

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS**

THALISSON CESAR WIERTEL

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE AMOSTRAS DE SOLOS DA
REGIÃO DA SERRA DOURADA - GO**

**PONTA GROSSA
2024**

THALISSON CESAR WIERTEL

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE AMOSTRAS DE SOLOS DA
REGIÃO DA SERRA DOURADA - GO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências , área de concentração em Física, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências/Física

Orientador: Prof. Dr. André Maurício Brinatti

PONTA GROSSA

2024

Wiertel, Thalisson

W648 Estudo e caracterização mineralógica de amostras de solos da região da Serra Dourada - GO / Thalisson Wiertel. Ponta Grossa, 2024.
93 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Área de Concentração: Física),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. André Maurício Brinatti.

1. Unidade - conservação. 2. Serra dourada. 3. Solo - Textura. 4.
Mineralogia. 5. Muscovita. I. Brinatti, André Maurício. II. Universidade Estadual
de Ponta Grossa. Física. III.T.

CDD: 550

TERMO DE APROVAÇÃO

THALISSON CESAR WIERTEL

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE AMOSTRAS DE SOLOS DA REGIÃO DA SERRA DOURADA - GO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, no Programa de Pós-Graduação em Ciências, Área de Concentração em Física Ambiental, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE MAURICIO BRINATTI**
Data: 25/11/2024 11:35:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

Dr. André Maurício Brinatti – UEPG – Presidente

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO DA COSTA SAAB**
Data: 26/11/2024 19:49:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Sérgio da Costa Saab – UEPG – Titular

Documento assinado digitalmente
 **TANIA TOYOMI TOMINAGA**
Data: 25/11/2024 17:14:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr^a. Tania Toyomi Tominaga – UNICENTRO – Titular

Ponta Grossa, 25 de novembro de 2024.

Foi pensando nas pessoas que executei este projeto, por isso dedico este trabalho a todos aqueles a quem esta pesquisa possa ajudar de alguma forma.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que sempre me incentivaram e me deram forças, e que sem eles, nada disso teria sido possível. Estes que foram minha fortaleza durante todo o tempo, serei eternamente grato.

Ao meu orientador, e amigo, André Maurício Brinatti, que fez todo o esforço para que fosse possível concluir esta etapa.

Agradeço aos meus amigos que sempre me apoiaram durante todo esse período, em especial: Talula, Luiz Marcelo (Famoso LM), Marlon Schmidt, minha irmã Talita, Rafael (Rafão), Patrício, Lucas, Gabi, Lohane, Paulo, Conrado e Victor.

*“Vocês sabiam que o campo de futebol
aumentou em 16 metros?”
Vanderlei Luxemburgo*

RESUMO

A geodiversidade refere-se à variedade de elementos não vivos presentes na geosfera da Terra, abrangendo rochas, minerais, solos, formas de relevo e processos geológicos. A geoconservação tem como objetivo a preservação e gestão sustentável da geodiversidade, particularmente elementos de valor científico, educacional e estético excepcionais. Em nosso país temos importantes áreas de preservação, entre elas a do Parque Estadual da Serra Dourada (PESD). A Serra Dourada desempenha um papel importante no estudo da geomorfologia do Brasil, composta pelas rochas dos grupos Araxá, Serra da Mesa e Serra Dourada. Visto a importância de manter e preservar a Unidade de Conservação (UC) do PESD, uma vez que mantém informações importantes, como a mineralogia, que podem ser investigadas e contribuir na conservação e preservação da região, neste trabalho, estudamos e caracterizamos três perfis de solos oriundos da região: perfil V3, perfil V5 e perfil V8, cada um em duas profundidades diferentes. A intenção do estudo foi de fornecer subsídios sobre a composição mineral destes perfis, e corroborar com trabalhos anteriores devido a importância da preservação desta área. Assim, determinamos a densidade de partículas por Picnometria a Gás He, a textura do solo por análise granulométrica, a composição química elementar por Fluorescência de Raios X, a mineralogia de forma qualitativa por Espectroscopia de Infravermelho e Difração de Raios X, e aspectos morfológicos das partículas por Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo. E de acordo com a caracterização: o perfil V3, classificado como CAMBISSOLO, é composto de Gibbsita, Caulinita, Muscovita, Anatásio, Goethita, Calcita e Hematita, maior variedade de minerais; o perfil V5, classificado como NEOSSOLO, é composto por Muscovita, Caulinita, Gibbsita, Anatásio e Quartzo, e tem a proximidade dos percentuais granulométricos entre as profundidades; o perfil V8, também NEOSSOLO, ele apresentou predominantemente Muscovita e Quartzo, que são minerais primários, e sua classificação textural foi Areia, sem a presença de argila, sendo o solo menos intemperizado dentre os analisados. Por fim, este estudo e caracterização refletem a geodiversidade local e a influência das rochas do Grupo Araxá na formação do PESD.

Palavras-Chave: Unidade de Conservação, Parque Estadual da Serra Dourada, Textura do Solo, Mineralogia, Muscovita, Quartzo.

ABSTRACT

Geodiversity refers to the variety of non-living elements found in the Earth's geosphere, including rocks, minerals, soils, landforms, and geological processes. Geoconservation aims to preserve and sustainably manage geodiversity, mainly elements of exceptional scientific, educational, and aesthetic value. In Brazil, there are important conservation areas, including the Parque Estadual da Serra Dourada (PESD) (State Park of Serra Dourada). Serra Dourada plays an important role in the study of Brazil's geomorphology, which is characterized by rocks from the Araxá, Serra da Mesa, and Serra Dourada groups. Given the importance of maintaining and preserving the PESD Conservation Unit (CU), since it holds important information, such as mineralogy, which can be investigated and contribute to the conservation and preservation of the region, this research studied and characterized three soil profiles from the region, as follows: profile V3, profile V5, and profile V8, each at two different depths. The aim of this study was to provide information on the mineral composition of these profiles and to confirm previous studies due to the importance of preserving this area. Thus, we determined particle density using Helium Gas Pycnometry, soil texture by means of Granulometric Analysis, elemental chemical composition employing X-ray Fluorescence, qualitative mineralogy using Infrared Spectroscopy and X-ray Diffraction, and the morphological aspects of the particles by Scanning Electron Microscopy by Field Emission Gun. According to the characterization: profile V3 contains Gibbsite, Kaolinite, Muscovite, Anatase, Goethite, Calcite and Hematite, the largest variety of minerals; profile V5 is composed of Muscovite, Kaolinite, Gibbsite, Anatase and Quartz, and has similar granulometric percentages between depths; profile V8 presented predominantly Muscovite and Quartz, which are primary minerals. Sand was the element found in its textural classification, without the presence of clay, and this was the least weathered soil among those analyzed. Finally, this study and characterization reflect the local geodiversity and the influence of the rocks of the Araxá Group in the PESD formation.

Keywords: Conservation Unit, State Park of Serra Dourada, Soil Texture, Mineralogy, Muscovite, Quartz.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Triângulo textural, diagrama adotado pela SBCS para classificação textural do solo.	20
Figura 2.2 – Os 7 sistemas cristalinos e as 14 redes de Bravais.	22
Figura 2.3 – Ilustração dos tipos de hábito em relação à presença de faces.	23
Figura 2.4 – Alguns hábitos dos minerais em relação a formas.	24
Figura 3.1 – Representação esquemática dos modos de vibração das moléculas. A linha superior representa as três translações, a linha inferior representa as duas rotações e uma vibração.	27
Figura 3.2 – Resultados IV para amostras SUP e SUB, nas regiões: 4000 a 400 e 600 a 240 cm^{-1}	28
Figura 3.3 – Difrátogramas das amostras: SUP (a) e SUB (b), com indicativos das fases, minerais, encontradas.	31
Figura 3.4 – Interação da emissão de feixes de elétrons na superfície das amostras.	32
Figura 4.1 – Localização da área de estudo no Parque Estadual da Serra Dourada. Indicado também os pontos de interesse dos perfis analisados nesse trabalho, V3, V5 e V8.	34
Figura 4.2 – Detalhes do aparelho de determinação de densidade de partícula a gás He: a) porta amostra preenchido com 80 g de amostra; b) medida de pressurização do sistema com 17 Psi; c) Multipicnômetro <i>Quantachrome Instruments</i> MVP-D169-E.	35
Figura 5.1 – Resultados de IV, espectros de IV na região de 4000 a 400 cm^{-1} , para amostras do perfil V3 nas duas profundidades: (a) V3 4-60 e (b) V3 60+. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs) e Quartzo (Qz).	40
Figura 5.2 – Resultados da DRX, difratogramas na extensão em $2\theta = 5^\circ$ a $2\theta = 100^\circ$, para amostras do perfil V3 nas duas profundidades: (a) V3 4-60 e (b) V3 60+. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs), Hematita (Hem), Moscovita (Msc) e Quartzo (Qz).	41
Figura 5.3 – Micrografia da TFSA do perfil V3 4-60. Indicada na figura a região (a), com escala de $5\mu\text{m}$, e suas ampliações em pontos de destaque (b), com escala de $2\mu\text{m}$ e (c) com escala de $1\mu\text{m}$	43
Figura 5.4 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.3. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Al, Si, K, Fe, Ti, Mg e O.	44
Figura 5.5 – Micrografia da TFSA do perfil V3 4-60. Indicada na figura a região (a) com escala de $5\mu\text{m}$ e as suas regiões de destaque (b) com escala de $2\mu\text{m}$, (c) com escala de $1\mu\text{m}$ e (d) com escala de $1\mu\text{m}$	45

Figura 5.6 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.5. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Al, Si, Fe, K, Ti e O.	46
Figura 5.7 – Micrografia da TFSA do perfil V3 4-60. Indicada na figura a região (a) com escala de $5\mu\text{m}$, e as suas regiões de destaque (b) com escala de $1\mu\text{m}$ e (c) com escala de $1\mu\text{m}$	48
Figura 5.8 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.7. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, Ca, Ti, K e O.	49
Figura 5.9 – Micrografia da TFSA do perfil V3, V3 60+. Indicada na figura a região (a) com escala de $5\mu\text{m}$, e as suas regiões de destaque (b) com escala de $1\mu\text{m}$ e (c) com escala de $2\mu\text{m}$, e desta um destaque (d) com escala de $2\mu\text{m}$	50
Figura 5.10–Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.9. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Al, Si, Fe, Ti, K e O.	51
Figura 5.11–Micrografia da TFSA do perfil V3, V3 60+. Indicada na figura a região (a) com escala de $2\mu\text{m}$, e as suas regiões de destaque (b) com escala de $1\mu\text{m}$ e (c) com escala de $1\mu\text{m}$	53
Figura 5.12–Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.11. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Al, Si, Fe, K, Ti e O.	54
Figura 5.13–Resultados de IV, espectros de IV na região de $4000\text{ a }400\text{ cm}^{-1}$, para amostras do perfil V5 nas duas profundidades: (a) V5 0-15 e (b) V5 15-50. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs) e Quartzo (Qz).	57
Figura 5.14–Resultados de DRX, difratogramas na extensão em $2\theta = 5^\circ$ a $2\theta = 100^\circ$ para amostras do perfil V5 nas duas profundidades: (a) V5 0-15 e (b) V5 15-50. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs), Muscovita (Msc), Anatasio (Ant) e Quartzo (Qz).	58
Figura 5.15–Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 0-15. horizonte HA. Indicada na figura a região (a) com escala de $2\mu\text{m}$, e as suas regiões de destaque (b) com escala de $2\mu\text{m}$, (c) com escala de $1\mu\text{m}$ e (d) com escala de $1\mu\text{m}$	60
Figura 5.16–Mapeamento por EDS que contém a micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.15. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Al, Si, K, Fe, Mg e Ti.	61

Figura 5.17–Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 0-15. Indicada na figura a região (a) com escala de 10 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 5 μm , (c) com escala de 2 μm e (d) com escala de 1 μm a partir de (b).	62
Figura 5.18–Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.17. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, K, Fe, Mg, O e Ti.	63
Figura 5.19–Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 0-15. Indicada na figura a região (a) com escala de 10 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 2 μm , (c) com escala de 2 μm e (d) com escala de 2 μm	64
Figura 5.20–Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.19. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, K, Fe, O, Mg e Ti.	65
Figura 5.21–Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 15-50. Indicada na figura a região (a) com escala de 5 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 1 μm e (c) com escala de 1 μm	66
Figura 5.22–Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.21. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, K, O, Mg e Ti.	67
Figura 5.23–Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 15-50. Indicada na figura a região (a) com escala de 10 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 2 μm e (c) com escala de 5 μm	68
Figura 5.24–Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.23. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, K, O, Mg e Ti.	69
Figura 5.25–Resultados de IV, espectros de IV na região de 4000 a 400 cm^{-1} , para amostras do perfil V8 nas duas profundidades: (a) V8 3-10 e (b) V8 10-20. Legenda: Quartzo (Qz).	72
Figura 5.26–Resultados da DRX , difratogramas na extensão em $2\theta = 5^\circ$ a $2\theta = 100^\circ$ para amostras do perfil V8 nas duas profundidades (a) V8 3 a 10 e (b) V8 10 a 20. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs) e Quartzo (Qz).	73

Figura 5.27–Micrografia de MEV e mapeamento por EDS da amostra V8 3-10. Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados (Si, Al, Fe, K e O) no mapeamento por EDS e na coluna da esquerda a região com ampliação de 50 μm e abaixo a mesma região com o mapeamento por EDS. Os pontos marcados na micrografia localizam a região ocupada por um mineral: ponto vermelho – Quartzo, ponto preto – Muscovita.	75
Figura 5.28–Micrografia de MEV-FEG e mapeamento por EDS da amostra Areia 3-10 cm. Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados (Si, Al, Fe, K, O e Cs) no mapeamento por EDS e na coluna da esquerda a região com ampliação de 50 μm e abaixo a mesma região com o mapeamento por EDS. Os pontos marcados na micrografia localizam a região ocupada por um mineral: ponto vermelho – Quartzo, ponto preto – Muscovita.	77
Figura 5.29–Micrografia de MEV-FEG e mapeamento por EDS da amostra Areia 3-10 cm . Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados (Si, Al, O e K) no mapeamento por EDS e na coluna da esquerda a região com ampliação de 50 μm e abaixo a mesma região com o mapeamento por EDS. Os pontos marcados na micrografia localizam a região ocupada por um mineral: ponto vermelho – Quartzo, ponto preto – Muscovita.	79
Figura 5.30–Micrografia da TFSA da amostra V8 10-20. Indicada na figura a região (a) com escala de 100 μm e sua região de destaque (b) com escala de 20 μm . Os pontos marcados na micrografia acima localizam a região ocupada por um mineral: ponto vermelho – Quartzo, ponto preto – Muscovita.	81
Figura 5.31–Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na 5.30. Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados na região, a saber: Si, Al, O, K e Fe, e na coluna da esquerda a região mapeada e abaixo a esma região com o mapeamento por EDS.	82
Figura 5.32–Micrografia de MEV da amostra V8 10-20. (a) Micrografia da região com escala de 50 μm . (b) Região ampliada indicada em (a) com escala de 25 μm . Os pontos marcados na micrografia localizam a região ocupada por um mineral: ponto vermelho – Muscovita, ponto preto – Quartzo.	84
Figura 5.33–Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.32. Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados na região, a saber: Si, O e Al, e na coluna da esquerda a região mapeada e abaixo a esma região com o mapeamento por EDS.	85
Figura 5.34–Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (b) apresentada na Figura 5.32. Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados na região, a saber: Si, O e Al, e na coluna da esquerda a região mapeada e abaixo a esma região com o mapeamento por EDS.	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação e intervalo dos diâmetros das frações do solo em amostras da TFSA adotado neste trabalho, de acordo com a SBCS.	19
Quadro 2 – Parâmetros utilizados para determinar o tempo de sedimentação da fração silte na análise granulométrica.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da análise textural para as amostras do perfil V3 nas duas profundidades, V3 4-60 e V3 60+, e conforme classificação textural de SBCS. . . .	39
Tabela 2 – Resultados de FRX, dados em teores de elementos, porcentagem dos elementos, para amostras do perfil V3 nas duas profundidades: V3 4-60 e V3 60+. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs) e Quartzo (Qz). Elementos com teores abaixo de 0,5 % foram descartados.	40
Tabela 3 – Resultados da análise textural para as amostras do perfil V5 nas duas profundidades, V3 4-60 e V3 60+, e conforme classificação textural de SBCS.	56
Tabela 4 – Resultados de FRX, dados em teores de elementos, porcentagem dos elementos, para amostras do perfil V5 nas duas profundidades: V5 0-15 e V5 15-50. Elementos com teores abaixo de 0,5 % foram descartados.	56
Tabela 5 – Resultados da análise textural para as amostras do perfil V8 nas duas profundidades, V8 3-10 e V8 10-20, e conforme classificação textural de SBCS. .	70
Tabela 6 – Resultados de FRX, dados em teores de elementos, porcentagem dos elementos, para amostras do perfil V8 nas duas profundidades: V8 3-10 e V8 10-20.	71
Tabela 7 – Resultado da análise do mapeamento por EDS da região da Figura 5.27, amostra V8 3-10.	76
Tabela 8 – Resultado da análise quantitativa do mapeamento por EDS da região da Figura 5.28, amostra Areia 3-10cm.	77
Tabela 9 – Resultado da análise do mapeamento por EDS da região da Figura 5.29, amostra Areia 3-10cm.	80
Tabela 10 – Resultado da análise do mapeamento por EDS da região da Figura 5.30, amostra V8 10-20.	82
Tabela 11 – Resultado quantitativo da análise do mapeamento por EDS da região da Figura 5.34, amostra V8 10-20.	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	SOLOS E MINERAIS	18
2.1	Solo	18
2.1.1	Cambissolos, Neossolos e Material de Origem	20
2.2	Minerais	21
3	PRINCÍPIOS DAS TÉCNICAS UTILIZADAS	25
3.1	Picnometria a gás He	25
3.2	Análise Textural	26
3.3	Espectroscopia de Infravermelho	27
3.4	Raios X	29
3.4.1	Fluorescência de Raios X	29
3.4.2	Difração de Raios X	30
3.5	Miscroscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	Material de Estudo	33
4.2	Densidade de Partículas	34
4.3	Análise Granulométrica	35
4.4	Análise Elementar por Fluorescência de Raios X	36
4.5	Infravermelho por Transformada de Fourier	36
4.6	Difração de Raios X	37
4.7	Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	Resultado do perfil V3	38
5.2	Resultado do perfil V5	55
5.3	Resultado do perfil V8	70
5.4	Resultados Gerais	87
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

A geodiversidade refere-se à variedade de elementos não vivos presentes na geosfera da Terra, abrangendo rochas, minerais, solos, formas de relevo e processos geológicos. Não é influenciada apenas pelas dinâmicas naturais, mas também pelas intervenções humanas no ambiente, que podem levar à degradação, necessitando de medidas para seu uso racional e conservação. A geodiversidade também possui valor científico e educacional, servindo como base para a pesquisa geológica e contribuindo para a compreensão da história evolutiva do planeta (1).

A geoconservação foca na preservação e gestão sustentável da geodiversidade, particularmente elementos de valor científico, educacional e estético excepcionais. Visa implementar estratégias e mecanismos para proteger o patrimônio geológico e geomorfológico, enfatizando a importância dos geoparques como ferramentas para a proteção do patrimônio natural e o desenvolvimento local. O conceito de geoconservação foi sistematizado e disseminado globalmente após a criação da Lista Indicativa Global de Sítios Geológicos (GILGES) pela União das Ciências Geológicas em 1989 (1).

No Brasil, o conceito de geodiversidade está sendo desenvolvido simultaneamente a outros países, mas com um enfoque mais aplicado ao planejamento territorial, embora os estudos relacionados à geoconservação não sejam desprezados (2).

Neste contexto, temos em nosso país importantes áreas de preservação, entre elas está o Parque Estadual da Serra Dourada (PESD). Com área aproximada de 30.000 hectares, o PESD é uma área de preservação que possui vários atrativos e pontos de beleza cênica como cachoeiras, afloramentos rochosos e diversidade de cobertura vegetal e faunística, constituindo-se como um verdadeiro patrimônio ecológico para o Estado de Goiás. O parque foi criado em 1998 com o objetivo de proteger a geodiversidade local, através da criação da Área de Proteção Ambiental (APA). O PESD, localiza-se nos municípios de Cidade de Goiás, Mossâmedes e Buriti de Goiás, ficando a 131 km de Goiânia/GO. A região está compreendida na região do Planalto Central Brasileiro, e é caracterizada por um relevo levemente ondulado, com cristas e espigões formados por rochas menos intemperizadas. A primeira proposta para a criação do PESD teve lugar em 1998, fundamentada na proteção da geodiversidade local, através da criação da Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra Dourada. Em 2000, a área da APA da Serra Dourada foi ampliada e, no ano seguinte, foi promulgada uma lei que alterou o nome para APA Dr. Sullivan Silvestre (3). Assim, o objetivo da criação do PESD foi preservar as nascentes, os mananciais, a flora, a fauna e as belezas naturais, bem como controlar a ocupação do solo da região.

A Serra Dourada desempenha um papel importante no estudo da geomorfologia do Brasil, composta pelas rochas dos grupos Araxá, Serra da Mesa e Serra Dourada (4). O Grupo Araxá é composto principalmente por micaxistos e quartzitos, com a presença de corpos intrusivos granito-gnaissicos, como é o caso da Serra Dourada (5, 6).

Os micaxistos são rochas metamórficas foliadas, resultantes da transformação de sedimentos argilosos sob altas pressões e temperaturas. Eles apresentam uma estrutura foliada, com camadas finas e paralelas, devido à orientação preferencial dos minerais formadores, como as micas. Essa estrutura foliada confere ao micaxisto uma textura característica, com aspecto laminar.

Já os quartzitos são rochas sedimentares formadas a partir da compactação e cimentação de grãos de quartzo. São rochas muito duras e resistentes, com uma textura granular e uma cor geralmente clara, devido à predominância do mineral quartzo em sua composição. Os quartzitos possuem uma elevada resistência à erosão, tornando-se importantes elementos na formação de relevos mais elevados e proeminentes.

7 propôs um modelo morfológico onde a Serra Dourada é composta predominantemente por um embasamento litológico pertencente ao Grupo Araxá. 8 resume o Grupo Araxá descrevendo-o como composto principalmente por quartzito micáceo e micaxisto, incluindo variações como calcixisto, muscovita quartzo xisto, muscovita-clorita xisto, biotita granada xisto, estauroilita xisto e xisto feldspático. Já 5 definiu o Grupo Araxá como composto por principalmente minerais primários, como o quartzo, em grande concentração, e alguns secundários, como a muscovita e a biotita, em baixa concentração.

Como na Física estuda-se, em geral, interações de matéria e energia, a Ciência do Solo procura definir, medir e prever propriedades físicas, químicas, e o comportamento do solo e, mais especificamente, a Física do Solo trata o estado e movimento da matéria, o fluxo e transformação de energia, sendo portanto, uma ciência básica e aplicada (9).

Nesta perspectiva, a caracterização mineralógica do solo pode contribuir de forma significativa na avaliação dos solos em relação à classificação, conservação e preservação, por exemplo (10), as propriedades físicas e químicas dos solos sofrem influência direta principalmente dos seus constituintes minerais (11, 12). Análises realizadas pela técnica de Difração de Raios X (DRX) para o estudo e caracterização mineralógica é bastante comum em solos (13, 14).

Na intenção de auxiliar a utilização pública de maneira sustentável, no PESD, 15 trouxe aspectos físicos e morfológicos dos solos do PESD. No referido trabalho foi identificado uma fragilidade natural do ambiente à processos erosivos, além de predomínio de areia nas frações do solo da região. Isso indica que os solos da região são pouco intemperizados, pois ainda não houve formação de argilas, em grande parte.

Visto a importância de manter e preservar a Unidade de Conservação (UC) do PESD, uma vez que a região mantém informações variadas e importantes citadas anteriormente e que podem ser investigadas mais profundamente, neste trabalho analisamos três perfis de solos oriundos da região com a intenção de fornecer subsídios sobre a composição mineral destes pontos, também corroborar com trabalhos anteriores e reforçar a importância de se ter esta área preservada.

Portanto, temos como objetivo geral deste trabalho, caracterizar qualitativamente a composição mineral das amostras dos três perfis de solos. E para que este objetivo seja alcançado,

temos como objetivos específicos: realizar análises de caracterização física do solo; obter a composição química elementar de forma qualitativa; e estabelecer a composição mineral das amostras dos três perfis de solos.

2 SOLOS E MINERAIS

Neste capítulo, apresentamos noções básicas sobre solo sua definição, na perspectiva da física do solo, aspectos da textura e da densidade de partículas do solo, descrição em linhas gerais das duas classes dos solos estudados, e também sobre minerais, definição, aspectos morfológicos e características gerais dos minerais presentes na análise realizada no estudo.

