograma material passante na peneira #200 e #400 de Tanguá (T). Il = ilita, Ct = caulinita; FK = Feldspato potássico.

De forma complementar, ainda foram executados ensaios de análise térmica diferencial na fração fina dos solos (silte e argila). Neste ensaio, como já

mencionado, a perda de água é indicada por reações endo ou exotérmicas com o aumento de temperatura da amostra. Quando ocorrem estas transformações, elas aparecem como deflexões em sentidos opostos no difratograma. A maioria dos minerais secundários possui temperaturas específicas para estas reações quando há perda de água de constituição.

A água adsorvida, isto é, a água que está como uma fase líquida preenchendo capilares nos minerais secundários apresenta um pico endotérmico para uma temperatura de 110 °C. Este pico é evidente neste solo. A deflexão endotérmica para a temperatura de 450 °C está relacionada à presença de caulinita. A illita não é identificada nesta análise, provavelmente, pela baixa concentração deste argilomineral nestas frações. Ao se comparar o pico difratado referente à perda de água adsorvida com o da caulinita, nota-se que a deflexão do primeiro é mais evidente que o segundo, indicando a presença de outros componentes, inclusive amorfos.

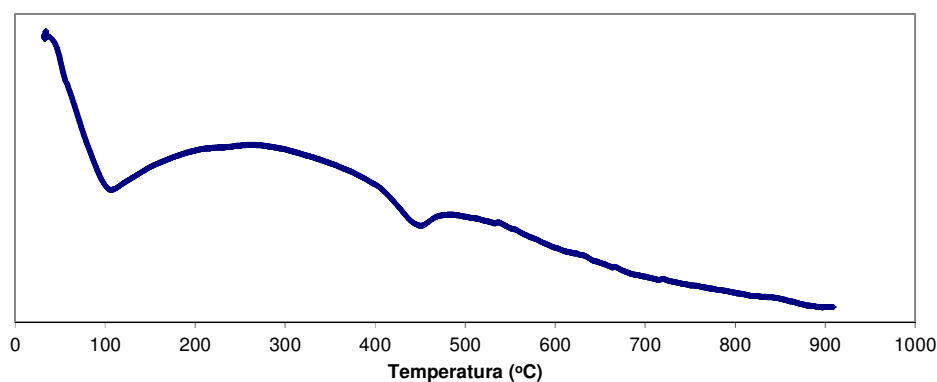


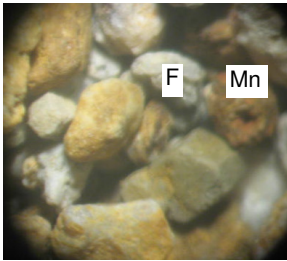
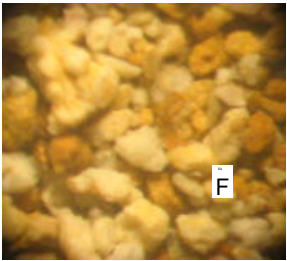
Figura 137 – Termograma da fração silte e argila do solo residual de Tanguá.

Ao observar as frações areia deste solo na lupa binocular – ver Tabela 27 – tem-se que a fração areia grossa é formada por feldspato alterado, pouco quartzo (<1%) e concreções de manganês e caulinita. Os grãos de feldspatos são brancos ou impregnados por óxido de ferro. Além disso, tem-se presença de opacos. A fração areia fina é predominantemente formada por concreções de caulinita e/ou feldspato alterado com óxido de ferro ao redor.

Com o intuito de avaliar o arranjo espacial dos constituintes e da distribuição da porosidade do solo, de modo a complementar as análises físicas e o estudo da mineralogia, foi analisada sob lupa binocular uma lâmina delgada obtida a partir de uma amostra indeformada (Figura 138). Este solo é formado por concreções de caulinita/feldspato e por uma matriz silto-argilosa composta

basicamente por caulinita, feldspato extremamente alterado e óxido de ferro. Há uma grande concentração de macroporos, como já observado no ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio, principalmente ao redor dos grãos maiores.