2.1 Solo

O solo é um sistema bastante complexo e, por isso, sua definição depende do objetivo de seu estudo, de seu uso e de sua aplicação, ou seja, sua definição pode variar nas diferentes áreas de conhecimento (16, 17). Utilizaremos a definição de solo de acordo com a Física do Solo, uma vez que tal definição está em consonância com os propósitos do presente trabalho.

Nesta perspectiva, o solo é compreendido como uma camada superior da crosta terrestre que passa por diversos processos químicos, físicos e biológicos, ou seja, processos de intemperização, sendo que a série de processos ocorrem por longos períodos, centenas ou milhares de anos. É considerado um sistema trifásico heterogêneo, composto por três fases distintas: a fase sólida, conhecida como matriz do solo; a fase líquida, denominada solução do solo; e a fase gasosa, referente à atmosfera do solo. A fase sólida do solo é composta por componentes minerais e orgânicos, que variam em sua composição e arranjo (18, 9).

Durante a formação do solo, pedogênese, alguns minerais resistem mais as mudanças químicas e preservam suas características, estes são considerados primários, de outra forma, outros minerais, são mais reativos e se decompõem com o tempo, dando origem a argilominerais e outras formas reconstituídas, estes são considerados secundários (9). A transformação dos minerais é essencial para a formação de diversas frações minerais no solo, cada uma apresentando características específicas.

O solo é composto por minerais primários e secundários. Minerais primários, também conhecidos como minerais autógenos ou essenciais, são formados durante a cristalização do magma ou através de processos metamórficos. Eles são considerados os constituintes principais das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Exemplos comuns de minerais primários incluem feldspatos, quartzo, micas, olivina e piroxênios. Esses minerais são geralmente encontrados nas rochas em que se formaram originalmente e são característicos das condições geológicas específicas em que ocorreram (9).

Por outro lado, os minerais secundários, também chamados de minerais autigênicos ou formados posteriormente, são produtos de alteração ou transformação de minerais primários sob condições ambientais diferentes das quais se formaram originalmente. A alteração pode ocorrer devido à exposição à água, ar, temperatura e pressão diferentes. Os minerais secundários são comumente encontrados em solos e sedimentos, resultantes da decomposição e intemperismo de

rochas e minerais primários. Alguns exemplos de minerais secundários incluem óxidos de ferro, carbonatos, sulfatos e hidróxidos. Esses minerais podem apresentar cores, texturas e propriedades diferentes em comparação com os minerais primários de origem (19).

É importante ressaltar que a distinção entre minerais primários e secundários nem sempre é nítida, pois alguns minerais podem se formar em diferentes estágios e condições geológicas. Além disso, a presença de minerais secundários em uma rocha ou solo pode fornecer informações valiosas sobre as condições ambientais e os processos de alteração que ocorreram ao longo do tempo.

A parte mineral do solo é constituída por várias partículas individuais, com diferentes tamanhos, arranjos e composições. Essas partículas, com suas diferentes proporções, formam a Textura do Solo, enquanto o arranjo espacial dessas partículas dá origem à Estrutura do Solo (18).

A Textura do Solo é uma característica física fundamental e altamente estável que representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais com diâmetro inferior a 2 mm. Essas partículas são classificadas em três frações texturais, que podem variar de tamanho dependendo do sistema adotado, e são obtidas a partir de amostras de solos da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) ou Terra Fina Seca em Estufa (TFSE) (18). No presente estudo, utilizamos o sistema adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), apresentada no Quadro 1, e na Figura 2.1, apresentamos o triângulo textural, diagrama adotado pela SBCS.

Quadro 1 – Classificação e intervalo dos diâmetros das frações do solo em amostras da TFSA adotado neste trabalho, de acordo com a SBCS.

Frações	Diâmetro das partículas (μm)
Areia	2000-53
Silte	53-2
Argila	<2

Fonte: O autor.

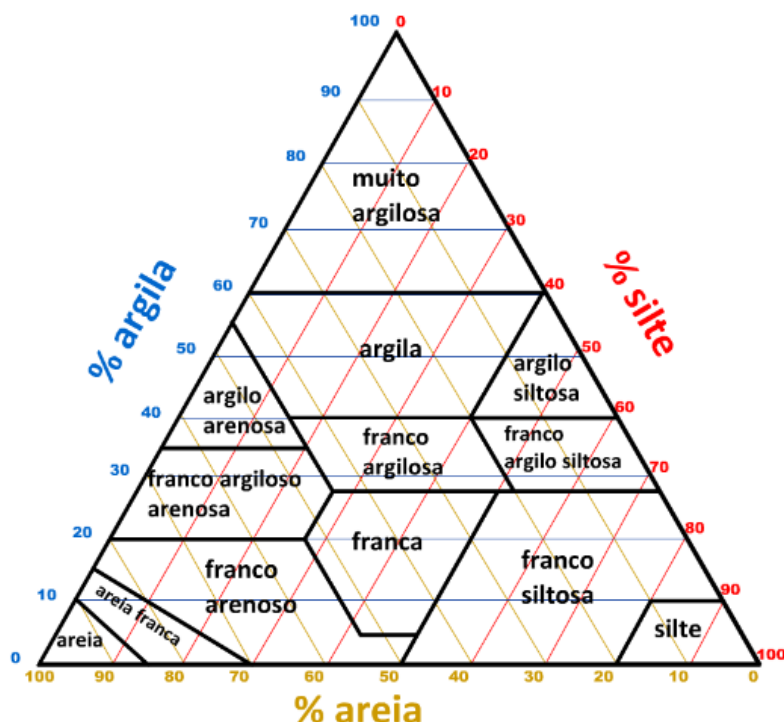
Destaca-se a presença da fração argila, partículas com tamanho menor que 2 μm , devido à sua grande atividade físico-química. No entanto, a fração mais grosseira das partículas também é importante, pois fornece indicadores sobre a reserva de nutrientes no solo. Portanto, a caracterização mineralógica do solo contribui para o entendimento de seu comportamento (21).

Outro aspecto de grande relevância é a densidade de partículas ou densidade dos sólidos, e que representa a relação entre a massa do solo seco em estufa e o volume real dos sólidos. Essa relação pode ser expressa por:

$$\rho_p = \frac{M_s}{V_s}, \quad (2.1)$$

onde ρ_p é a densidade de partículas do solo, M_s é a massa do solo seco e V_s é o volume dos constituintes sólidos do solo.

Figura 2.1 – Triângulo textural, diagrama adotado pela SBCS para classificação textural do solo.



Fonte: 20

2.1.1 Cambissolos, Neossolos e Material de Origem

Os três perfis de solos que estudamos neste trabalho fazem parte de duas classes de solos segundo 15 e que descrevemos a seguir de forma geral de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (2018) (SiBCS),

CAMBISSOLOS: definidos como um grupo de solos pouco desenvolvidos, com um horizonte B incipiente (Bi) com concentração maior da fração argila em relação aos horizontes subjacentes e textura franco-arenosa ou mais argilosa. A pedogênese desses solo são pouco avançadas, podem ser evidenciados pela estrutura, com alteração no material de origem expressa pela ausência da estrutura da rocha. Geralmente possuem uma coloração mais avermelhada e possuem conteúdos mais elevado de argila nos horizontes mais profundos. Cambissolos apresentam em sua composição mineral principalmente Quartzo e Caulinita, além de feldspatos e minerais amorfos sem forma cristalina definida (21).

NEOSSOLOS: definidos como solos pouco desenvolvido e extremamente rasos, onde o horizonte A está quase sobre a rocha. Com pedogênese pouco desenvolvida, ou seja, os processos pedogenéticos tiveram ação reduzida ou, ainda, por características inerentes ao material de origem, resistência ao intemperismo ou composição química, e do relevo, esses solos são considerados novos e sua composição é de praticamente minerais primários, já que sofreram pouco intemperismo (21, 22). Nesses solos é comum encontrar Quartzo, Micas como a Muscovita, além de minerais secundários como Goethita, Hematita e Gibbsita (23, 21).

Os material de origem dos três solos estudados neste trabalho são quartzito e micaxisto, sendo que o CAMBISSOLO tem ambos como materiais de origem e o Neossolo tem o quartzito como material de origem (15).

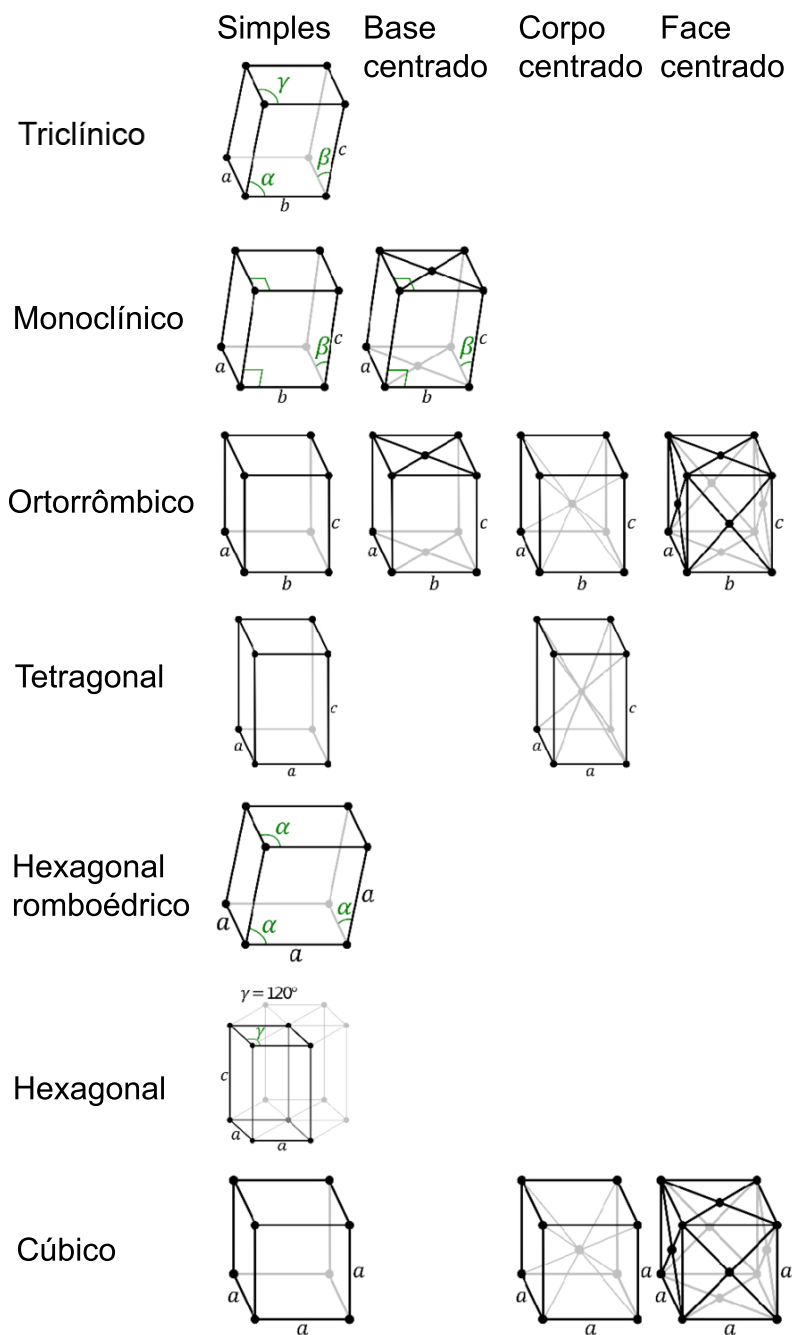
De maneira geral, a constituição mineral em quartzitos são: quartzo, mineral predominante, muscovita, biotita, granada, minerais acessórios comuns; e a constituição mineral em micaxistos são: muscovita, biotita e quartzo, minerais predominantes, granada entre outras, minerais acessórios comuns (24).

2.2 Minerais

Os minerais são materiais naturais que são formados por processos de pedogenesis. Eles possuem estrutura cristalina definida, organizada e que se repete de forma homogênea e periódica ao longo do material. Para a identificação, classificação e determinação dessas estruturas cristalinas é necessário conhecer pelo menos o tipo de cela unitária, parâmetros de rede e as posições dos átomos na cela (25).

A cela unitária representa a menor estrutura possível para um cristal, e sua repetição homogênea e periódica da origem à rede cristalina, que forma o cristal. Há 7 diferentes Sistemas Cristalinos: cúbico, tetragonal, ortorrômbica, romboédrica (ou trigonal), hexagonal, monoclinica ou triclínica. Nesses sistemas cristalinos há celas unitários de um único ponto, celas primitivas, e com um ponto adicional, ou mais, pontos que modificam o tipo de cela e resultam celas múltiplas. Assim há 14 redes, que são as redes de Bravais. Os parâmetros da cela unitária são: os comprimentos do eixo a , b e c e os ângulos formados entre estes eixos α , β e σ . Os 7 sistemas cristalinos e as 14 redes de Bravais, as celas primitivas e múltiplas, são apresentados na Figura 2.2 (26).

Figura 2.2 – Os 7 sistemas cristalinos e as 14 redes de Bravais.

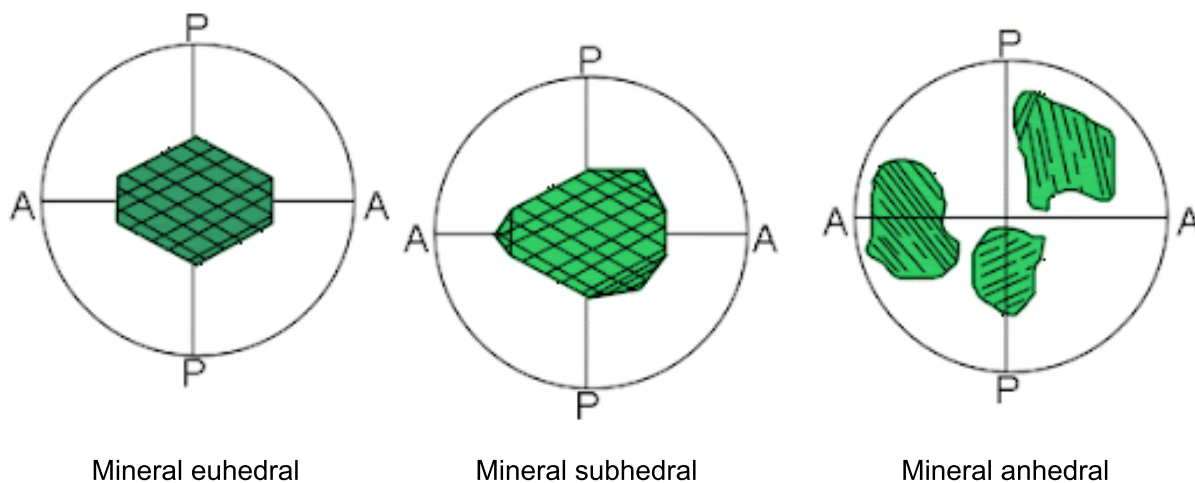


Fonte: Adaptado de 27.

Outra importante características dos minerais para se observar são os hábitos. Hábito é usado para descrever a forma externa de um cristal mineral, o agregado formado por esse mineral ou as faces formadas, que são o que definem o hábito. Ele pode refletir a estrutura interna do mineral, como um cubo, romboedro ou prisma. Além disso, o hábito também pode indicar irregularidades no crescimento do mineral, como uma forma capilar, fibrosa ou esqueliforme. O arranjo dos cristais pode influenciar o hábito, formando conjuntos como fibro-radial, geodo ou drusa. Em suma, o hábito mineral pode fornecer informações sobre a estrutura interna do mineral, seu modo de crescimento e o ambiente em que foi formado (28, 19).

Em relação às faces, são chamadas de: euhedral, quando é apresentado inteiramente pelas faces cristalinas; subhedral, quando é delimitado parcialmente pelas faces; e anhedral, aqueles que não apresentam faces definidas, conforme ilustrado na Figura 2.3.

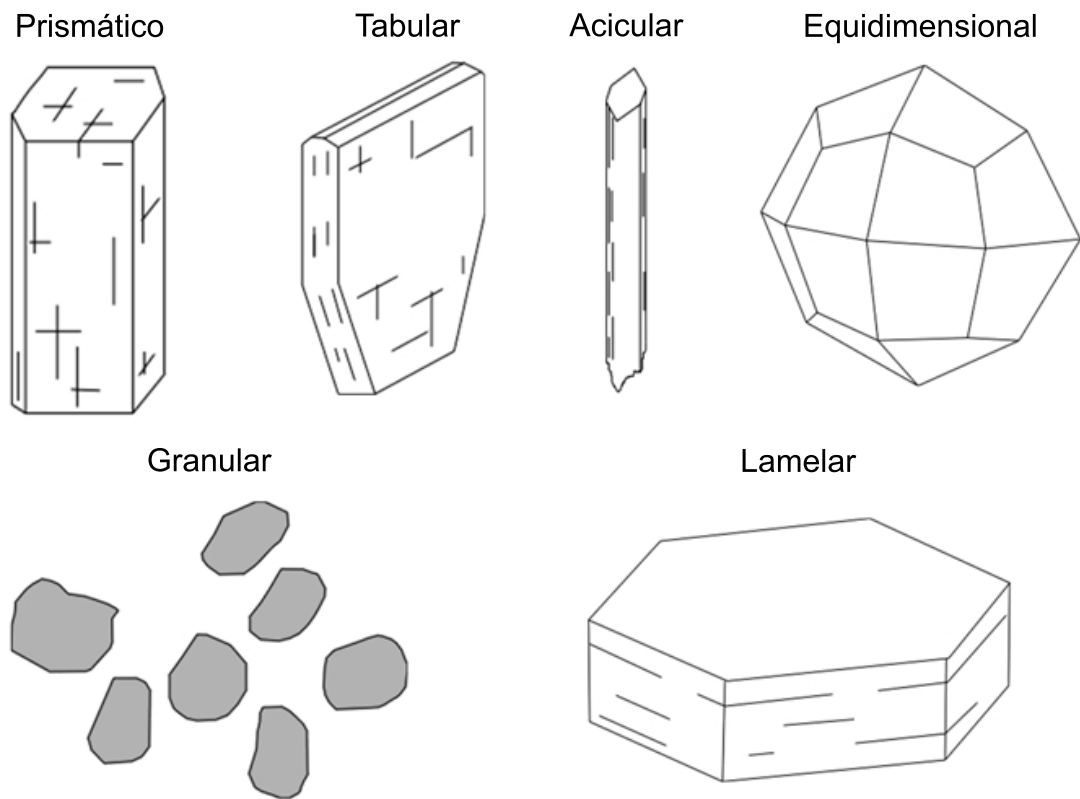
Figura 2.3 – Ilustração dos tipos de hábito em relação à presença de faces.



Fonte: Adaptado de 29.

Outro aspecto importante na caracterização dos hábitos dos minerais, é em relação ao seu formato. Os mais comuns são chamados de tabular, prismático, lamelar, acicular, equidimensional e granular, conforme ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Alguns hábitos dos minerais em relação a formas.



Fonte: Adaptado de 29.

3 PRINCÍPIOS DAS TÉCNICAS UTILIZADAS

Neste capítulo, apresentamos os princípios das técnicas utilizadas para obter os resultados descritos neste trabalho. As técnicas utilizadas foram: Picnometria a Gás He, Análise Textural, Espectroscopia de Infravermelho (IV), Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo (MEV-FEG).

3.1 Picnometria a gás He

Como vimos, de acordo com a equação 2.1, para a determinação da densidade de partículas, é necessário conhecer a massa do solo seco, que pode ser obtida por meio de uma balança de precisão, e o volume real dos constituintes sólidos e que, neste trabalho, foi determinado pela técnica de picnometria a Gás He.

A técnica de Picnometria a Gás He determina o volume real da amostra, por meio de um aparelho que contém duas câmaras de volume conhecido, conectados por uma válvula de expansão, identificadas por V_c , que é utilizada como porta amostra, e V_r , que permanece vazia e é utilizada como referência e para pressurização do sistema. Então com a expansão do gás He, pode-se determinar o volume da amostra V_s pela equação a seguir.

$$V_s = V_c - V_r \left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right), \quad (3.1)$$

De acordo com a equação 3.1, para realizar a técnica é necessário uma certa quantidade de amostra conhecida para preencher o porta amostra na câmara com volume V_c . O sistema é pressurizado com uma pressão P_1 , na câmara de referência de volume V_r e então é expandido o gás para a câmara com a amostra de volume V_c . Após isso é recomendável aguardar um tempo até o sistema se estabilizar, para obter uma medida mais precisa da pressão na câmara com a amostra. Assim obtemos a pressão P_1 e P_2 , e através da Equação 3.1 conseguimos obter o volume real da amostra que está no porta amostra. Com isso é possível obter a densidade de partícula ρ_p da amostra por meio da equação 2.1.

Para comparação foi calculada a diferença percentual entre os resultados das medidas feitas nesse trabalho com os obtidos por 15, onde foi calculado pelo método do balão volumétrico, pela seguinte equação:

$$\text{Diferença percentual} = \left| \frac{\rho_B - \rho_p}{\rho_B} \right| \times 100\% \quad (3.2)$$

onde ρ_B é a densidade de partícula obtida por Momoli et al. (2021) e ρ_p a densidade de partícula obtida nesse trabalho.

3.2 Análise Textural

A Textura do Solo é definida de acordo com a distribuição quantitativa das partículas presentes na TFSA de acordo com os diâmetros mostrados no Quadro 1. O método da pipeta é comumente utilizado para análise textural, envolvendo preparo da amostra, dispersão química e separação das frações por sedimentação (18). A areia é determinada por peneiramento e pesagem, enquanto argila e silte são separados por tempo sedimentação segundo a Lei de Stokes:

$$t = \frac{h \, 18 \, \eta_f}{D_p^2 \, g \, (\rho_s - \rho_f)}, \quad (3.3)$$

onde t é o tempo de sedimentação, h a altura de queda da partícula, η a viscosidade da água, D_p o diâmetro das partículas, ρ_s a densidade de partícula e ρ_f a densidade da água.

No método da pipeta para determinar o teor de argila em uma amostra de solo, começa-se fixando uma altura de queda h . A partir dessa altura, é possível separar uma fração alíquota do volume da suspensão que contém a amostra para obter posteriormente a massa da fração sólida, fração argila, correspondente à coluna de suspensão de altura h , que contém argila. Utiliza-se uma pipeta de volume fixo e conhecido para coletar a suspensão acima dessa altura h previamente definida e que corresponde ao volume da pipeta. Este procedimento permite a extração seletiva dos componentes mais finos, que se mantêm em suspensão por períodos mais longos. Após a coleta, a amostra é submetida à secagem em estufa. Em seguida, pesa-se a amostra seca para determinar a massa da argila presente na suspensão. Esse método, detalhado por (30), é amplamente utilizado devido à sua precisão e eficácia na quantificação do conteúdo argiloso no solo

Com a determinação das massas de areia e argila obtidas é possível calcular o teor de cada fração por meio das expressões a seguir:

$$T_{areia} = m_{areia} \times 50, \quad (3.4)$$

onde T_{areia} é o teor de areia em $g \, kg^{-1}$, e m_{areia} é a massa da areia seca (material retido na peneira),

$$T_{arg} = ((m_{arg} + m_{disp}) - m_{disp}) \times 1000, \quad (3.5)$$

onde T_{arg} é o teor de argila em $g \, kg^{-1}$, o termo $m_{arg} + m_{disp}$ é o material coletado pela pipeta seco, que corresponde a massa das partículas de argila mais a massa do dispersante e m_{disp} é a massa do dispersante,

$$T_{silte} = 1000 - (T_{areia} + T_{arg}) \quad (3.6)$$

então o teor de silte é obtido através das outras duas frações.

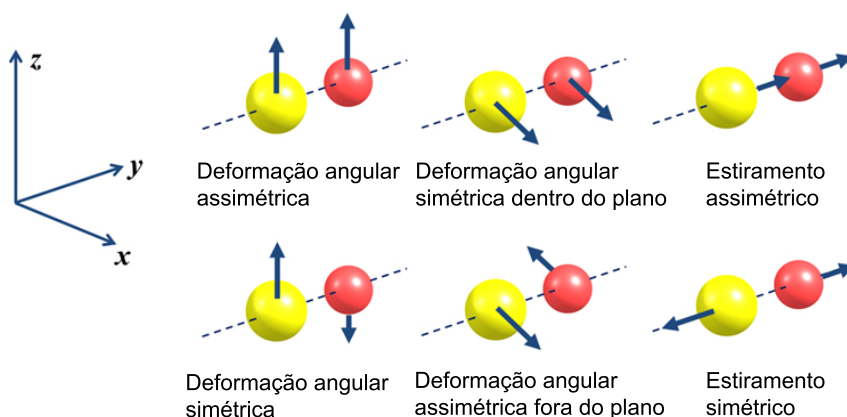
3.3 Espectroscopia de Infravermelho

A técnica de Espectroscopia de Infravermelho (IV) é baseada na Lei de Hooke, que estuda a força na deformação em um sistema massa mola, assim a ligação entre as moléculas é aproximada a um sistema massa mola (31). Desta maneira, a absorção da radiação infravermelha pela amostra leva a uma mudança nos estados energéticos vibracionais e rotacionais da amostra. Essas mudanças estão relacionadas às ligações químicas de uma molécula ou dos grupos moleculares e funcionais existentes na amostra (32).

Em uma temperatura acima do zero absoluto, todos os átomos estão em constante vibração, e a absorção de radiação infravermelha fornece informações intrínsecas sobre a estrutura da amostra. Para que essa vibração resulte na absorção da energia em IV é necessário que ocorra alteração no momento dipolar da molécula, causando variações na distribuição eletrônica ao redor das ligações (33). Esta variação, é essencial para que ocorra o acoplamento do campo elétrico gerado pela vibração com o campo magnético oscilante da radiação eletromagnética, esse acoplamento irá absorver um sinal de energia radiante (34). Assim, a frequência adequada para que ocorra a absorção é determinada pelas forças de ligações e a massa dos átomos (35).

Quando a radiação infravermelha incide na amostra, ela ressoa com a frequência de vibração característica de cada ligação, grupo molecular ou funcional, resultando em um aumento da amplitude de vibração (36). As vibrações das ligações químicas de uma molécula ou dos grupos moleculares e funcionais provocadas pela radiação de Infravermelho, podem ser de estiramento (deformação axial) ou de deformação angular (fora ou dentro do plano), elas também podem ser simétricas ou assimétricas, como ilustrado na Figura 3.1. A radiação Infravermelha absorvida é convertida em um modo vibracional peculiar de cada molécula (37, 38).

Figura 3.1 – Representação esquemática dos modos de vibração das moléculas. A linha superior representa as três translações, a linha inferior representa as duas rotações e uma vibração.



Fonte: Adaptado de 39

Os espectros de IV consistem em uma representação gráfica que correlaciona a inten-

tidade da absorvência (A) ou transmitância (T) com a energia da radiação de IV, expressa em número de onda (ν), normalmente em cm^{-1} (40). A transmitância (T) é definida como a razão entre a intensidade transmitida pela amostra e a intensidade incidente sobre ela. Esta relação pode ser expressa pela fórmula:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

onde I é a intensidade da radiação transmitida e I_0 é a intensidade da radiação incidente.

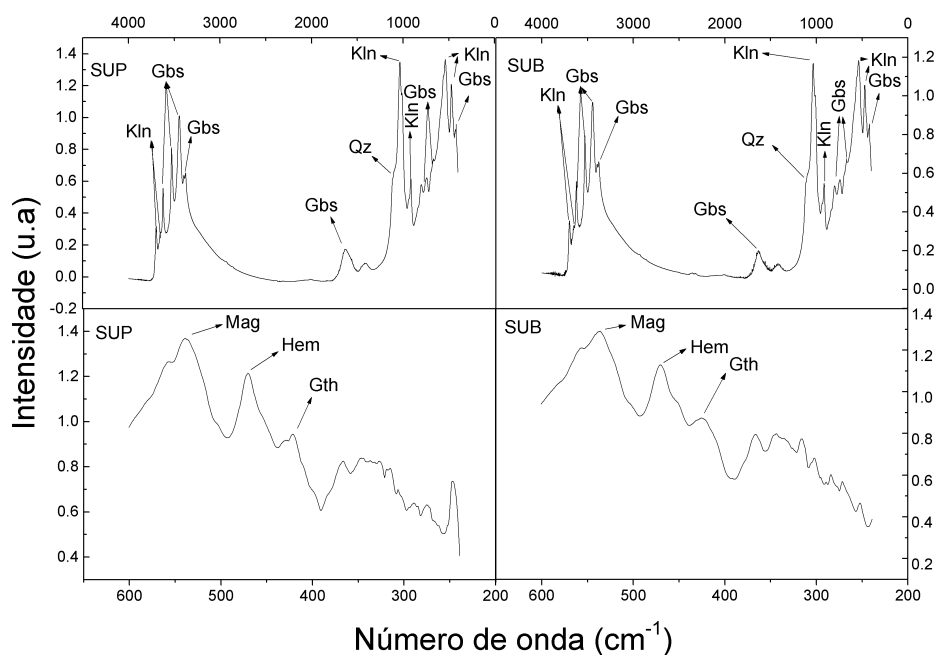
Por outro lado, a absorvência (A) está relacionada à transmitância por meio da seguinte expressão:

$$A = -\log(T)$$

Cada modo vibracional das ligações químicas leva a um espectro característico, que permite a identificação qualitativa de cada molécula ou mineral presente na amostra. Minerais como quartzo, calcita e dolomita, por exemplo, apresentam espectros de infravermelho distintos que podem ser utilizados para identificá-los em amostras de solo ou rocha (41). Além disso, a espectroscopia de infravermelho tem a vantagem de ser uma técnica não destrutiva, permitindo a análise de amostras preciosas sem a necessidade de alterá-las ou consumi-las (37).

Para exemplificar a técnica será apresentado na Figura 3.2 o resultado de 42 onde foi estudado um solo de Joviânia - GO, identificado como um Latossolo Vermelho, e coletado em duas profundidades diferentes: 0 a 20 cm (SUP) e 20 a 40 cm (SUB).

Figura 3.2 – Resultados IV para amostras SUP e SUB, nas regiões: 4000 a 400 e 600 a 240 cm^{-1} .



Fonte: 42.

Tem-se na parte superior da figura os espectros de IV nas regiões: de 4000 a 400 cm^{-1} ; e de 600 a 240 cm^{-1} na parte inferior; onde também são indicadas as regiões de vibrações de ligações químicas de uma molécula ou dos grupos moleculares relativos aos minerais, estes indicados de forma abreviada, de acordo com 43.

A partir dos resultados do IV é possível identificar indicativos dos seguintes minerais: Caulinita (Kln); Gibbsita (Gbs); Goethita (Gth); Magnetita (Mag); Quartzo (Qz); e Hematita (Hem); Pois estes foram os modos de vibrações característicos encontrados nessa amostra.

3.4 Raios X

O processo de produção de raios X é complexo e envolve várias etapas, incluindo a geração de elétrons acelerados, a focalização desses elétrons em um alvo e a detecção da radiação resultante. Os equipamentos utilizados para produzir raios X incluem tubos de raios X e aceleradores de partículas (44).

Atualmente, os Raios X são produzidos em tubos que consistem em um filamento metálico de tungstênio, por exemplo, e quando aquecido emite elétrons em alta velocidade que colidem com um alvo também metálico como molibdênio, ferro, cobre, cobalto, etc, provocando a excitação, ou seja, mudança orbital, ou desaceleração dos elétrons do alvo, produzindo a radiação de Raios X que produz o espectro contínuo e característico do metal utilizado como alvo (21).

Diversas técnicas de raios X são utilizadas na área acadêmica para a caracterização de materiais. Essas técnicas permitem a análise de estrutura cristalina, composição química, textura, densidade e outras propriedades dos materiais de forma não destrutiva (45).

Entre as técnicas mais utilizadas estão a difração de raios X e a fluorescência de raios. A difração de raios X é amplamente utilizada para determinar a estrutura cristalina de materiais, sendo útil para identificação de compostos e análise de defeitos cristalinos (46). Já a fluorescência de raios X é empregada na análise de composição química de materiais, podendo fornecer uma análise semiquantitativa a respeito da composição química do material (47).

3.4.1 Fluorescência de Raios X

A FRX é baseada nas medidas de intensidade dos raios X característicos emitidos pelos elementos constituintes de uma determinada amostra e permite determinar sua composição química elementar (48, 49).

O princípio é promover a emissão de radiações com fontes de Raios X, tendo como alvo a amostra que está sendo analisada, quando incidido os Raios X na amostra, ela reemite radiações de diferentes energias, estas energias são características de cada elemento presentes na amostra e são identificadas pelos detectores (50).

Quando os Raios X incidem sobre a amostra, ocorre a transição de elétrons, resultando na ejeção de um elétron da camada e criando uma vacância que será preenchida por um elétron de outra camada, devido à diferença de energia. Durante essa transição, ocorre a liberação de radiação com energias características específicas para cada elemento.

A técnica pode ser utilizada no modo de espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDSXRF do inglês, *energy dispersive spectroscopy X-ray fluorescence*) que consiste em incidir a radiação de Raios X na amostra, excitando os elementos constituintes, e a radiação emitida é coletada e separada nas energias das diferentes radiações características de cada elemento por meio de um detector de dispersão de energia combinado com um analisador multicanal, e no modo de espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de onda (WDSXRF do inglês, *wave dispersive spectroscopy X-ray fluorescence*) que, da mesma maneira da anterior, consiste em incidir a radiação de raios X na amostra, excitando simultaneamente todos os elementos presentes e emitindo radiações características, e essas radiações são difratadas por cristais e captadas por um detector em diferentes comprimentos de onda (48, 49).

3.4.2 Difração de Raios X

Na técnica de difratometria de Raios X, a amostra é exposta aos raios X que são difratados de acordo com a Lei de Bragg, dada a seguir:

$$n\lambda = 2d_i \sin(\theta), \quad (3.7)$$

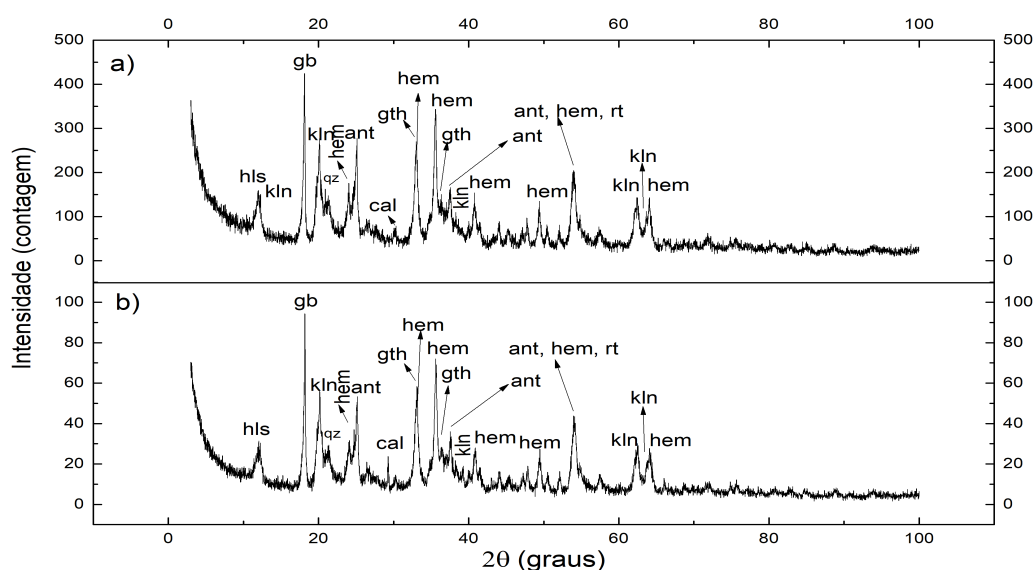
onde: n é um número natural, que representa a ordem de difração da onda; λ é o comprimento de onda da onda incidente; d_i é a distância entre os planos atômicos; e θ é o ângulo de incidência em relação ao plano considerado.

Vale ressaltar que a difração ocorre somente quando os raios X difratados pelos planos de rede interferem construtivamente, o que significa que a diferença de percurso desses raios deve ser um múltiplo inteiro do comprimento de onda

Nos minerais temos uma variedade de distâncias entre os planos de rede, que são os planos atômicos constituídos de átomos da rede e, consequentemente, das celas unitárias. Essas distâncias são da ordem de grandeza dos Raios X, Angstroms, e por esse motivo que o fenômeno da difração ocorre nos minerais ou em qualquer material cristalino. Desta maneira, podemos identificar os minerais presentes na amostra porque cada mineral apresenta várias distâncias entre planos de rede bem definida e características.

De maneira a exemplificar a caracterização qualitativa por meio da técnica, citamos 51 onde realizou a caracterização da argila de um Latossolo Vermelho em duas profundidades: 0 a 20 cm (SUP) e 20 a 40 cm (SUB). Apresentamos na Figura 3.3 o resultado com a indicação de minerais encontrados de acordo com seus picos de difração relacionados aos vários planos de rede. Para essa análise qualitativa, onde foi encontrado os seguintes minerais: Kln, Gbs, Qz, Hem, Gth, Anatasio (Ant), Rutilo (Rt), Halóisita (Hls) além da Calcita (Cal).

Figura 3.3 – Difratomogramas das amostras: SUP (a) e SUB (b), com indicativos das fases, minerais, encontradas.



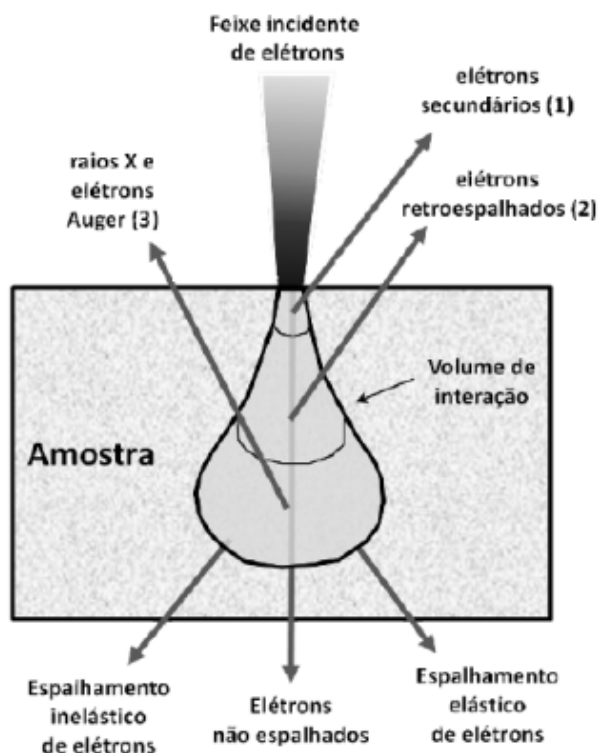
Fonte: 51.

3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo

O uso de técnicas de microscopia é fundamental para a análise detalhada da morfologia, forma e tamanho das partículas presentes em amostras de solo. Essas técnicas permitem uma compreensão da composição mineralógica e das propriedades físicas do solo e de seus minerais constituintes. No contexto deste estudo, o uso dessas técnicas microscópicas é fundamental para auxiliar na identificação dos minerais constituintes, por meio de observação das formas e hábitos característicos desses minerais conhecidos (52).

A técnica de microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG, do inglês, *Field Emission Gun*) é uma técnica avançada de imagem que utiliza um feixe de elétrons para obter imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Através de um canhão de elétrons o feixe é incidido na superfície da amostra, e a interação do feixe incidido tem como resposta a emissão de elétrons secundários, retroespalhados, Auger e de raios X, conforme a Figura 3.4 (53).

Figura 3.4 – Interação da emissão de feixes de elétrons na superfície das amostras.



Fonte: 54.

Os elétrons secundários são produzidos quando os feixes incidentes colidem com a superfície das amostras, tendo baixa energia e fornecendo informações sobre a superfície. Já os elétrons retroespalhados são feixes que sofreram colisões elásticas e possuem alta energia, fornecendo informações sobre a morfologia e composição do material. Os elétrons Auger e raios X são gerados a partir da emissão dos elétrons secundários, permitindo a identificação dos elementos presentes. Esses sinais são captados e utilizados para formar imagens, geralmente com a ajuda de um cintilador que reproduz a morfologia em um aspecto tridimensional (54).

Além de produzir imagens de alta resolução, a MEV-FEG também permite a análise química da superfície da amostra. Isso é possível através de EDS. Os elétrons secundários e retroespalhados, fornecem informações sobre a superfície da amostra, e possuem baixa energia (54). Assim é possível obter a análise de EDS das imagens geradas por mapeamento.

A MEV-FEG tem uma ampla gama de aplicações em áreas científicas e industriais, desempenhando um papel crucial na caracterização de materiais, estudos de estrutura e propriedades de superfícies, análise de falhas, desenvolvimento de novos materiais e muito mais. É uma ferramenta essencial na ciência dos materiais, geologia, biologia, engenharia, ciência forense, nanotecnologia e em outras áreas relacionadas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, iniciamos com a descrição geral dos três perfis de solos analisados e a preparação das amostras. Em seguida, apresentamos os métodos, cuja fundamentação foi explorada no capítulo anterior, e suas respectivas condições específicas de análise empregadas para: a caracterização física do solo, Densidade de Partículas e Análise Granulométrica; a composição química elementar de forma qualitativa, por Fluorescência de Raios X; e a composição mineral qualitativa, por Infravermelho por Transformada de Fourier, Difração de Raios X e Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo.

4.1 Material de Estudo

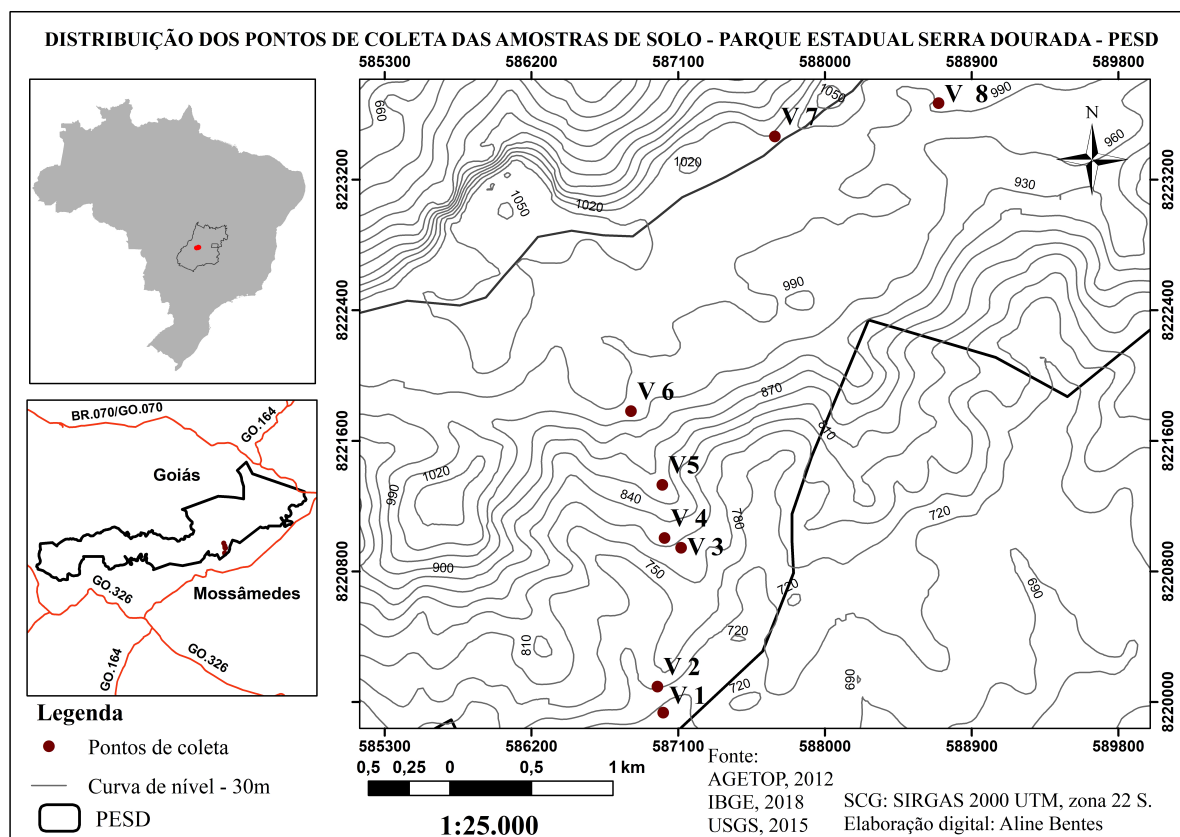
Neste trabalho, foram estudadas amostras de três perfis de solos de diferentes pontos do PESD e que foram indicados e denominados por V3, V5 e V8, Especificamente, o perfil V3 foi estudado em dois horizontes: Bi1, com profundidade de 4 a 60 cm, e Bi2, com profundidade superior a 60 cm; o perfil V5 foi estudado nos horizontes: A, com profundidade de 0 a 15 cm, e C, com profundidade de 15 a 50 cm; o perfil V8 nos horizontes: A1, com profundidade de 0 a 10 cm, e C, profundidade de 10 a 25 cm, sendo que este último perfil corresponde a uma antiga área de mineração de areia denominada Areal, conforme 15. Estas amostras fazem parte de um conjunto de amostras oriundas de oito perfis de solos do PESD e que foram coletadas e analisadas inicialmente por 15. Estes autores realizaram análises de classificação de solos, composição granulométricas, densidade de partículas, entre outras e também descreveram sua localização, topografia e litologia dos dos oitos solos do PESD (15). Na Figura 4.1 é mostrada a área de estudo do trabalho de 15 indicando também os pontos os Perfis V3, V5 e V8 foram coletados, no PESD.

Inicialmente, foram preparadas amostras da TFSA, e conforme descrito anteriormente, são as porções do solo que contém partículas menores que 2 mm do solo e são secas ao ar livre ou em estufa de ventilação forçada a 40°C (FONTANA, et al., 2017). Cada amostra de TFSA foi obtida diretamente do material coletado em campo, ou seja, foi preparada para os 3 perfis de acordo com seus respectivos horizontes e profundidades. A preparação foi por meio de tamisação em peneiras com malhas de 2 mm, da marca Bertel, com o diâmetro de 30 cm. Após a tamisação do material coletado em campo, a porção peneirada foi levada a estufa, da marca Nova Ética, para secagem por aproximadamente uma semana, com temperatura de 40 °C em sistema com ventilação forçada para que o processo de secagem seja semelhante a uma secagem natural evitando queima de matéria orgânica e preservando o material mineral. Por fim, obteve-se as amostras de TFSA de cada horizonte dos três perfis e que foram mantidas em dissecador para evitar que elas ficassem úmidas. No total, foram obtidas seis amostras de TFSA.

Todo o preparo foi realizado no Laboratório do Grupo de Física Aplicada a Solos e

Ciências Ambientais (FASCA) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

Figura 4.1 – Localização da área de estudo no Parque Estadual da Serra Dourada. Indicado também os pontos de interesse dos perfis analisados nesse trabalho, V3, V5 e V8.



Fonte: 15

4.2 Densidade de Partículas

A determinação da densidade de partículas foi realizada para cada amostra de TFSA. A análise foi feita em triplicata, sendo que em cada análise da triplicata foram feitas 10 medidas, ou seja, 10 repetições, totalizando 30 medidas de cada amostra. Para cada triplicata foram necessários 80 g de amostra que foram acomodadas em porta amostra cilíndrico do próprio aparelho e a pressão inicial foi ajustada para 17 psi, na câmara de referência. O mesmo procedimento foi empregado para todas as amostras.

As análises foram realizadas no Laboratório Físico-Químico da UEPG, e o aparelho utilizado e o Multipicnometro da marca *Quantachrome Instruments*, do modelo MVP-D160-E. A figura 4.2 apresenta o porta amostra com uma amostra de TFSA, o medidor de pressão do gás em seu modo de utilização e o aparelho utilizado propriamente.

Figura 4.2 – Detalhes do aparelho de determinação de densidade de partícula a gás He: a) porta amostra preenchido com 80 g de amostra; b) medida de pressurização do sistema com 17 Psi; c) Multipicnômetro *Quantachrome Instruments MVP-D169-E*.



Fonte: o Autor.

4.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada em triplicata para os três perfis V3, V5 e V8 em seus respectivos horizontes e profundidades e foi de acordo com o método da pipeta, descrito na seção 3.2. Inicialmente, foi preparada uma suspensão de 20 g de amostra em um béquer de 300 mL, contendo 100 mL de água destilada e 10 mL de solução dispersante NaOH 1 mol/L (solução de hidróxido de sódio: 39,997 g/L) deixando em reação por pelo menos 12 horas. Após deixar a suspensão em repouso reagindo, a suspensão foi transferida para um béquer de 500 mL, acrescentando água destilada até completar o volume de 300 mL. Então, é posto em banho de gelo e agitado no ultrassom Vibra-Cell (da marca Sonic) durante cinco minutos na potência de 10 W. Esse processo é necessário para auxiliar na desagregação das partículas menores impregnadas em partículas maiores, recebendo energias vibracionais em torno de 2,5 a 3 kJ. Conforme mencionado anteriormente, os diâmetros estabelecidos para o tamanho de partículas estão indicados no Quadro 1 e estão de acordo com a classificação da SiBCS.