Tabela 27 – Fração areia do solo residual de Tanguá

Material retido na peneira nº 40	Material passante na peneira nº 40 e retido na peneira nº 200	Observações
		<ul style="list-style-type: none">• Presença de feldspato e caulinita, envoltos ou não por óxido de ferro (F);• Possui ainda opacos.• Presença de concreções de manganês (Mn);

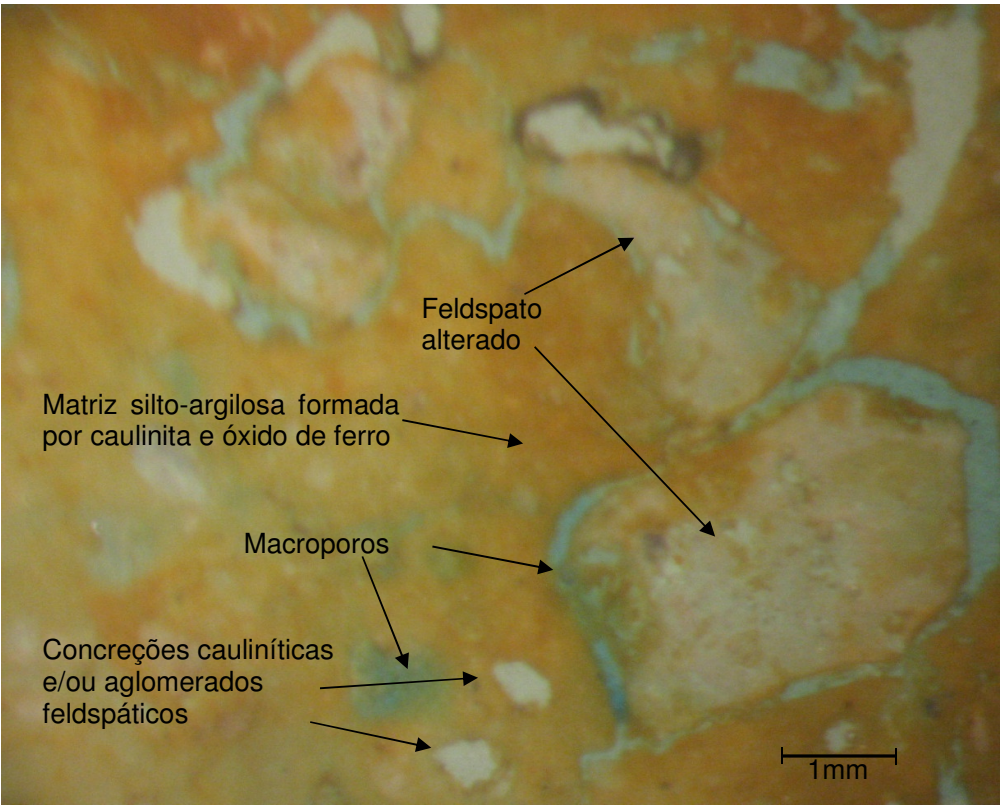


Figura 138 – Lâmina delgada do solo residual de Tanguá (T).

v. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 139 é composta por imagens do solo residual de Tanguá, cujas escalas estão indicadas. Nas Figuras 139 a e b fica evidente o feldspato em alteração, sendo transformado, possivelmente, em caulinita. Não é detectada nesta imagem a presença de cimentações. Solos residuais de rocha alcalina com baixa concentração de quartzo são compostos por minerais de fácil intemperismo e tendem a ter composição siltosa formada por minerais secundários, concreções e minerais primários em estágio avançado de alteração. Esta composição pode persistir por metros de profundidade em ambientes onde a drenagem é intensa.