Após agitação a suspensão é tamisada em peneira de malha de 53 μm , e com o auxílio de um pulverizador com água destilada é realizado a lavagem do material retido na peneira, com cuidado de não ultrapassar o volume de 1 L pelo material não retido na peneira. O material retido na peneira é a fração areia, que é então armazenado em placa de Petri de massa conhecida e levado para secagem, após a secagem é possível determinar o peso real da fração areia.

O material não retido na peneira, contendo a fração silte e argila, é transferido para uma proveta com volume de 1 L, se a suspensão não for suficiente para completar o volume da proveta é necessário que complete com água destilada. Com a altura necessária para o volume equivalente de 50 mL determinado na proveta é calculado o tempo de sedimentação através da Lei de Stokes, equação 3.3, apresentado anteriormente. Os parâmetros utilizados para o cálculo

do tempo de sedimentação estão no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros utilizados para determinar o tempo de sedimentação da fração silte na análise granulométrica.

Altura H equivalente a 50 mL na proveta	1,6 cm	
Viscosidade da água de acordo com a temperatura	Temperatura (°C)	Viscosidade (g cm ⁻¹ s ⁻¹)
	16	0,01111
	17	0,01082
	18	0,01056
	19	0,0103
	20	0,01005
	21	0,00981
	22	0,00958
	23	0,00936
	24	0,00914
	25	0,00894
Aceleração da gravidade no Município de Ponta Grossa	978 cm/s ²	
Valor do diâmetro de transição entre argila e silte	0,0002 cm	
Densidade do fluido/líquido	1 g/cm ³	

Fonte: O autor.

4.4 Análise Elementar por Fluorescência de Raios X

Neste trabalho foi utilizado apenas a técnica de EDS para a análise elementar pela FRX. O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia EDX-720 da marca *Shimadzu*, do laboratório FASCA/UEPG.

A análise foi realizada no modo qualitativo, semi-quantitativo, em duas faixas de energia, para investigar energias relativas aos diferentes elementos, de Na a Sc (5 kV) e Ti a U (50 kV), com tempo de 100 segundos para cada intervalo, total de 200, no modo atmosfera.

Para esta técnica foi realizado medidas em triplicata dos três perfis locais, e seus respectivos horizontes e profundidades. O material é inicialmente macerado, para que as partículas do material sejam inferiores a 45 μm . Após isso é levado para medição no aparelho.

Para a análise é utilizado porta amostra do próprio equipamento, películas de poliéster (da marca *Mylar*) de 6 μm de espessura na parte do fundo do porta amostra, então as amostras são colocadas sob essa película de forma que preencha todo o fundo do porta amostra. Na parte superior é colocado papel filme preso por um anel e perfurado com pequenos furos para evitar o espalhamento do material no interior do equipamento por que a amostra está em forma de pó.

4.5 Infravermelho por Transformada de Fourier

A medida foi realizada no C-Labmu/UEPG, as amostras foram preparadas em forma de pastilhas e analisadas pelo *IRPrestige-21 DRS-800*, da marca *Shimadzu*. As pastilhas de FTIR foram preparadas com 2 mg da amostra com 100 mg de brometo de potássio KBr, prensadas no

molde a 60 kN durante 1 minuto. As medidas foram feitas em triplicatas para todos os perfis locais e seus respectivos horizonte e profundidades.

As medidas foram realizadas no modo absorbância, na resolução de 2 cm^{-1} , 128 varreduras e diferentes lentes (*beam splitter*) para diferentes intervalos, sendo de 4000 a 400 cm^{-1} e 600 a 240 cm^{-1} .

4.6 Difração de Raios X

A medida foi realizada no C-Labmu/UEPG pelo difratômetro *Ultima IV* da marca *Rigaku*, pelo método do pó. Para a DRX foi feita apenas uma repetição de cada amostra, sendo essas amostras maceradas para obter as partículas de $45\text{ }\mu\text{m}$.

As medidas foram feitas com radiação de $\text{Cu } K\alpha_1$ ($\lambda = 1,5406\text{ }\text{\AA}$), na extensão de $2\theta_i = 3,00^\circ$ a $2\theta_f = 100,00^\circ$, voltagem de 30 kV, 100 mA, fenda de divergência = 1° , divergência horizontal: 10 mm, espalhamento = 1° , recepção: 0,15 mm; no modo de varredura passo a passo, com passo de $0,02^\circ$ com tempo de amostragem de 5 s, na extensão: 3° a 100° . Após a análise é iniciada a análise qualitativa do difratograma, onde são indexados os picos de difração correspondentes a cada mineral de acordo com dados da literatura.

A indexação é a análise qualitativa dos difratogramas onde são identificados os minerais presentes por meio dos picos de difração, ou seja, pela comparação do perfil de difração com o respectivo padrão de difração de cada mineral encontrado na literatura Resende 2005. Em geral, analisa-se pico a pico, identifica-se sua respectiva posição em 2θ , que é dividido por 2 e obtém-se a posição em θ , é possível determinar o valor da distância entre os planos, d , e identificar o mineral referente ao pico. A análise inicia-se observando os 3 picos de difração mais intensos do difratogramas e os 3 picos de difração mais intensos de cada fase, com base em Resende2005, porém nem todos são observados pois pode haver sobreposições entre os picos dos diferentes minerais.

4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo

As amostras são levadas ao metalizador/pulverizador modelo SC7620, da marca *Quorum*, para ser revestida em ouro, o revestimento é realizado duas vezes por 180 segundos, total de 6 minutos, e a metalização ocorreu à vácuo sob pressão de 2 mbar e analisado no MEV-FEG modelo MIRA3, da marca *Tescan*, do C-labmu/UEPG.

As amostras foram secadas na estufa a 40°C para secagem por 24 horas e levadas ao C-labmu/UEPG para análise. Esse procedimento foi feito para a fração TFSA de todas as amostras dos perfis locais e seus respectivos horizontes e profundidades.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentamos os resultados e as respectivas discussões para os três perfis analisados. Perfil V3, Perfil V5 e Perfil V8. Lembrando que eles foram analisados em profundidades diferentes, ou seja, duas amostras de cada perfil, totalizando seis amostras.

De acordo com Momoli et al. (2021) o perfil V3 foi classificado como um Cambissolo, enquanto os pontos V5 e V8 foram classificados como Neossolos Litólicos. Além disso, minerais como a Muscovita, Clorita, Biotita e Quartzo que ocorrem nas rochas metamórficas da Serra Dourada, podem ser encontrados nos solos formados na região (5).

5.1 Resultado do perfil V3

A densidade de partículas determinada pelo método da Picnometria a Gás He para as amostras do perfil V3 indicaram valores de: $2,629 \pm 0,004 \text{ g/cm}^3$ para V3 4-60 e $2,686 \pm 0,003 \text{ g/cm}^3$ para V3 60+, com uma densidade média de $2,658 \pm 0,004 \text{ g/cm}^3$, considerando as duas profundidades. Em comparação, 15 encontraram o valor médio de densidade de partículas de $2,55 \text{ g/cm}^3$ considerando as duas profundidades, amostras V3 4-60 e V3 60+.

Ao analisar os resultados observamos que os valores de densidade de partícula que obtivemos pelo método da Picnometria a Gás He são ligeiramente superiores aos determinados por 15. A diferença percentual entre os valores médios considerando as duas profundidades é de 4,3 %. Esses valores indicam uma variação pequena, mostrando que os resultados são coerentes entre si e que métodos diferentes podem apresentar pequenas discordâncias, mas ainda convergem para valores próximos.

Essa variação nos resultados pode ser atribuída às diferenças nos métodos de medição utilizados. 15 empregaram o método do balão volumétrico com álcool etílico, enquanto no presente trabalho foi utilizado a técnica de Picnometria a Gás He. Esse, apresenta maior precisão, uma vez que o gás He é capaz de preencher o espaço vazio entre as partículas sólidas do solos, por menores que sejam de maneira mais eficiente, proporcionando uma medição do volume das partículas sólidas com menor erro. Além disso, o método da Picnometria a Gás He tem um mínimo de manuseio da amostra durante o processo de medição, em contrapartida, o método do balão volumétrico é consideravelmente maior.

A análise textural realizada para amostras das duas profundidades, V3 4-60 e V3 60+, que apresentamos na Tabela 1, indicou que as amostras tem texturas franco argilosas e argilosas, resultado que está de acordo com o SiBCS, uma vez que os Cambissolos apresentam o horizonte Bi com textura franco-arenosa ou mais argilosa. E esses resultados quando comparados com a classificação realizada por 15, que descreveu ambos os horizontes como tendo textura argilosa, apresentam convergência. A diferença na classificação textural da amostra pode ser atribuída a diferença entre os métodos, ou critérios, empregados na análise, a saber: para preparar a

suspensão de solo, usamos um ultrassom, que geralmente não é usado em preparações para a análise textural e cuja as condições foi descrita anteriormente; para o determinar o tempo de sedimentação das partículas usamos a Lei de Stokes com a densidade de partículas que foi determinada pela técnica da picnometria de gás He e geralmente em rotinas de laboratório são usadas o valor de densidade de $2,65 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 1 – Resultados da análise textural para as amostras do perfil V3 nas duas profundidades, V3 4-60 e V3 60+, e conforme classificação textural de SBCS.

Amostra	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação
V3 4 – 60	32,7	32,5	34,8	Franco argilosa
V3 60+	22,8	34,4	42,8	Argila

Fonte: O autor.

Na Tabela 2, apresentamos os resultados da FRX para amostra das duas profundidades, V3 4-60 e V3 60+. Nestes resultados notamos grande predominância dos elementos Al, Si e Fe que são elementos comumente encontrados em Quartzitos. Além desses elementos, há também a presença de K e Ti que apresentam teores consideráveis acima de 1%, e que são comuns de se encontrar em Micas.

Notamos também que os teores de elementos foram próximos entre as duas profundidades, indicando que a sua composição mineral é similar, independentemente da profundidade, resultado que é coerente devido ao fato do perfil V3 ser da classe dos Cambissolos e estes são solos pouco desenvolvidos e rasos e contêm horizonte Bi com pouca diferença ou com diferenças marcantes entre profundidades subsequentes desse horizonte, ou seja, a composição química e mineralógica é bastante uniforme entre as profundidades do respectivo horizonte (21). Vale reforçar que as duas amostras são oriundas do mesmo horizonte Bi, conforme apresentado por 15.

Na Figura 5.1 mostramos os espectros de IV para amostras das duas profundidades, V3 4-60 e V3 60+, e as bandas de vibração identificadas para Caulinita, Gibbsita e Quartzo. Estes minerais são esperados nessas amostras, pois os resultados da FRX apresentaram teores significativos dos elementos Si e Al, os quais são elementos fazem parte da composição química na estequiometria ideal: da Caulinita que contém Si e Al, da Gibbsita que contém Al, e Quartzo que contém Si.

Os difratogramas de raios X das duas amostras, mostrados na Figura 5.2, revelam a identificação da maioria dos picos da DRX, dos minerais correspondentes. A análise dos dois difratogramas indica a presença dos mesmos minerais encontrados na análise de IV anterior, a saber: Gibbsita, Caulinita e Quartzo. Além destes, pela análise também identificamos a presença de Moscovita, Anatásio, Calcita, Goethita e Hematita. Estes minerais que não foram identificados por IV pode ser devido a sobreposição dos minerais presentes, onde acaba evidenciado apenas as bandas de vibrações dos minerais que apresentam maior quantidade na amostra e ou de apresentarem bandas de vibração em regiões de menor número de onda (36).

A identificação desses minerais está de acordo com os resultados da análise de FRX, pois

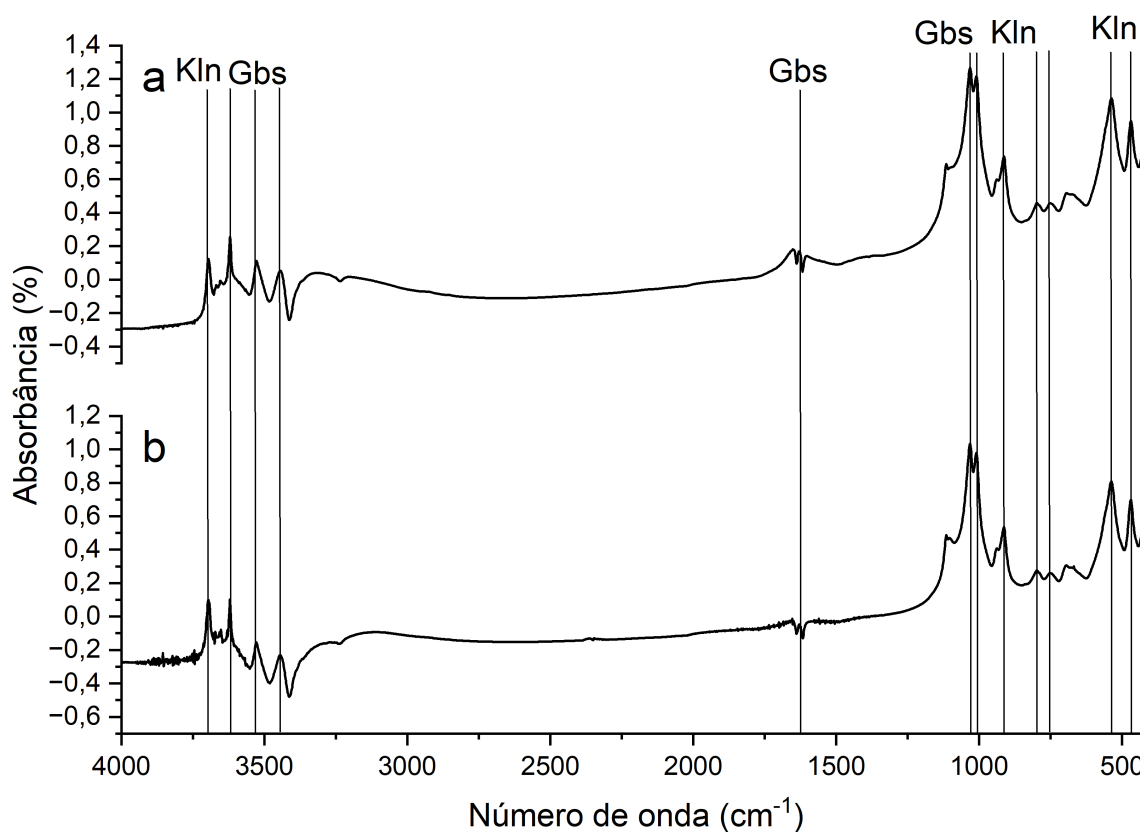
todos esses minerais contêm os elementos que foram detectados em quantidades significativas. A presença de Anatásio, um óxido de Ti, na análise de DRX justifica a quantidade significativa de Ti detectada na análise de FRX. Assim, o uso das técnicas de DRX, IV e FRX confirma a presença destes minerais, uma vez que puderam ser identificados e associados pelas três técnicas.

Tabela 2 – Resultados de FRX, dados em teores de elementos, porcentagem dos elementos, para amostras do perfil V3 nas duas profundidades: V3 4-60 e V3 60+. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs) e Quartzo (Qz). Elementos com teores abaixo de 0,5 % foram descartados.

Elementos	V3 4-60		V3 60 +	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Al	40,3	0,2	40	2
Si	31,8	0,5	31	1
Fe	23,7	0,5	24,9	1,0
K	2,40	0,02	2,09	0,04
Ti	1,54	0,02	1,53	0,04

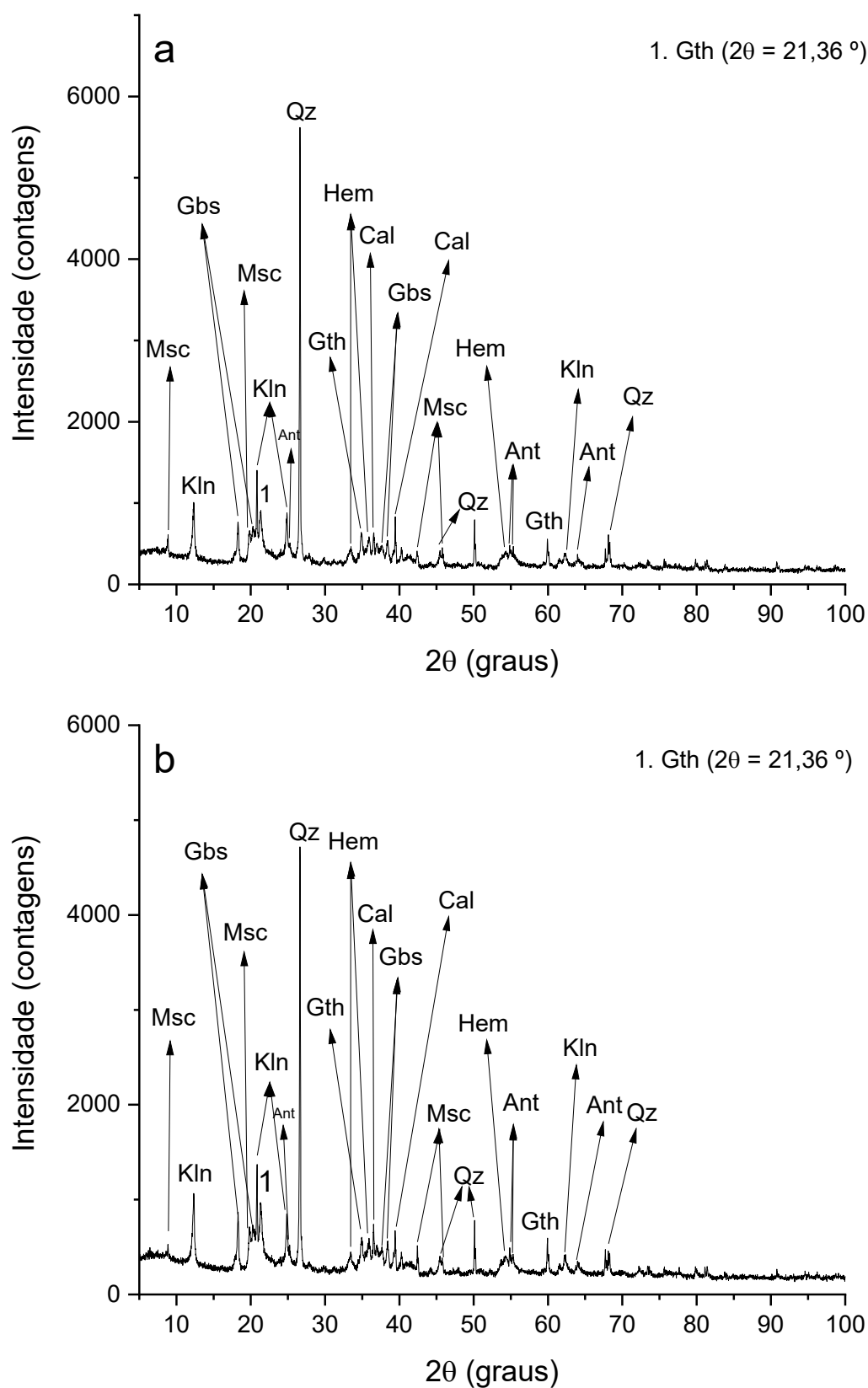
Fonte: O autor.

Figura 5.1 – Resultados de IV, espectros de IV na região de 4000 a 400 cm^{-1} , para amostras do perfil V3 nas duas profundidades: (a) V3 4-60 e (b) V3 60+. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs) e Quartzo (Qz).



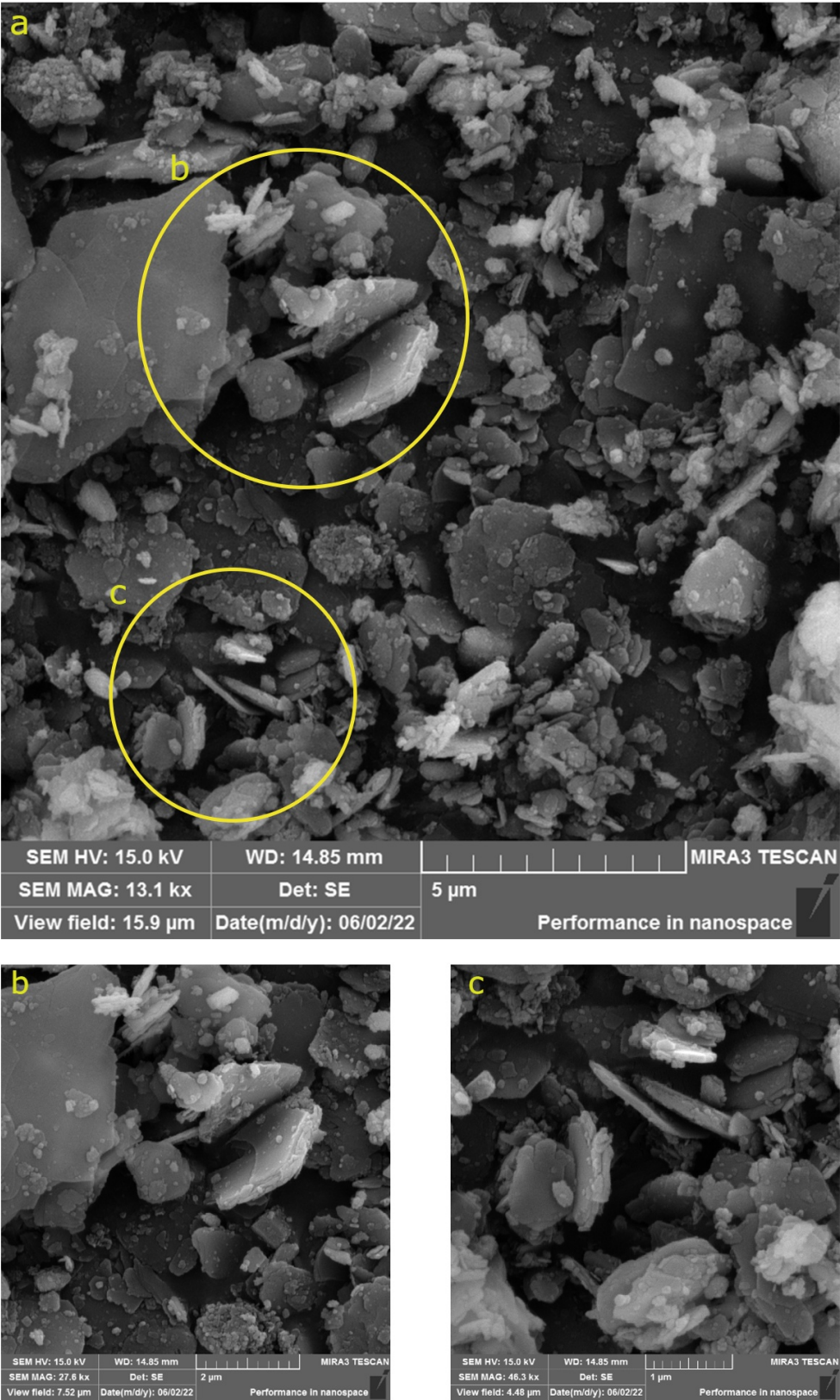
Fonte: O autor.

Figura 5.2 – Resultados da DRX, difratogramas na extensão em $2\theta = 5^\circ$ a $2\theta = 100^\circ$, para amostras do perfil V3 nas duas profundidades: (a) V3 4-60 e (b) V3 60+. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs), Hematita (Hem), Moscovita (Msc) e Quartzo (Qz).



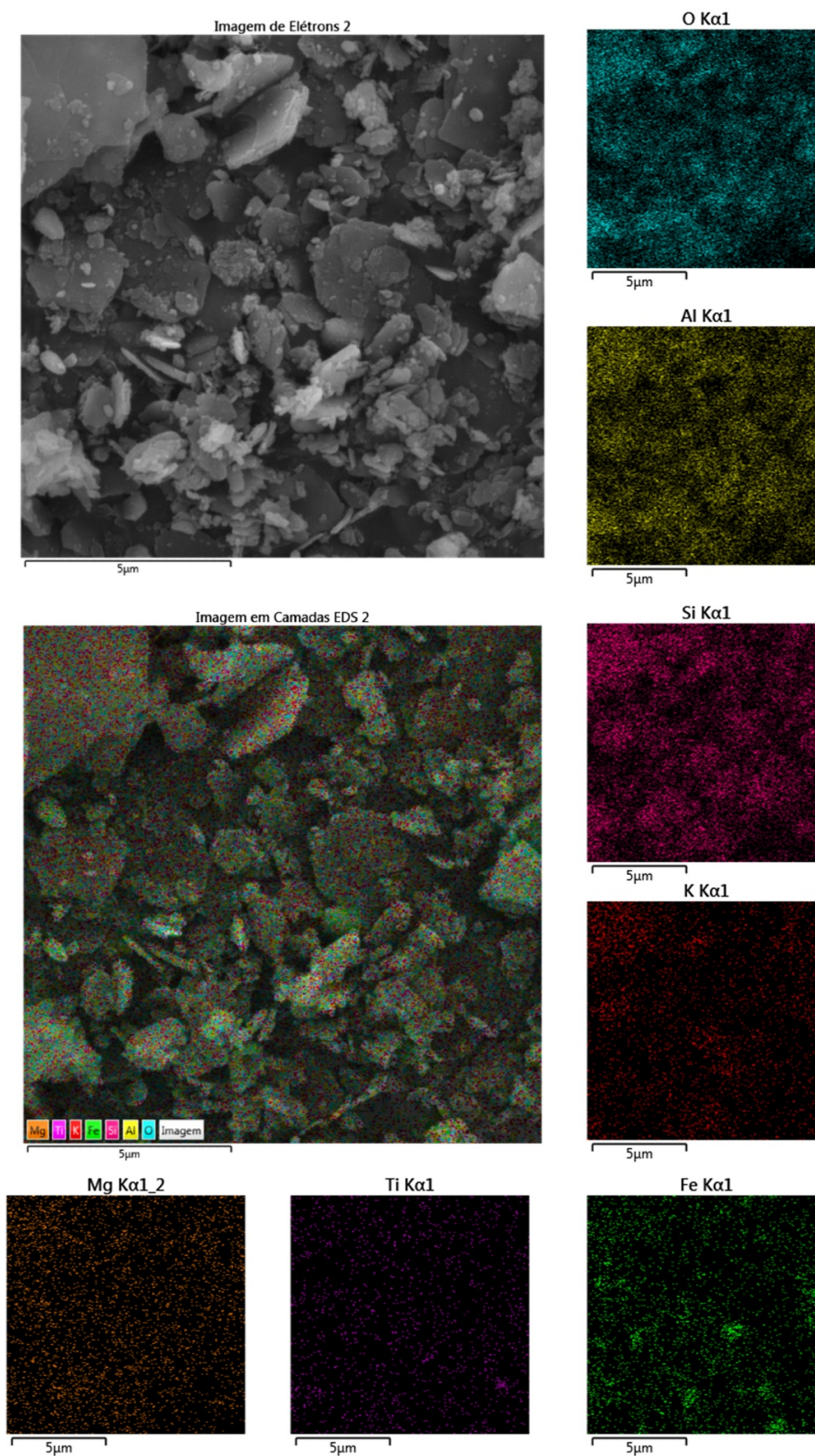
Nas Figuras 5.3, 5.5, 5.7, 5.9 e 5.11, apresentamos as micrografias obtidas por MEV, para análise da morfologia da amostra em estudo, e nas Figuras 5.4, 5.6, 5.8, 5.10 e 5.12 apresentamos os resultados do mapeamento por EDS, uma técnica complementar que auxilia na análise da composição elementar da região da respectiva morfologia analisada.

Figura 5.3 – Micrografia da TFSA do perfil V3 4-60. Indicada na figura a região (a), com escala de 5 μ m, e suas ampliações em pontos de destaque (b), com escala de 2 μ m e (c) com escala de 1 μ m.



Fonte: O autor.

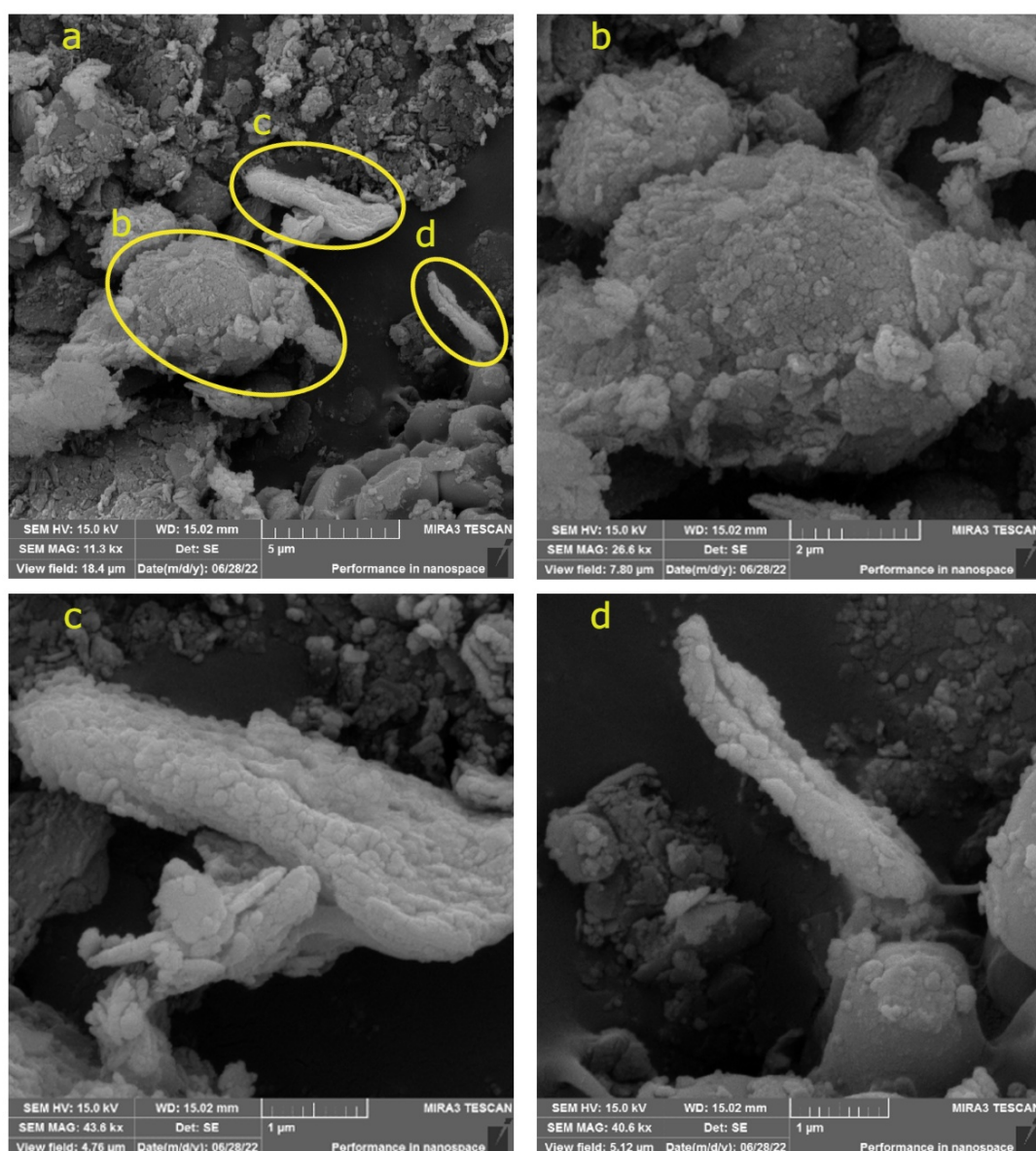
Figura 5.4 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.3. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Al, Si, K, Fe, Ti, Mg e O.



Fonte: O autor.

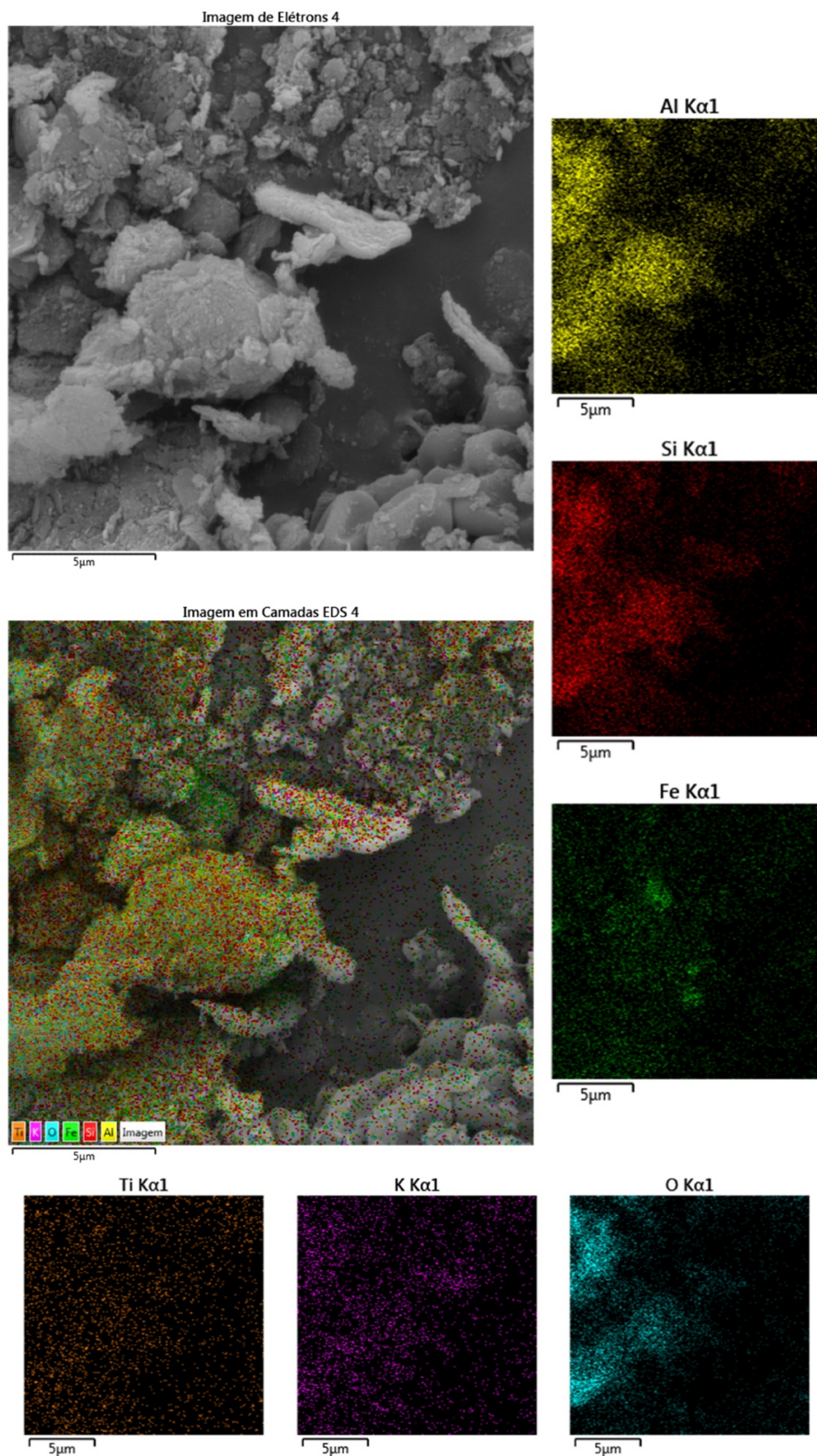
Na micrografia, mostrada na Figura 5.3 (b), observamos corpos com hábito lamelar. Notamos que esse corpo apresenta faces cristalinas definidas e pelo mapeamento por EDS, na Figura 5.4, identificamos predominantemente Al, Si e K na região indicada na Figura 5.3 (b). Com base nos elementos destacado e no hábito lamelar observado, características de minerais do grupo das Micas (55), podemos indicar a presença da Muscovita nessa amostra. Além dos elementos citados anteriormente, também foi encontrado Fe, Ti e Mg, esses elementos também foram identificados na FRX e estão de acordo com os resultados anteriores.

Figura 5.5 – Micrografia da TFSA do perfil V3 4-60. Indicada na figura a região (a) com escala de $5\mu\text{m}$ e as suas regiões de destaque (b) com escala de $2\mu\text{m}$, (c) com escala de $1\mu\text{m}$ e (d) com escala de $1\mu\text{m}$.



Fonte: O autor.

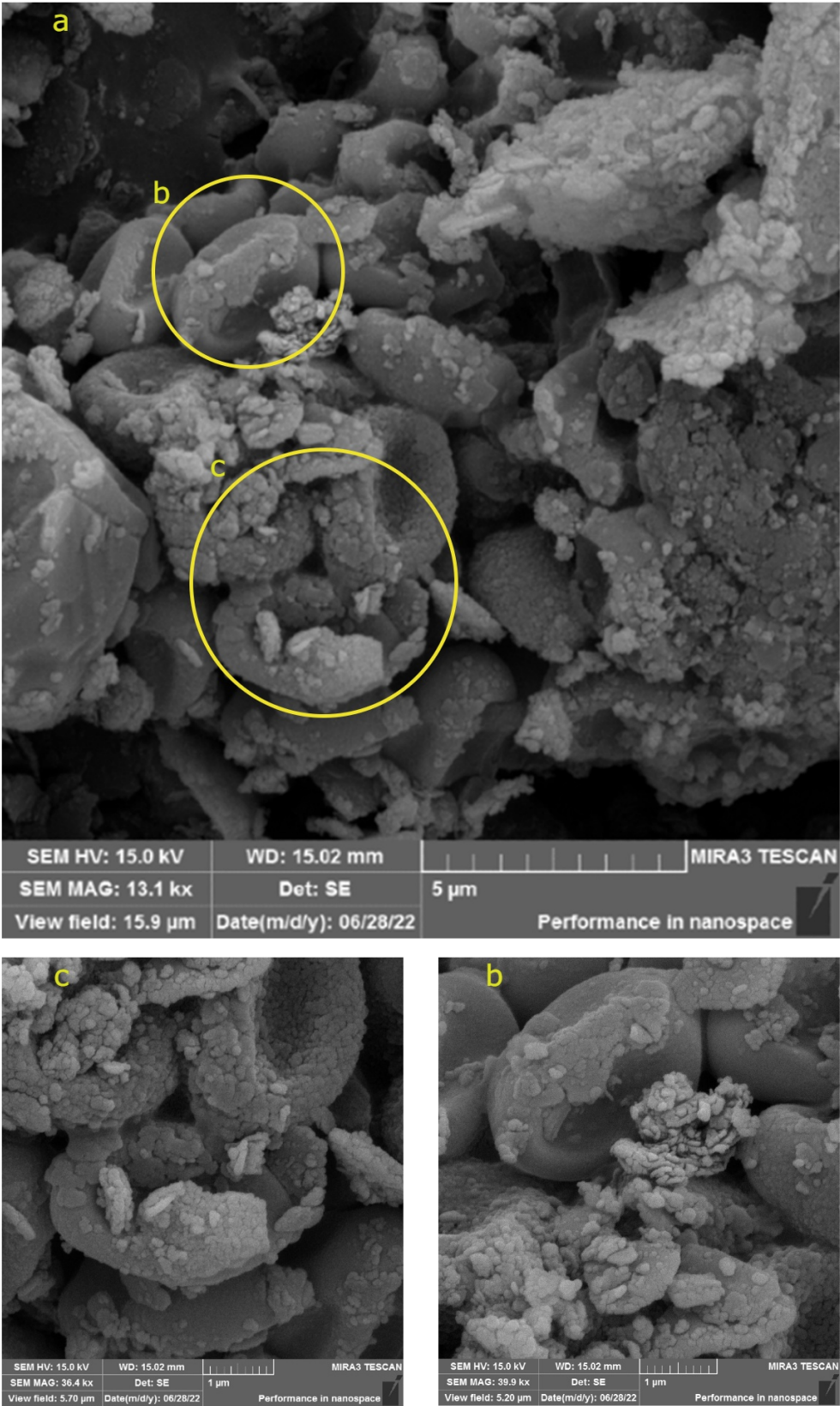
Figura 5.6 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.5. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Al, Si, Fe, K, Ti e O.



Fonte: O autor.

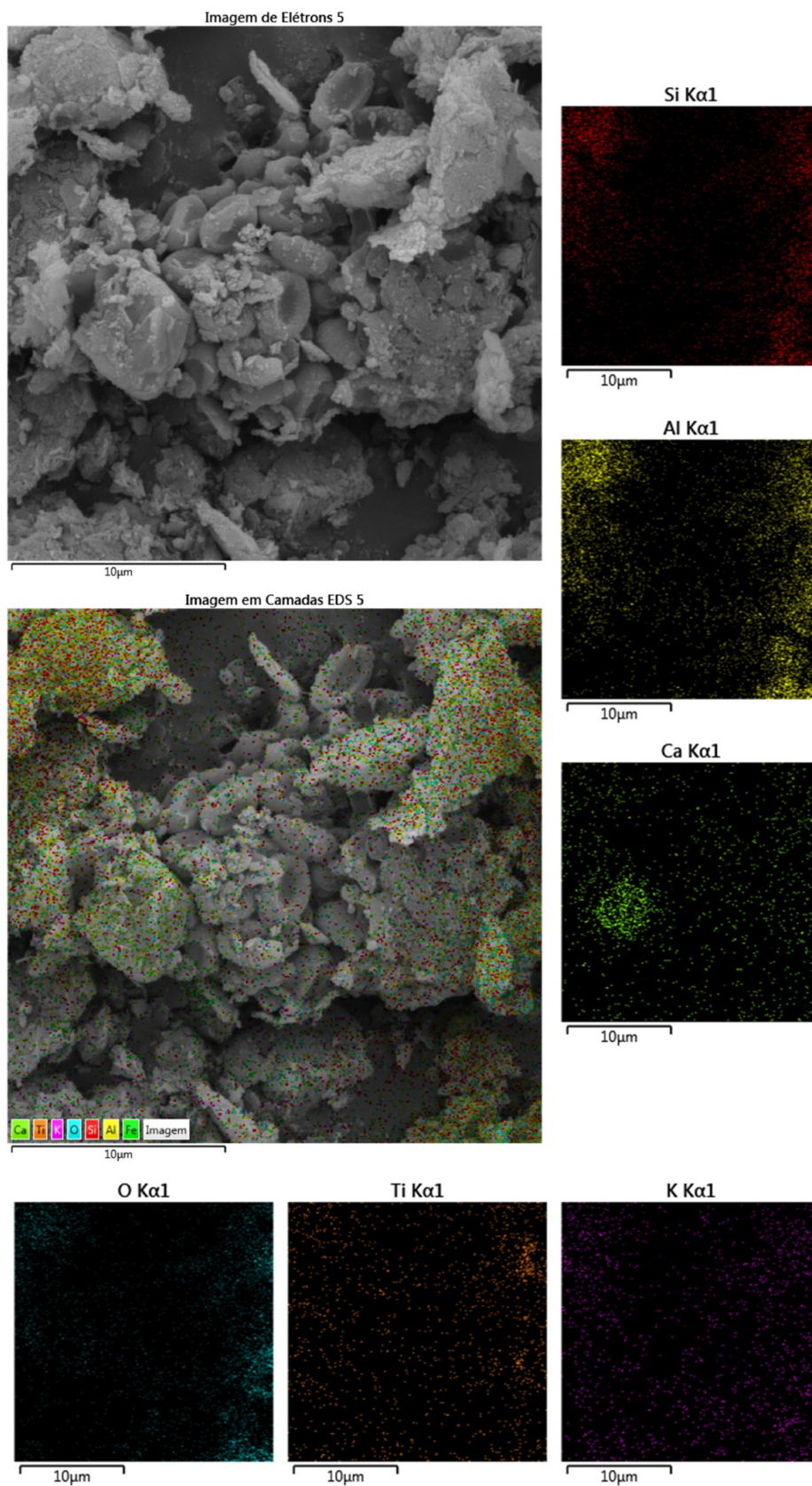
Na Figura 5.5 (c) e (d), podemos observar corpos com hábito lamelar novamente e através do mapeamento por EDS, Figura 5.6, mostrando a predominância de Al, Si e K nessas regiões, reforçamos a presença da Muscovita na amostra, indicada anteriormente e que apresenta as mesmas características novamente em outra medida.

Figura 5.7 – Micrografia da TFSA do perfil V3 4-60. Indicada na figura a região (a) com escala de 5 μ m, e as suas regiões de destaque (b) com escala de 1 μ m e (c) com escala de 1 μ m.



Fonte: O autor.

Figura 5.8 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.7. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, Ca, Ti, K e O.

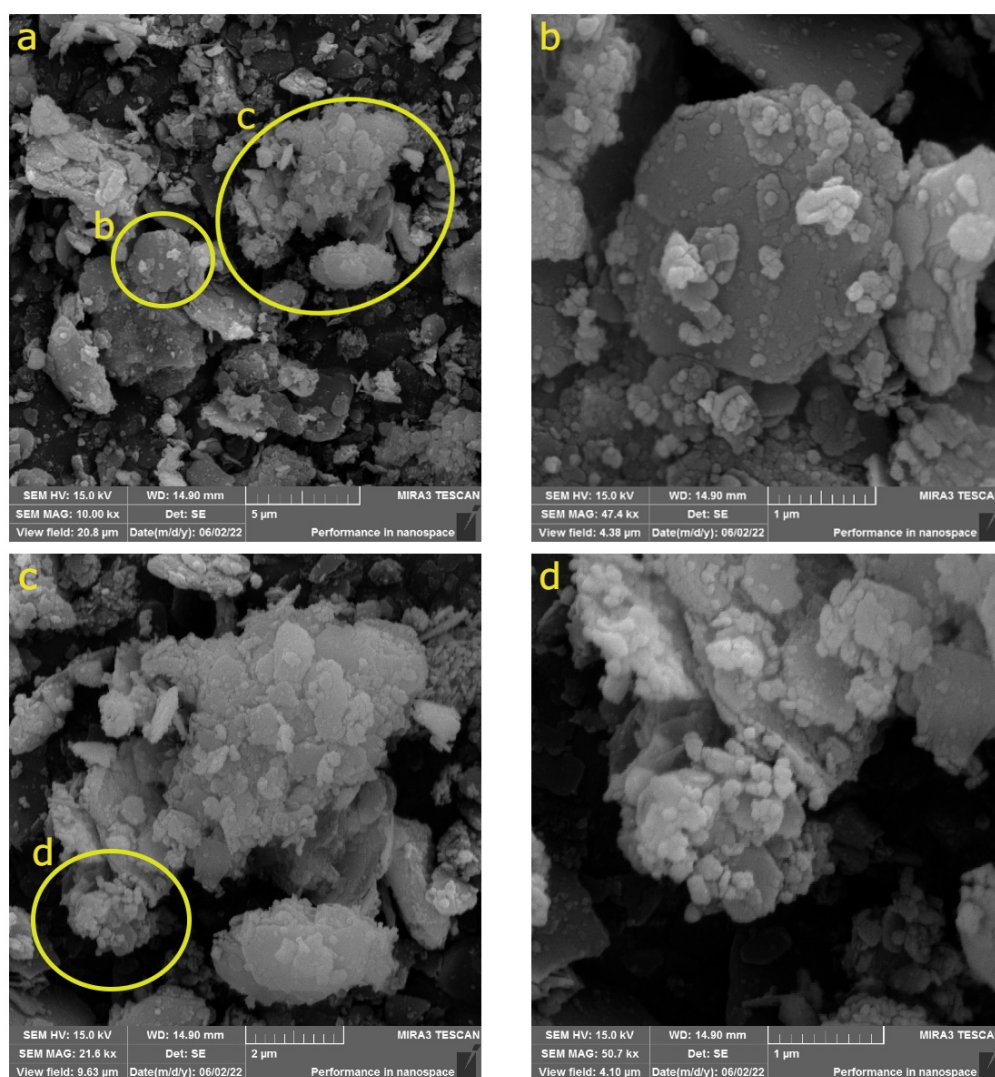


Fonte: O autor.

Com base na micrografia da Figura 5.7 e no mapeamento por EDS, Figura 5.8, temos um corpo com grande concentração de Ca, sem indicar presença relevante de outros elementos, apenas pequenas quantidades de Si e K, que podem ser desconsideradas. Esse torrão de Ca encontrado apresenta hábito maciço, compacto e sem forma cristalina definida. Na análise de DRX foi possível identificar a Calcita, um carbonato comum que ocorre associado ao Quartzo em rochas metamórficas (56), assim é possível confirmar a sua presença na amostra e associá-lo ao corpo maciço a Calcita.