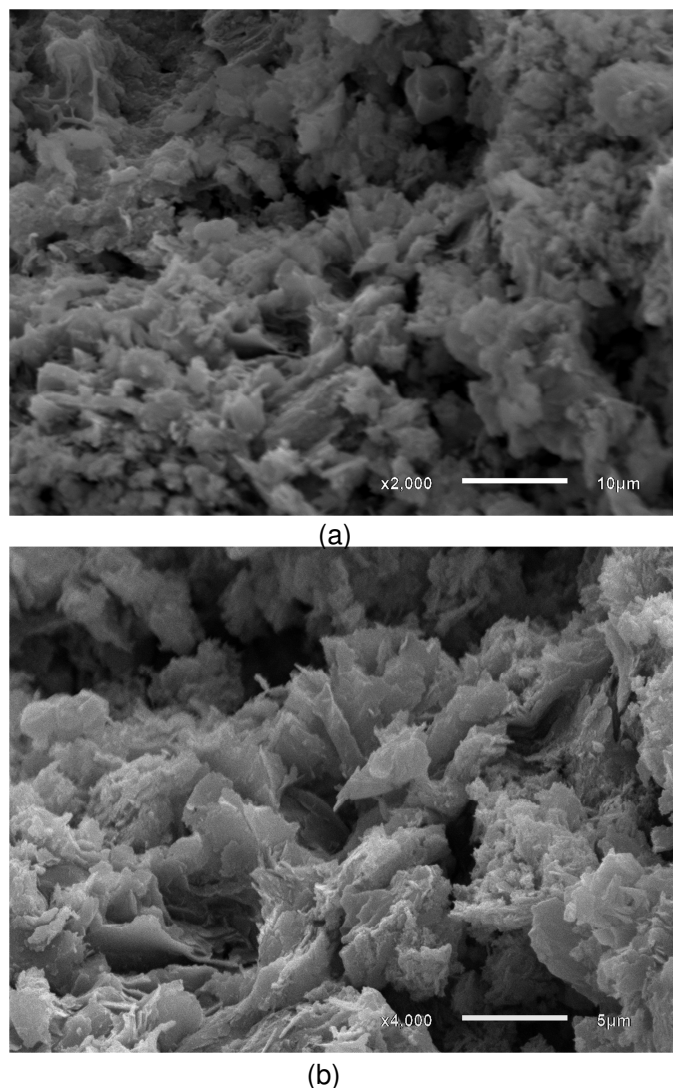


Figura 139 – Imagens obtidas com o MEV do solo residual de Tanguá (T) em diferentes escalas. (a) aumento de 2000 vezes e (b) aumento de 4000 vezes.

A Figura 140 apresenta uma imagem obtida no MEV do solo residual de Tanguá com a análise EDS de pontos de interesse. O potássio presente nas análises EDS's está relacionado ao k-feldspato em diversos graus de alteração, detectado nas análises de DRX. O silício e o alumínio podem ser provenientes tanto do k-feldspato, como da caulinita, ou ainda estarem em estado amorfo.

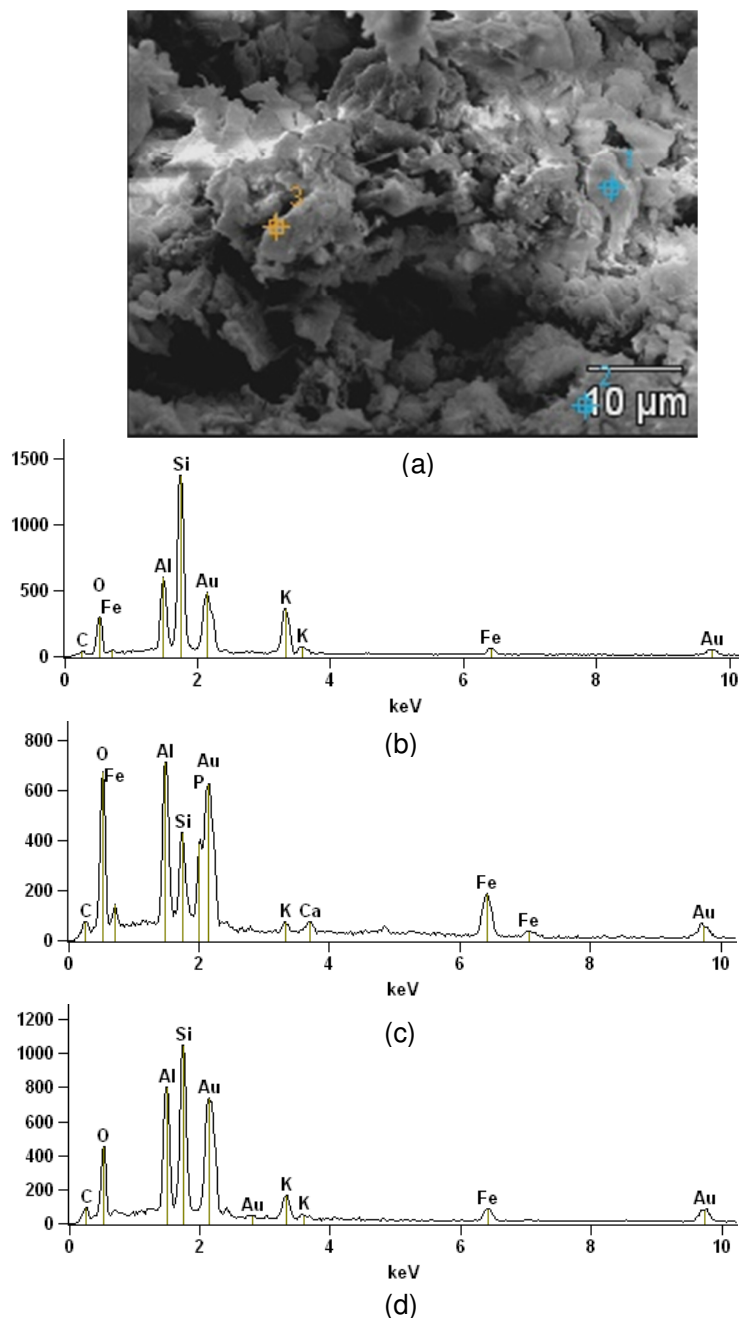


Figura 140 - a) Imagem da amostra natural do solo residual de Tanguá; (b), (c) e (d) são EDS's dos pontos 1, 2 e 3, respectivamente, indicados em (a).