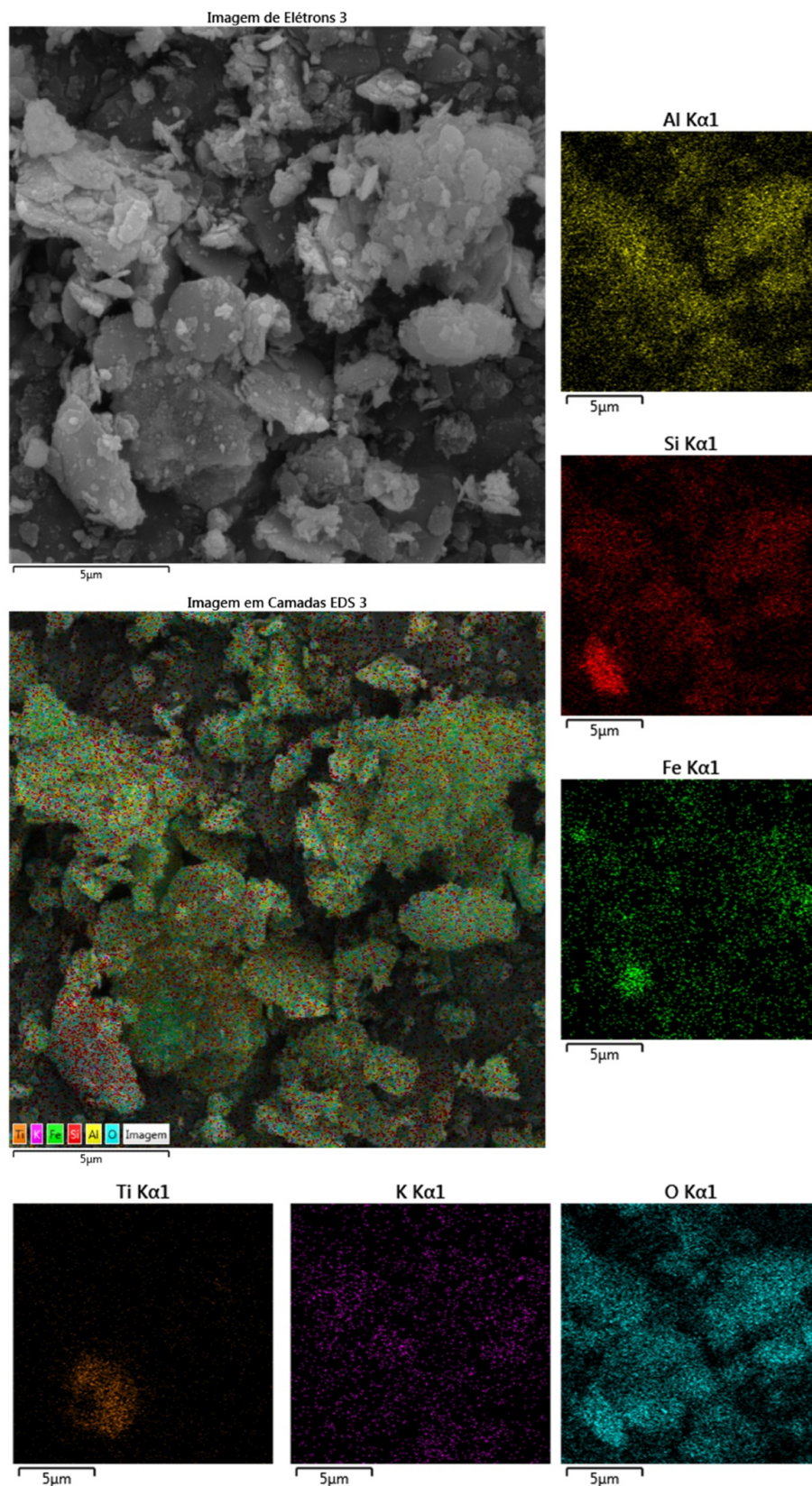
A Figura 5.7 apresenta corpos com hábito nodular, forma aproximadamente esférica com protuberâncias irregulares, que estão destacados em (b) e (c), esses não puderam ser identificados e relacionados com nenhum mineral encontrado na literatura.

Figura 5.9 – Micrografia da TFSA do perfil V3, V3 60+. Indicada na figura a região (a) com escala de 5 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 1 μm e (c) com escala de 2 μm , e desta um destaque (d) com escala de 2 μm .



Fonte: O autor.

Figura 5.10 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.9. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Al, Si, Fe, Ti, K e O.



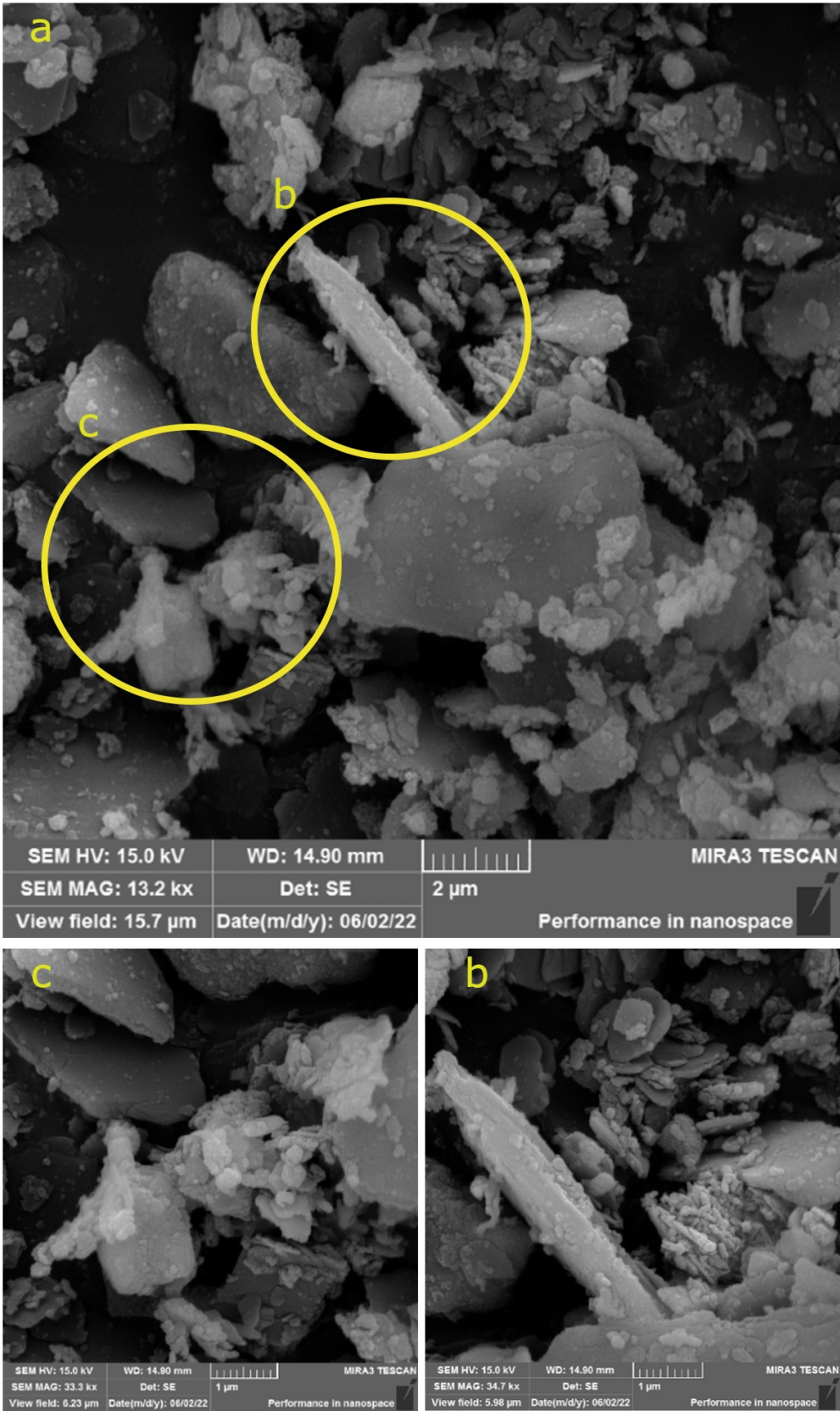
Fonte: O autor.

A Figura 5.9 nos mostra novamente corpos com hábito lamelar, e também, em (b), vemos o formato hexagonal. Essas são duas características presentes nos minerais do grupo das Micas, e vendo a predominância dos elementos Al, Si e K, nessa medida pelo mapeamento por EDS, Figura 5.10, temos a forte indicação que esses corpos são referentes a Muscovita (57).

Temos também, na micrografia da Figura 5.9, a presença significativa de minerais contendo Fe em sua composição, de acordo com o mapeamento por EDS na Figura 5.9. Considerando então os resultados encontrados nas técnicas de DRX e FRX, e comparando com outros trabalhos, como de 58 que estudou a Hematita em diferentes tamanhos, temos a confirmação de que há presença do mineral Hematita na amostra.

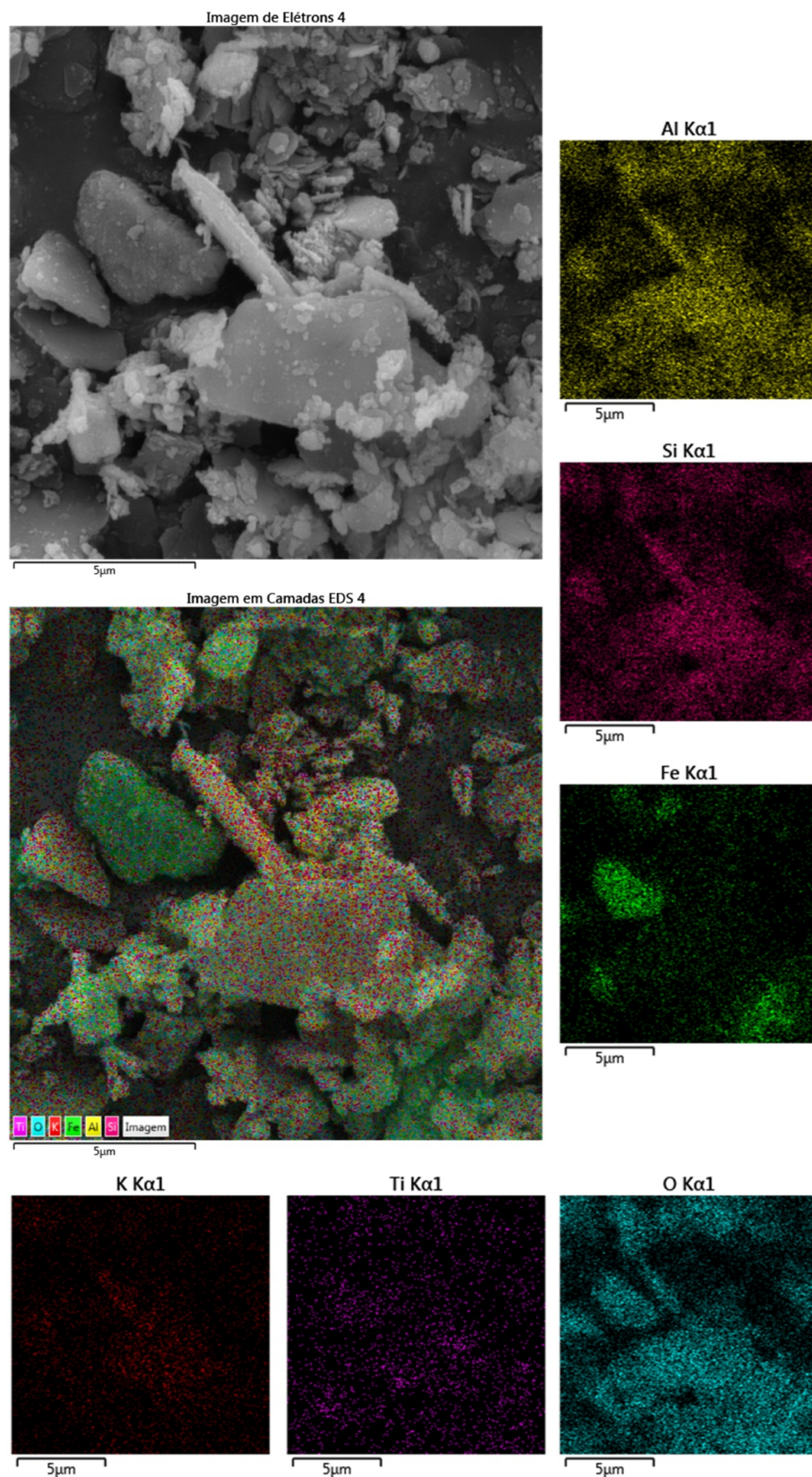
Além desses pontos destacados, as micrografias revelaram a presença de Ti na amostra V3 60+, conforme ilustrado na Figura 5.10. Esse resultado está em concordância com o encontrado anteriormente por DRX que nos mostra a presença do Anatásio na amostra. Além disso no estudo realizado por (59), onde foi estudado dióxidos de titânio como Rutilo e Anatásio, vemos a presença de elementos semelhantes ao encontrado nesse trabalho.

Figura 5.11 – Micrografia da TFSA do perfil V3, V3 60+. Indicada na figura a região (a) com escala de 2 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 1 μm e (c) com escala de 1 μm .



Fonte: O autor.

Figura 5.12 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.11. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Al, Si, Fe, K, Ti e O.



Fonte: O autor.

Na Figura 5.11 em (c) e (d) observa-se a presença de corpos da Muscovita novamente, com hábito lamelar e formato hexagonal, e conforme ilustrado no mapeamento por EDS, Figura 5.12, conseguimos confirmar a hipótese. Além disso vemos uma grande concentração de Fe no mapeamento por EDS, que reforça a presença da Hematita nessa amostra.

A amostra V3 4-60, vemos predominantemente corpos com hábito lamelar, formato hexagonal, faces cristalinas bem definidas e a presença de Al, Si e K, que são características muito comum de se encontrar em minerais do grupo das Micas. A combinação dos elementos e a morfologia apresentada nos indica que se trata de corpos de mineral Muscovita. No entanto, se considerarmos a presença do Mg podemos supor há uma substituição isomórfica, nessa Muscovita, onde o Al foi parcialmente substituído por Mg, essa substituição nas Muscovitas é a mais comum para o Al de acordo com 19. Além destes também foi observado um corpo com alta concentração de Ca, com hábito maciço sem formas cristalinas definidas, que indica ser uma Calcita. A Figura 5.7 também mostra corpos nodulares de forma aproximadamente esférica, mas que não pode ser identificado.

Na amostra V3 60+, observou-se a presença significativa de minerais contendo Fe e também o Ti, que está de acordo com os resultados da DRX onde foi encontrado Hematita e o Anatásio, confirmando a presença dos dois minerais, além de também apresentar corpos da Muscovita.

Em resumo, as micrografias e análises confirmam a presença dos minerais Muscovita, Calcita, Hematita e Anatásio nas amostras estudadas do Perfil V3. Com isso vemos uma grande adversidade de minerais presentes neste perfil, e que está de acordo com o que foi encontrado nas técnicas anteriores neste trabalho.

5.2 Resultado do perfil V5

Os resultados do método da Picnometria a Gás para as densidades de partícula das amostras do perfil V5 apresentaram valores de: $2,548 \pm 0,005 \text{ g/cm}^3$ para V5 0-15 e $2,659 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$ para V5 15-50, com uma densidade média de $2,60 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$. Em comparação, 15 encontraram um valor médio para o perfil V5, na profundidade de 0 a 25 cm, de $2,5 \text{ g/cm}^3$.

Como mencionado, o resultado obtido por 15 foi para uma profundidade diferente da analisada neste trabalho, porém o resultado da densidade foi próximo ao encontrado para a amostra V5 0-15 e também com uma diferença percentual de 4 % em relação a densidade média das duas profundidades. Essa pequena variação nos resultados, mostra que os resultados estão coerentes entre si apesar dos métodos diferentes empregados na obtenção destes resultados.

A análise textural, mostrada na Tabela 3, foi realizada para as amostras das duas profundidades, V5 0-15 e V5 15-50. A classificação foi Franco Arenoso para as duas profundidades, e tiveram percentuais granulométricos próximos, com uma diminuição significativa da argila no V5 15-50. 15 classificaram o perfil V5, na profundidade 0 a 25 cm, como Franco Arenoso, assim temos que os dois resultados estão de acordo, e apresentam predomínio dos teores de Areia e

Silte.

A maior densidade de partícula que observamos é para V5 15-50, junto a diminuição da argila, e isto sugere presença maior de minerais mais densos ou um menor teor de matéria orgânica em comparação com V5 0-15 (60). Essa variação é importante para compreender a dinâmica do solo e suas propriedades físicas.

Tabela 3 – Resultados da análise textural para as amostras do perfil V5 nas duas profundidades, V3 4-60 e V3 60+, e conforme classificação textural de SBCS. .

Amostra	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação
V5 0-15	55,85	40,35	3,8	Franco arenoso
V5 15-50	56	43,2	0,8	Franco arenoso

Fonte: O autor.

A Tabela 4 apresenta os resultados da técnica da FRX para as amostras das profundidades. Os elementos Si, Al, K e Fe estão em destaque, encontrados em altos teores nas amostras analisadas. A presença desses elementos é comum em quartzitos e seus teores sugerem a presença principalmente de Quartzo e Muscovita, minerais compostos principalmente por Si, Al e K.

Ao comparar os resultados entre as profundidades, observamos um aumento significativo do teor de Si na amostra V5 15-50, enquanto os teores de Al, Fe e Ti diminuem. Esta variação sugere uma maior concentração de Quartzo no horizonte V5 15-50, explicando o aumento na densidade de partícula nesse horizonte. Esse comportamento pode estar relacionado aos processos de formação e exposição diferentes entre os dois horizontes (61), influenciando a distribuição dos minerais e, conseqüentemente, os teores dos elementos analisados.

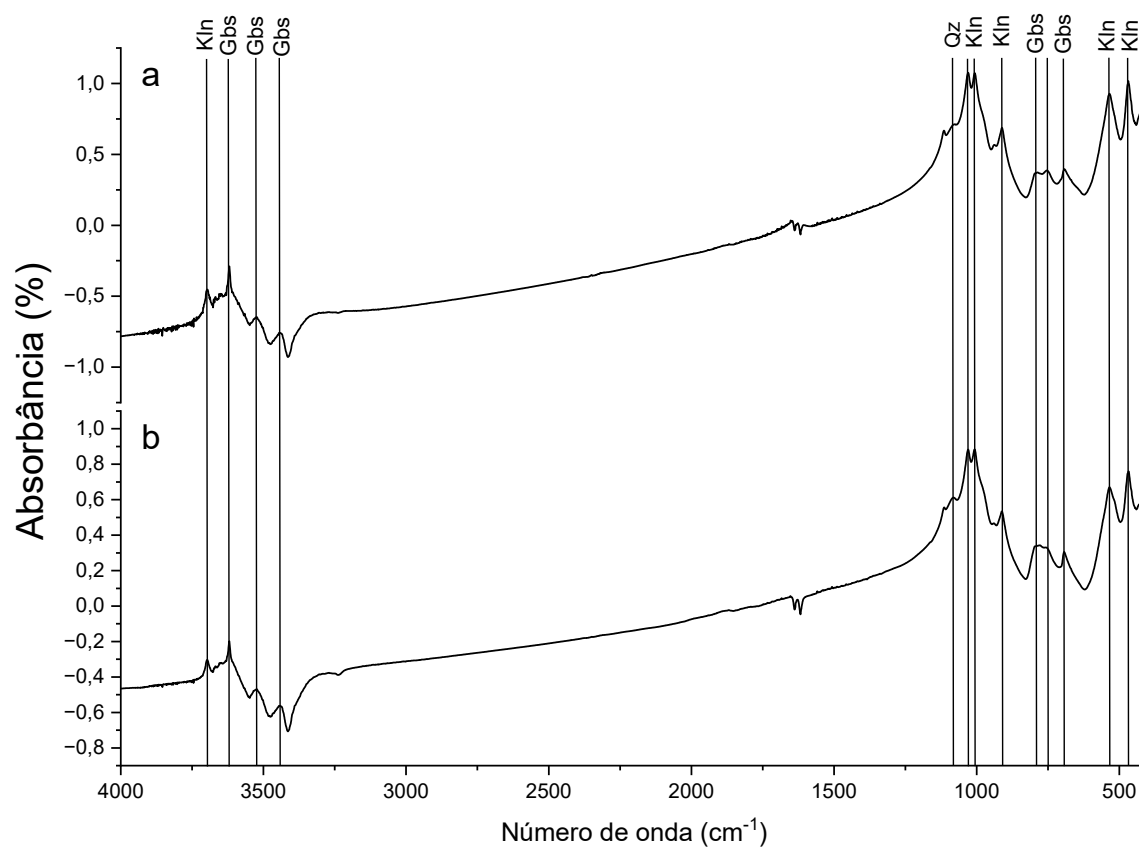
Tabela 4 – Resultados de FRX, dados em teores de elementos, porcentagem dos elementos, para amostras do perfil V5 nas duas profundidades: V5 0-15 e V5 15-50. Elementos com teores abaixo de 0,5 % foram descartados.

Elemento	V5 0-15		V5 15-50	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Si	60,2	0,6	66,4	0,4
Al	29,0	0,4	24,4	0,4
K	6,6	0,3	6,6	0,4
Fe	2,09	0,03	1,14	0,02
Ti	0,77	0,06	0,620	0,009
S	0,55	0,04	N.D	N.D

Fonte: O autor.

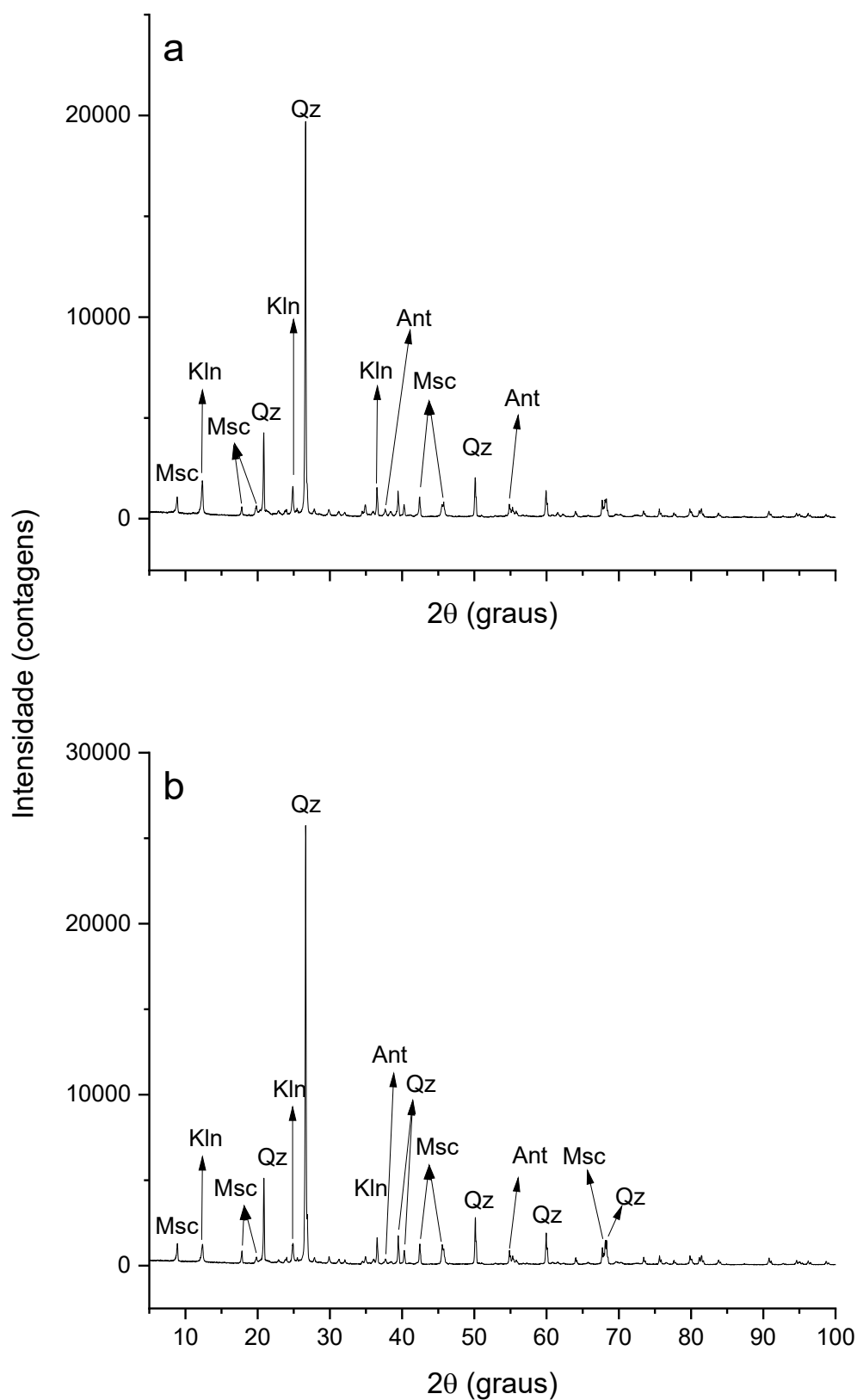
Apresentamos os resultados de IV na Figura 5.13. Nessa figura, temos o resultado para a amostra V5 0-15 e o resultado para a V5 15-50. A análise das bandas de vibrações revela que os mesmos minerais Quartzo, Caulinita e Gibbsita estão presentes em ambas as profundidades. E de acordo com a FRX, as amostras apresentaram teores significativos dos elementos Si e Al, os quais são elementos fazem parte da composição química na estequiometria ideal: do Quartzo que contém Si, da Caulinita que contém Si e Al, da Gibbsita que contém Al.

Figura 5.13 – Resultados de IV, espectros de IV na região de 4000 a 400 cm^{-1} , para amostras do perfil V5 nas duas profundidades: (a) V5 0-15 e (b) V5 15-50. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs) e Quartzo (Qz).



Fonte: O autor.

Figura 5.14 – Resultados de DRX, difratogramas na extensão em $2\theta = 5^\circ$ a $2\theta = 100^\circ$ para amostras do perfil V5 nas duas profundidades: (a) V5 0-15 e (b) V5 15-50. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs), Muscovita (Msc), Anatasio (Ant) e Quartzo (Qz).

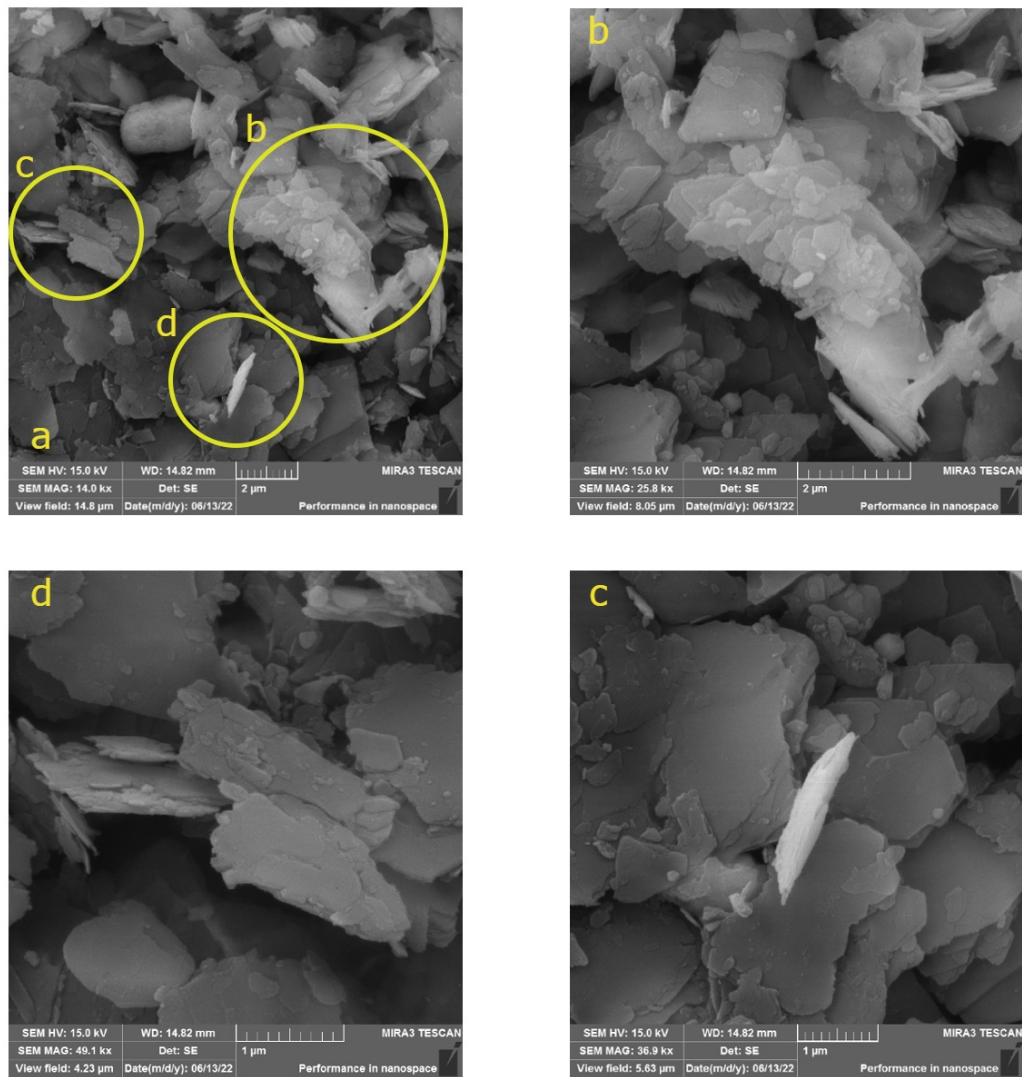


Fonte: O autor.

Nas amostras das profundidades do perfil V5, V5 0-15 e V5 15-50, foi possível identificar a maioria dos picos de difração dos minerais Muscovita, Caulinita e Quartzo por meio da análise qualitativa dos difratogramas, mostrado na Figura 5.14. A análise dos resultados obtidos por IV tanto na amostra V5 0-15 quanto V5 15-50, apresentou bandas de vibração consistentes com os minerais Caulinita e Quartzo, Figura 5.13. A correspondência dos resultados observados por IV com os obtidos os difratogramas, de DRX, é um indicativo da presença desses minerais. Essas análises são consistentes com a FRX, que revelou a presença predominante de Si, Al e K, os principais elementos constituintes dos minerais identificados. Esses dados se complementam e confirmam a presença desses minerais nas amostras analisadas. Dessa forma, os resultados das diferentes técnicas estão em concordância, validando a caracterização mineralógica da amostra.

Nas Figuras 5.15, 5.17 e 5.19 apresentamos as micrografias obtidas por MEV, para análise da morfologia da amostra em estudo, e nas Figuras 5.16, 5.18 e 5.20 também apresentamos os resultados do mapeamento por EDS que auxilia na análise composicional elementar da região da respectiva micrografia analisada.

Figura 5.15 – Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 0-15. horizonte HA. Indicada na figura a região (a) com escala de 2 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 2 μm , (c) com escala de 1 μm e (d) com escala de 1 μm .

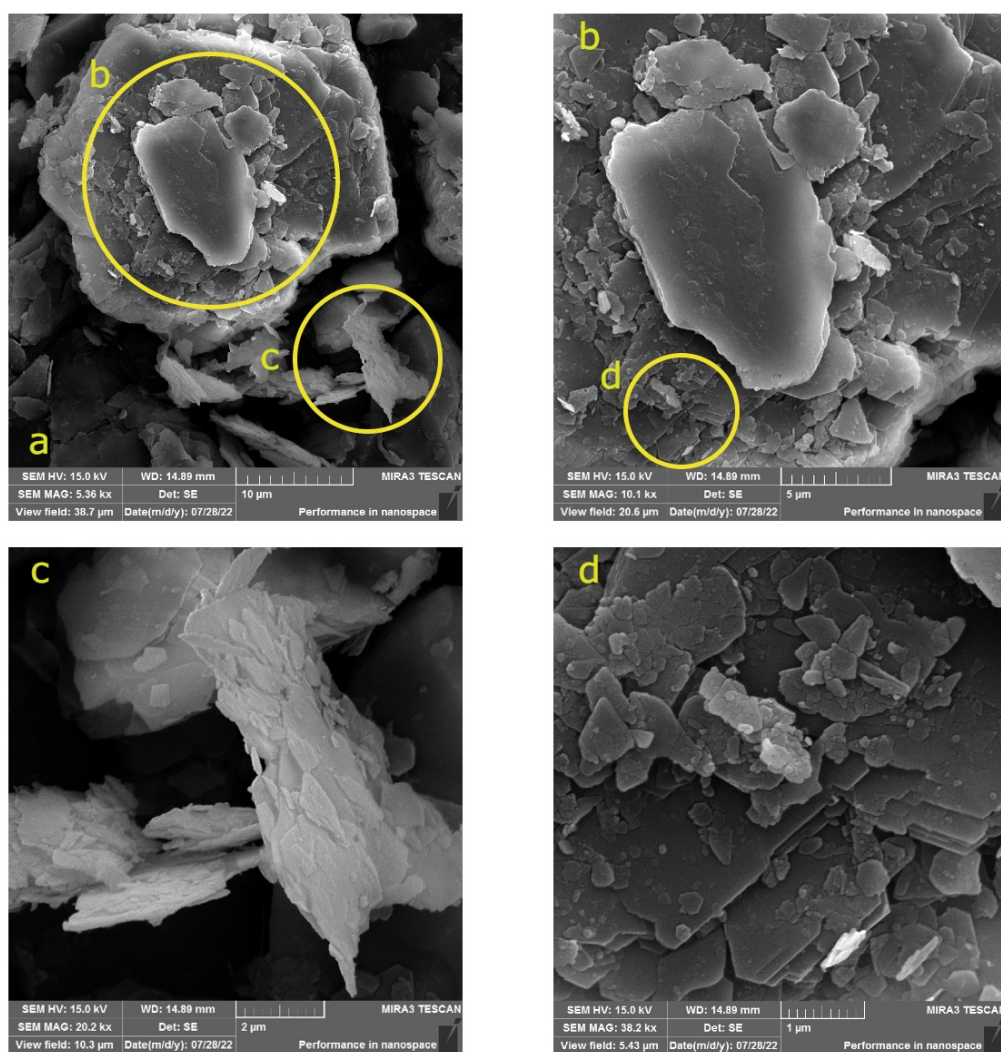


Fonte: O autor.

Na Figura 5.15 vemos nas regiões destacadas a presença de corpos com hábitos lamelares e no mapeamento por EDS, Figura 5.16, vemos que nessas regiões temos a presença principalmente de Al, Si e K com a presença também do elemento Mg. Essa combinação dos elementos e a morfologia dos corpos nos indica que se trata de corpos da Muscovita, que foi encontrada anteriormente na DRX (Figura 5.14).

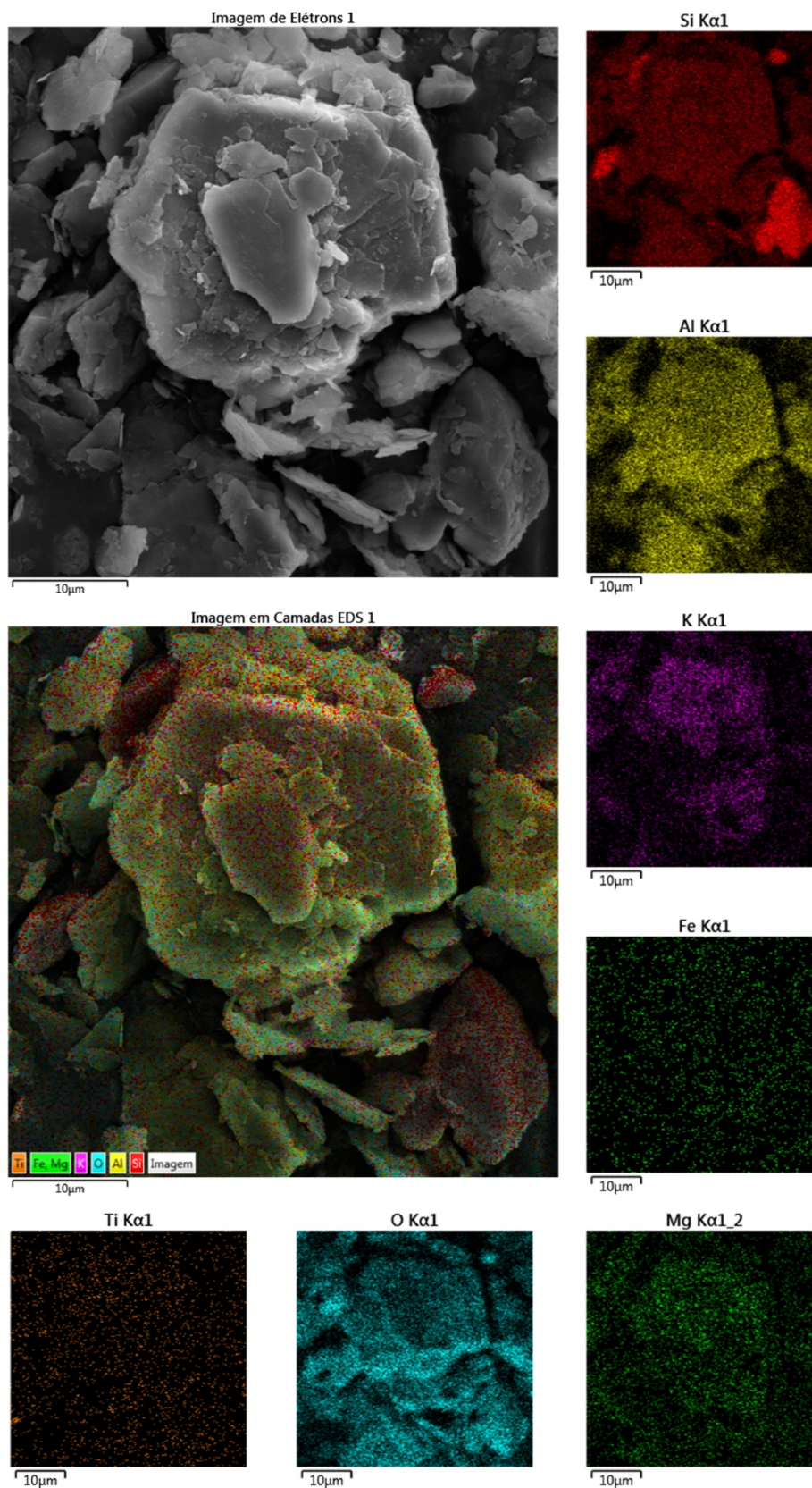
Além destes, destacados anteriormente, vemos no mapeamento uma concentração significativa de Ti em um ponto específico, onde se localiza um corpo com hábito granular. Nas análises anteriores, de IV e DRX, nenhum mineral contendo Ti foi identificado na amostra, porém a FRX nos mostrou que há teores de Ti nesta amostra (Tabela 4).

Figura 5.17 – Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 0-15. Indicada na figura a região (a) com escala de 10 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 5 μm , (c) com escala de 2 μm e (d) com escala de 1 μm a partir de (b).



Fonte: O autor.

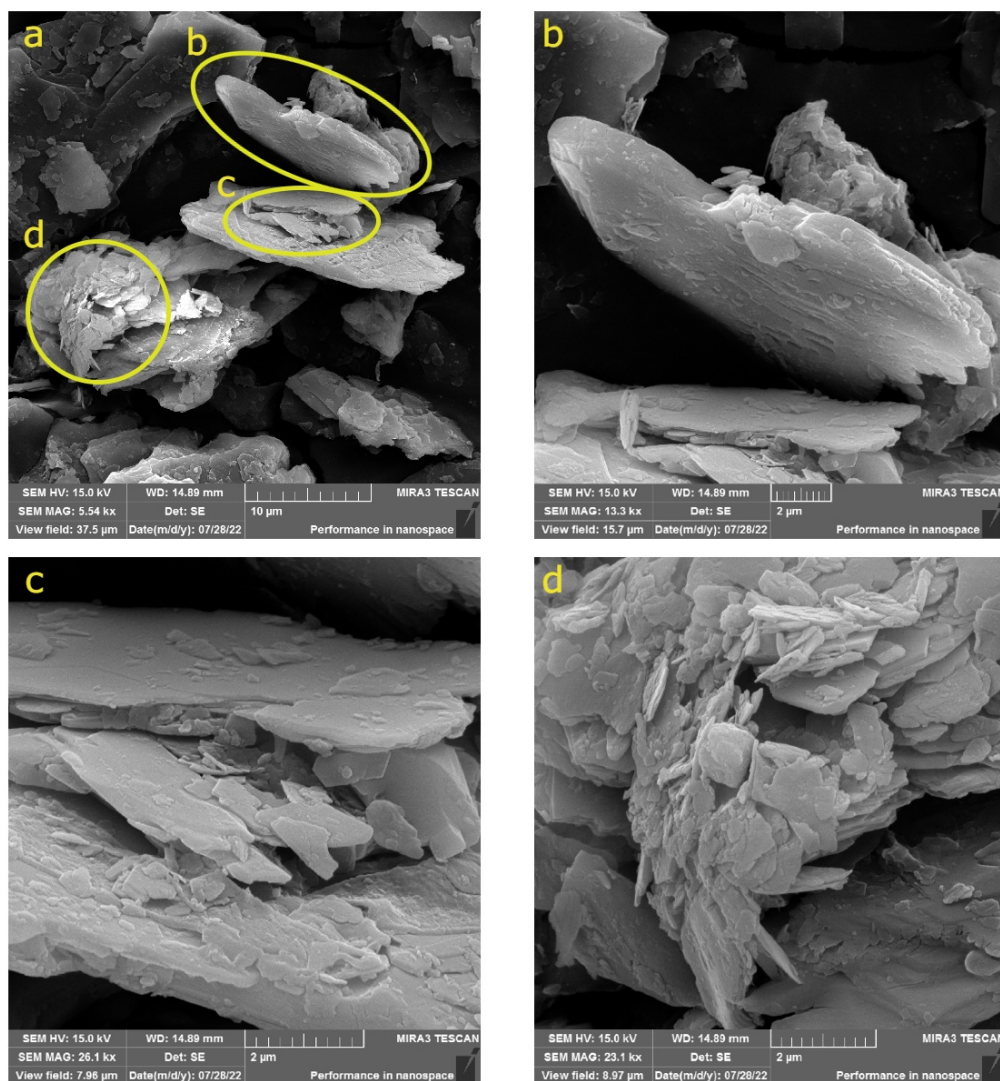
Figura 5.18 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.17. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, K, Fe, Mg, O e Ti.



Fonte: O autor.

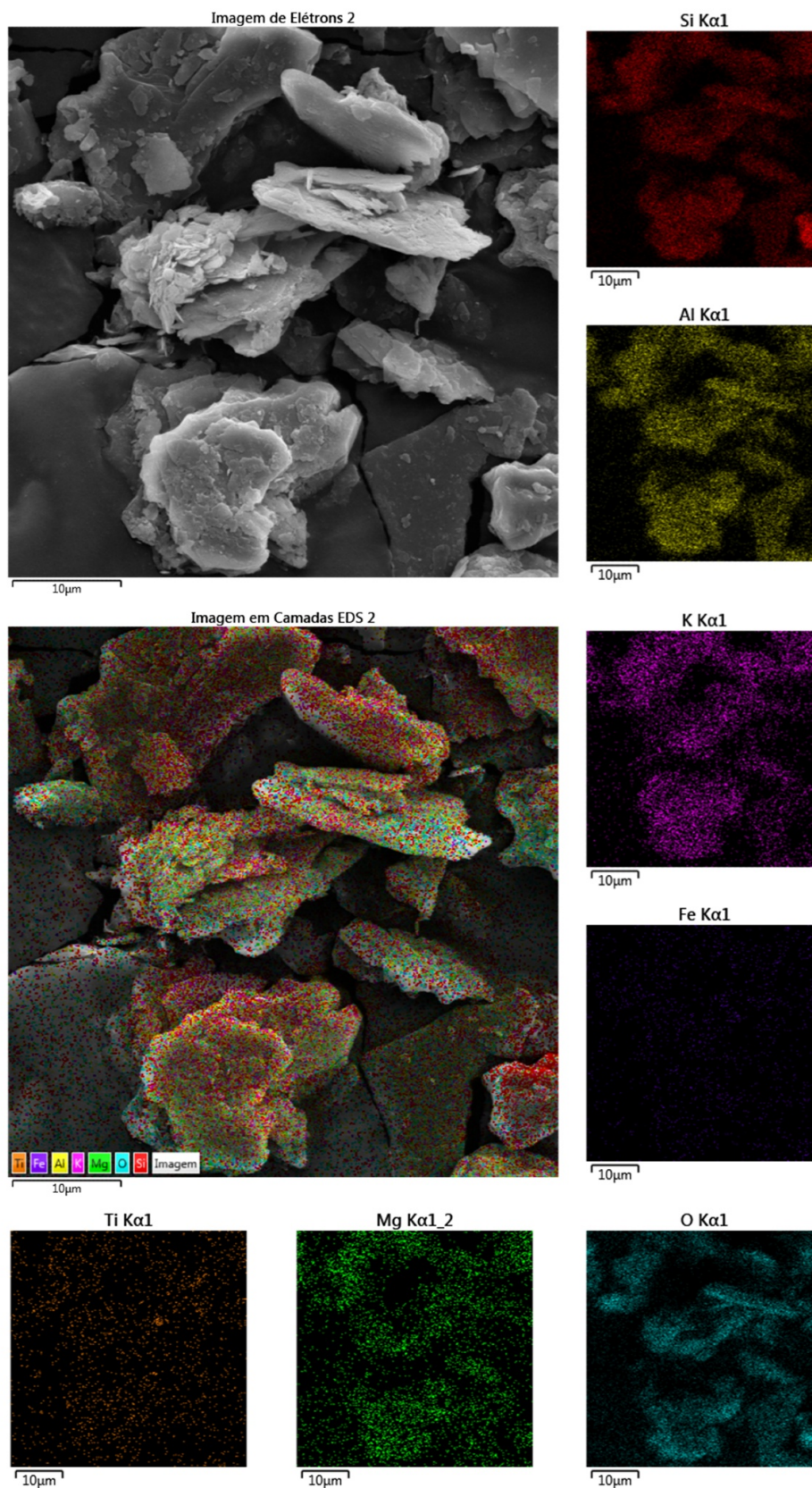
A Figura 5.17, apresenta novamente corpos com hábito lamelar, e o mapeamento, Figura 5.18, nos indica novamente a presença de Al, Si e K nestes corpos. Isso reforça a presença da Muscovita na amostra, e chama atenção pela presença significativa de Mg na mesma região que sugere uma substituição isomórfica nessa muscovita, onde o Al foi parcialmente substituído por Mg, essa substituição nas Muscovitas é a mais comum para o Al de acordo com 19.

Figura 5.19 – Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 0-15. Indicada na figura a região (a) com escala de 10 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 2 μm , (c) com escala de 2 μm e (d) com escala de 2 μm .



Fonte: O autor.

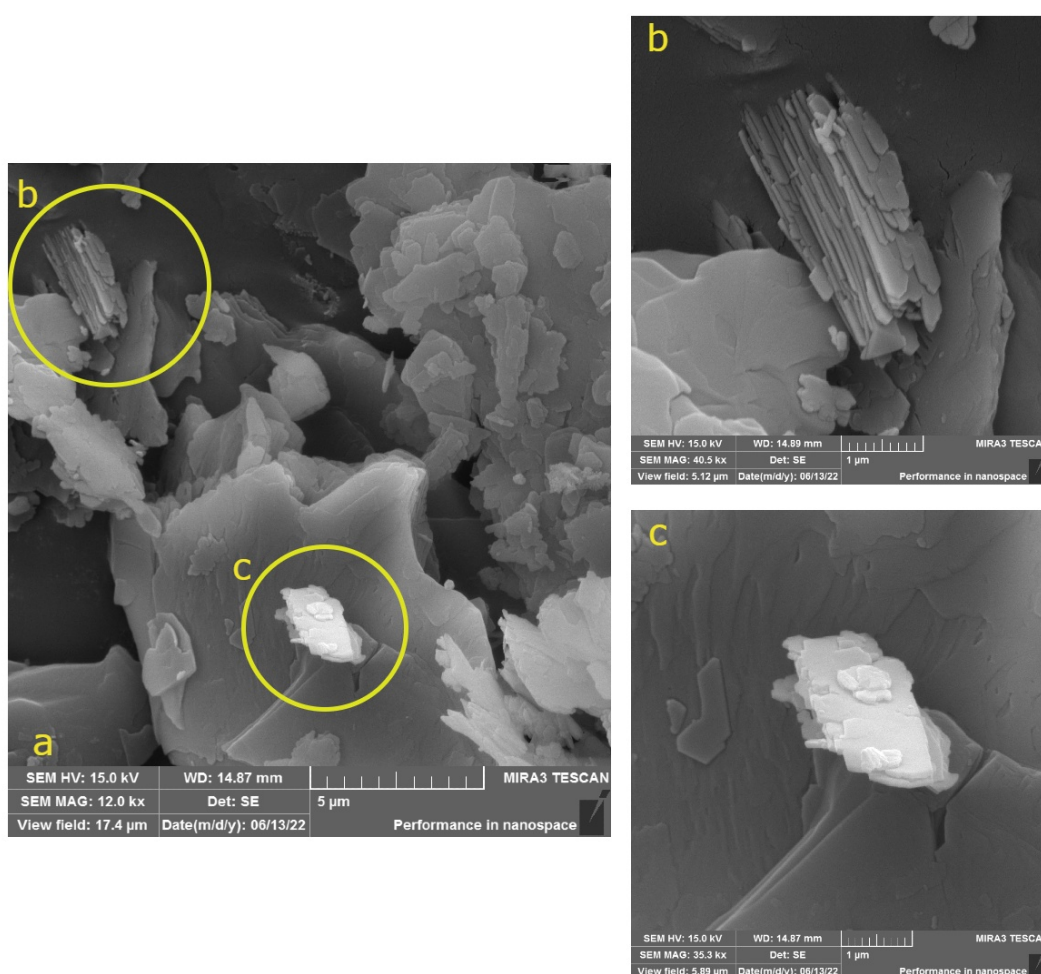
Figura 5.20 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.19. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, K, Fe, O, Mg e Ti.



Fonte: O autor.