6.4. Considerações Gerais

Neste capítulo foram apresentadas e discutidas as características dos solos residuais de migmatito de Duque de Caxias e do solo residual de rocha alcalina obtido no município de Tanguá-RJ.

Solos de Duque de Caxias

As diferenças entre os solos residuais provenientes de cada feição ficam evidentes nos resultados dos ensaios. Enquanto os solos oriundos da feição máfica apresentam valores de densidade relativa dos grãos típicos de solos ricos em biotita (2,8), os solos pertencentes à porção félsica possuem valores relacionados a solos oriundos de rochas quartzo-feldspáticas (2,6).

Ao comparar os solos de cada porção entre eles tem-se que, o solo residual DC01 (feição máfica) apresenta maior peso específico e menor índice de vazios que o solo DC02, sugerindo que o primeiro está menos alterado que o segundo. O solo DC05 apresenta características semelhantes ao solo DC02.

O solo residual DC03 (feição leucocrática) possui maior densidade e menor índice de vazios que o solo DC04, indicando menor grau de alteração do solo DC03. A mesma conclusão é obtida ao se avaliar tanto o teor de finos dos solos como a distribuição de poros. Nos resultados de porosimetria por injeção de mercúrio, para os solos mais intemperizados das duas porções (DC02 e DC04), tem-se um maior teor de finos, fruto da alteração dos minerais primários que, ao serem depositados nos macrovazios vazios, causam o aumento da microporosidade e a diminuição da macroporosidade, como observado. Este aumento de microporos e de teor de finos também é refletido nos valores do teor de umidade gravimétrica de saturação e de sucção de entrada de ar, que são maiores nos solos mais alterados das duas porções (DC02 e DC04).

Os ensaios de DRX também corroboram tanto para a distinção das duas porções como para indicar a diferença no grau de alteração dos solos da mesma porção. Enquanto os solos originados da feição melanocrática apresentam como mineral índice a biotita, os solos provenientes da feição leucocráticas têm o K-feldspato com esta função. A alteração da biotita em minerais secundários (caulinita, goethita e ilita) com o grau de alteração é evidente ao serem comparados os difratogramas dos solos residuais DC01, DC02 e DC05. O mesmo observa-se com o K-feldspato nos solos da feição leucocrática. A alteração dos minerais com o aumento do grau de intemperismo também é observada nas lâminas delgadas e na fração areia dos solos observados no

microscópio binocular. Os resultados de análise química refletem, da mesma forma, a diferença no grau de alteração de solos da mesma porção, com a concentração de alumina e lixiviação de sílica nos solos mais alterados.

Devido às diferentes características apresentadas dos solos residuais gerados em cada feição, pretendia-se avaliar o comportamento tensão-deformação-resistência de todos os solos, o que tornaria possível comparar a influência do processo de saturação em solos pertencentes ao mesmo perfil, mas com graus de alteração diferentes, assim como comparar solos com composições distintas. No entanto, devido à dificuldade em colocar em funcionamento o sistema de medição de variação de volume total do corpo de prova da prensa triaxial, apenas o solo residual DC02 foi submetido a ensaios de compressão triaxial. O mesmo foi selecionado por se apresentar homogêneo, possibilitando a obtenção de corpos de prova com características semelhantes, reduzindo assim a importância deste aspecto na análise dos resultados de resistência. Além disso, foi detectada a presença de agente cimentante.

Solo Residual de Rocha Alcalina (Tanguá)

O solo residual de rocha alcalina é formado pelos argilominerais caulinita, illita e pelos minerais primários K-feldspato, quartzo, em pouca quantidade. A fração fina é predominante, com a fração grosseira formada por concreções de caulinita e K-feldspato alterado.

O resultado de porosimetria por injeção de mercúrio indicou uma alta concentração de macroporos neste solo, evidentes na lâmina delgada observada na lupa binocular.

Fica evidente, principalmente nos resultados dos ensaios de MEV e na observação da lupa binocular, as diferenças estruturais entre o solo residual DC02 e este. Enquanto o solo residual de Duque de Caxias apresenta estrutura semelhante à definida por Vaughan (1988), com grãos ligados por cimentação, o solo residual de rocha alcalina (T) apresenta grande concentração de K-Feldspato alterado e minerais secundários que formam uma matriz silto-argilosa, sem serem evidenciados agentes cimentantes, o que pode fazer com que outros aspectos estruturais rejam o seu comportamento.