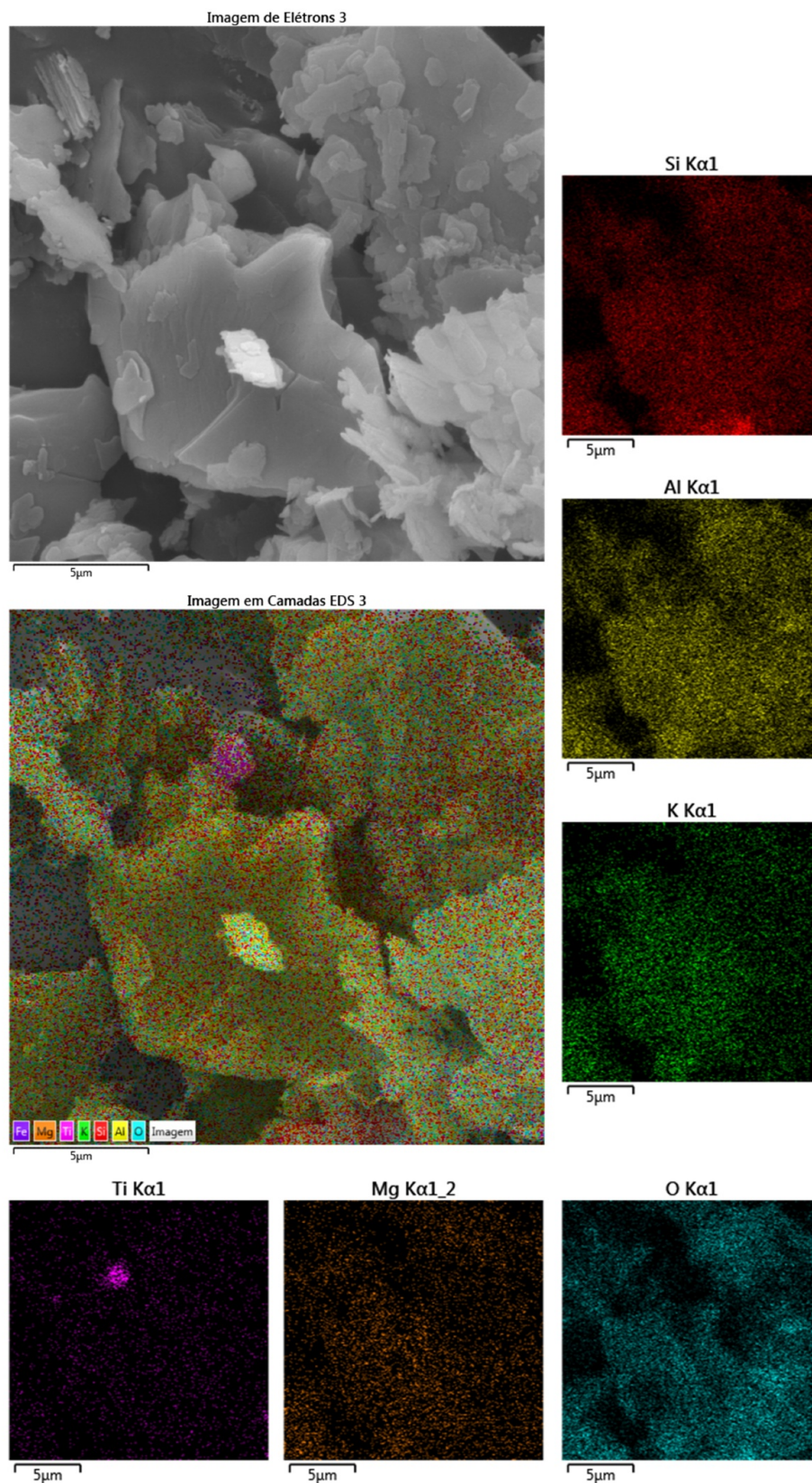
Podemos observar na Figura 5.19 (b) e (c) o comportamento lamelar característico da Muscovita, e com a presença dos elementos Al, Si e K, Figura 5.20, temos a confirmação da presença do mineral na amostra V5 0-15. Outra característica importante vista nas três análises de mapeamento por EDS dessas amostras, é a presença do Mg. Como destacamos anteriormente, é um elemento que tem possibilidade de aparecer substituindo parcialmente o Al na Muscovita, sendo assim podemos supor que há substituição isomórfica nessa Muscovita.

Figura 5.21 – Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 15-50. Indicada na figura a região (a) com escala de 5 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 1 μm e (c) com escala de 1 μm .



Fonte: O autor.

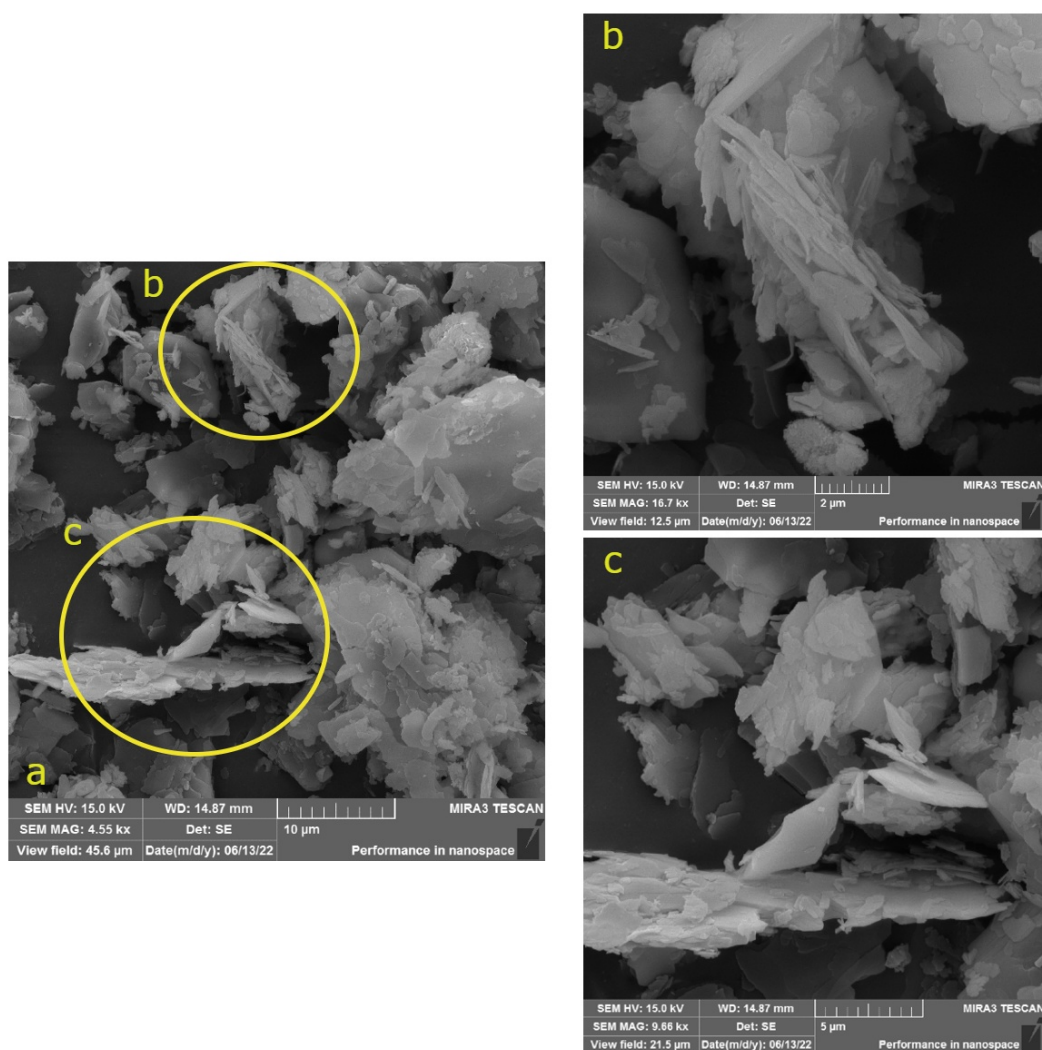
Figura 5.22 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.21. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, K, O, Mg e Ti.



Fonte: O autor.

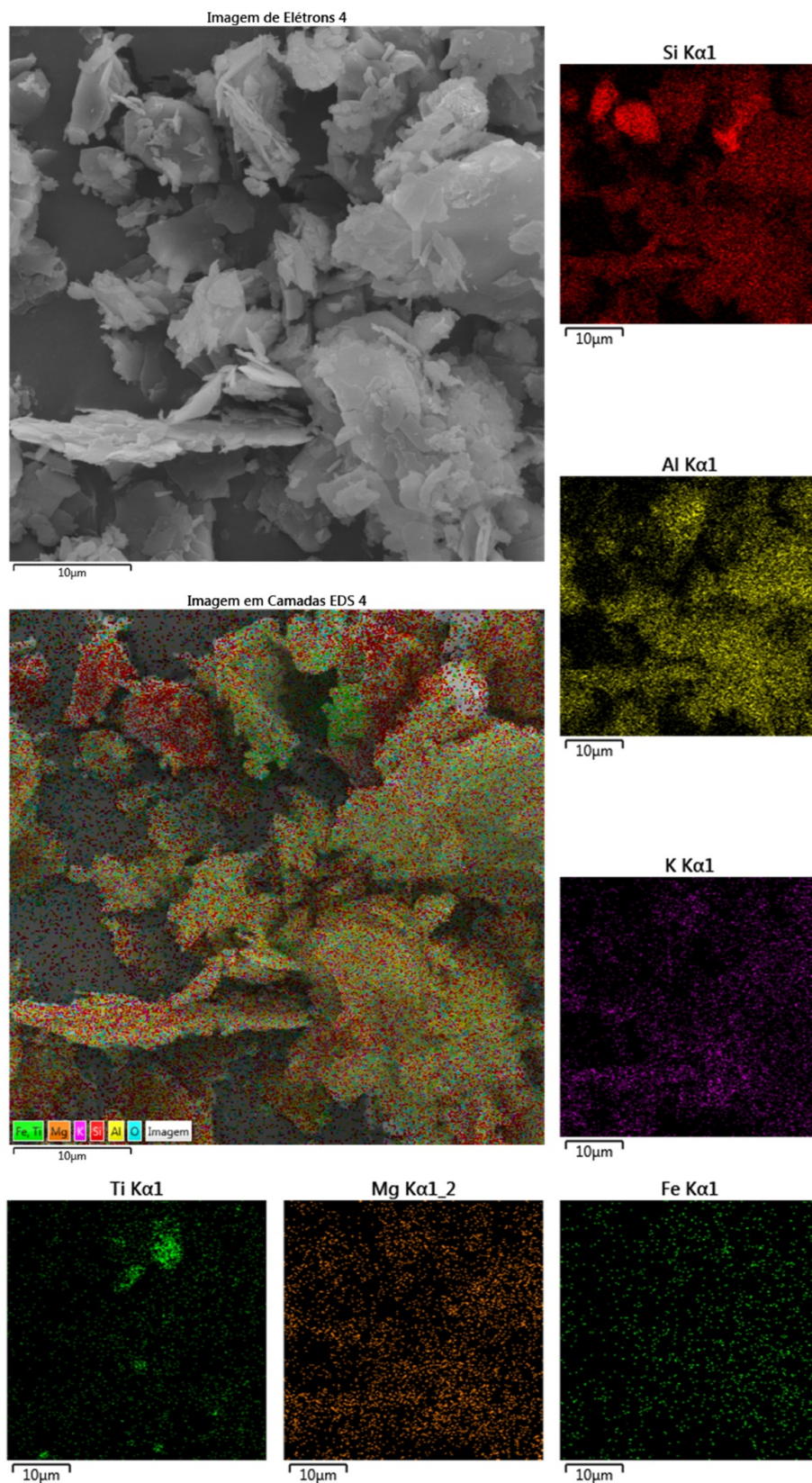
A Figura 5.21 (b) mostra principalmente o hábito lamelar muito bem definido de uma Muscovita. E destaca-se também um pequeno corpo contendo Ti principalmente em sua composição, observado na Figura 5.22, com um hábito granular, semelhante ao observado anteriormente na Figura 5.15.

Figura 5.23 – Micrografia da TFSA do perfil V5, V5 15-50. Indicada na figura a região (a) com escala de 10 μm , e as suas regiões de destaque (b) com escala de 2 μm e (c) com escala de 5 μm .



Fonte: O autor.

Figura 5.24 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.23. Apresentado também os mapeamentos por EDS de cada elemento identificado em camadas e sobrepostos. Os elementos encontrados foram: Si, Al, K, O, Mg e Ti.



Fonte: O autor.

Na Figura 5.23 (c), podemos destacar os corpos com hábitos lamelares que estiveram presentes em todas as análises dessa amostra, assim confirma a presença da Muscovita. Observando o mapeamento por EDS da região, Figura 5.24, destaca-se corpos maciços com grande concentração de Si, indicando a presença do Quartzo na amostra, e também os corpos contendo Ti.

As análises realizadas nas amostras do Perfil V5 indicam a presença de minerais com características bem definidas, como a Muscovita e o Quartzo, evidenciadas pelas morfologias lamelares e granulares observadas nas micrografias. A detecção de elementos como Al, Si, K e Mg reforça a identificação da Muscovita, com possível substituição isomórfica de Al por Mg. A presença de Ti, embora em baixos teores, sugere a existência de um mineral adicional que merece investigação mais aprofundada.

Em resumo as micrografias confirmaram a presença dos minerais Muscovita e Quartzo, e trouxeram informações a cerca de um mineral contendo Ti em sua composição.

5.3 Resultado do perfil V8

Determinadas pelo método da Picnometria a Gás, as densidades de partícula para as amostras do perfil V8, nas profundidades, V8 3-10 e V8 10-20 foram, respectivamente, $2,641 \pm 0,007 \text{ g/cm}^3$ e $2,655 \pm 0,006 \text{ g/cm}^3$, com uma densidade média de $2,65 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. 15 analisaram o perfil V8 em intervalos diferentes de profundidades, 0 a 12 cm e 12 a 25 cm, e encontraram uma densidade média de $2,54 \pm 0,09 \text{ g/cm}^3$, este valor de densidade de partícula menor pode ser ocasionado pela presença de cascalho na profundidade 0-12 cm. Comparando as duas densidades médias temos uma diferença percentual de 4,33 %, mesmo levando em consideração os intervalos diferentes das duas amostras analisadas no presente trabalho e por 15 há boa concordância dos dois resultados.

O resultado para o perfil V8, em ambas as profundidades, V8 3-10 e V8 10-20, está de acordo com o que se esperava para estes solos, porque ambos foram classificados como Areia pela análise granulométrica, apresentando um percentual de até 99 % de areia, como mostrado na Tabela 5. A areia em sua composição mineralógica tem como predominância o Quartzo que, de acordo com 62, tem uma densidade média de $2,65 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 5 – Resultados da análise textural para as amostras do perfil V8 nas duas profundidades, V8 3-10 e V8 10-20, e conforme classificação textural de SBSCS.

Amostra	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação
V8 3 – 10	97,8	2,2	0	Areia
V8 10 - 20	99,1	0,9	0	Areia

Fonte: O autor.

Os resultados de FRX, são apresentados na Tabela 6. Desta análise verificamos a predominância do elemento Si, principal constituinte do mineral Quartzo, e também é elemento

que compõe a Muscovita. Além do Si, também foi identificado o Al e o K que são elementos presentes na Muscovita. Outro elemento encontrado é o Cs, que apresentou baixa quantidade mas que chama a atenção por ser um elemento raro de se encontrar na natureza. Porém em Micas, grupo do mineral Muscovita, é possível que aconteça a substituição isomórfica de K por Cs (63).

Também observamos que há um aumento do K e diminuição do Cs, conforme maior a profundidade do ponto. Isso pode indicar a ocorrência de a substituição isomórfica no mineral Muscovita. Além dos elementos citados anteriormente, também há teores de Fe e Ti, elementos comuns em solos brasileiros. Porém, veremos a seguir que não houve evidência de minerais que contenham esses elementos em sua composição elementar, provavelmente por apresentarem em baixa concentração.

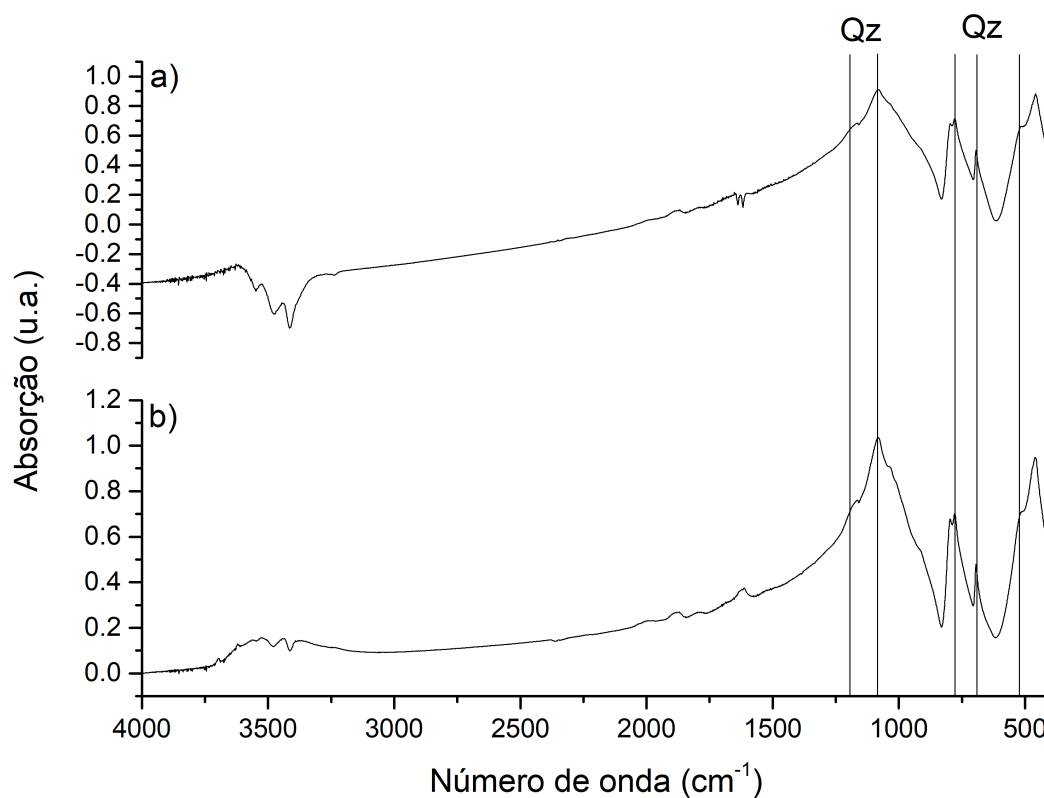
A partir dos resultados de IV identificamos bandas de vibrações dos minerais: Quartzo e Muscovita, nas duas profundidades, V8 3-10 e V8 10-20. Além destes minerais, observamos bandas de vibrações referentes ao mineral Gibbsita, porém, quando comparado com a análise qualitativa da DRX por meio dos difratogramas, a possibilidade da presença deste mineral foi descartada, como veremos na sequência. Destacamos que nas duas profundidades analisadas encontramos as mesmas bandas de vibrações, indicando os mesmos minerais porém em intensidades diferentes.

Tabela 6 – Resultados de FRX, dados em teores de elementos, porcentagem dos elementos, para amostras do perfil V8 nas duas profundidades: V8 3-10 e V8 10-20.

Elementos	V8 3-10		V8 10-20	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Si	91	3	87	4
Al	6	2	9	5
K	1,5	0,3	4	2
S	0,8	0,3	0,6	0,3
Fe	0,64	0,09	2	0,8
Cs	0,24	0,03	0,17	0,04
Ti	0,13	0,04	0,2	0,1

Fonte: O autor.

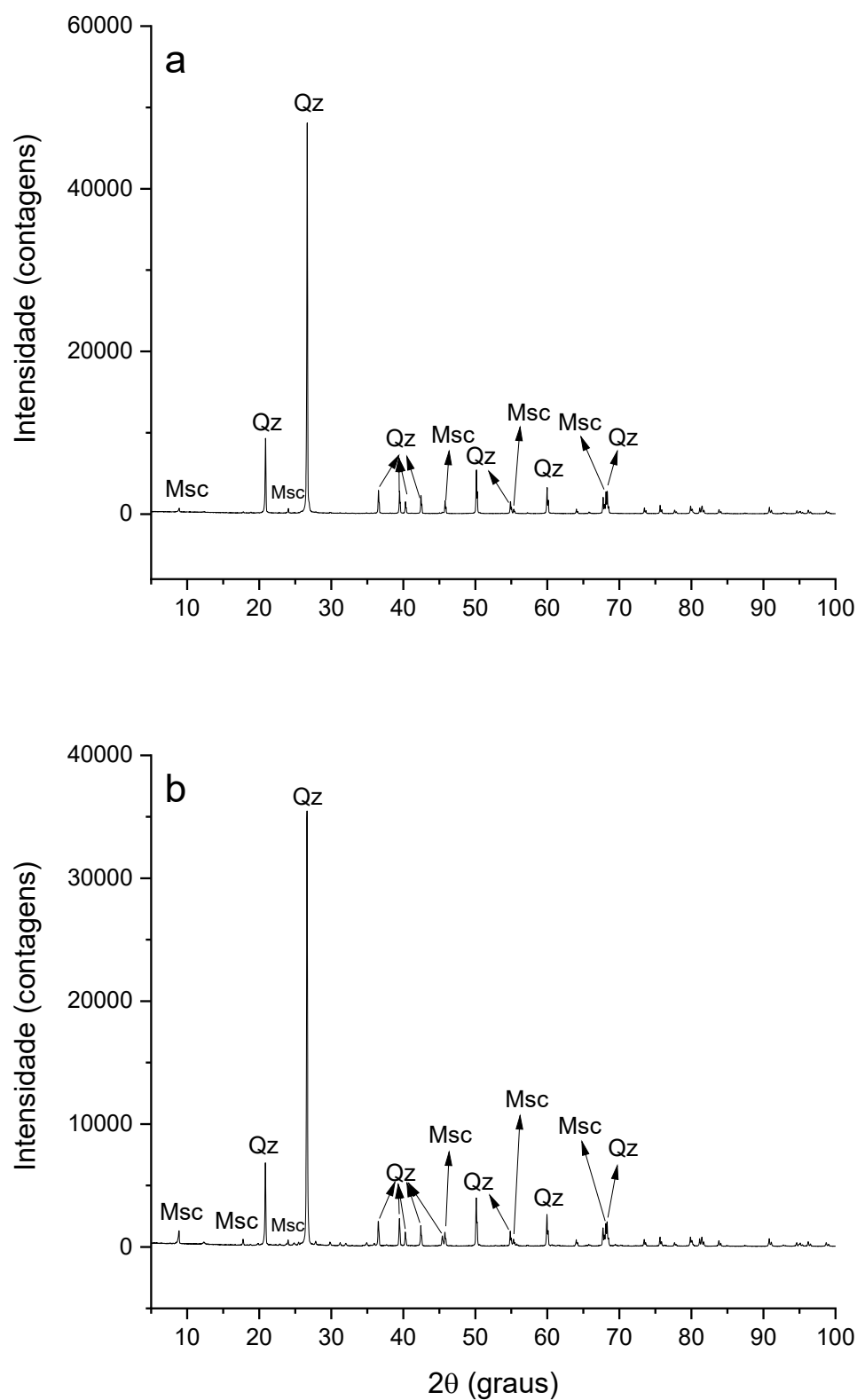
Figura 5.25 – Resultados de IV, espectros de IV na região de 4000 a 400 cm^{-1} , para amostras do perfil V8 nas duas profundidades: (a) V8 3-10 e (b) V8 10-20. Legenda: Quartzo (Qz).



Fonte: O autor.

A análise qualitativa inicial da DRX para o perfil V8, nas duas profundidades, V8 3-10 e V8 10-20. É apresentada nos difratogramas da Figura 5.26. Os principais picos de difração foram, em sua maioria, identificados e caracterizados de acordo com o mineral. Nessa análise, identificamos apenas dois minerais, o Quartzo e a Muscovita. Esses minerais encontrados na DRX corroboram com resultados da FRX, quando tratamos dos elementos que apareceram em maior teor, Si, Al e K, uma vez que na composição ideal dos minerais temos principalmente esses elementos.

Figura 5.26 – Resultados da DRX , difratogramas na extensão em $2\theta = 5^\circ$ a $2\theta = 100^\circ$ para amostras do perfil V8 nas duas profundidades (a) V8 3 a 10 e (b) V8 10 a 20. Legenda: Caulinita (Kln), Gibbsita (Gbs) e Quartzo (Qz).



Fonte: O autor.

De forma diferente da apresentação feita para as micrografias e mapeamentos por EDS dos perfis V3 e V5, apresentamos as micrografias e mapeamento por EDS do perfil V8 TFSA e areia nas duas profundidades nas Figuras 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.32 enquanto os resultados do EDS mapeado na região da micrografia estão nas Tabelas 7, 8, 9, 10 e 11.

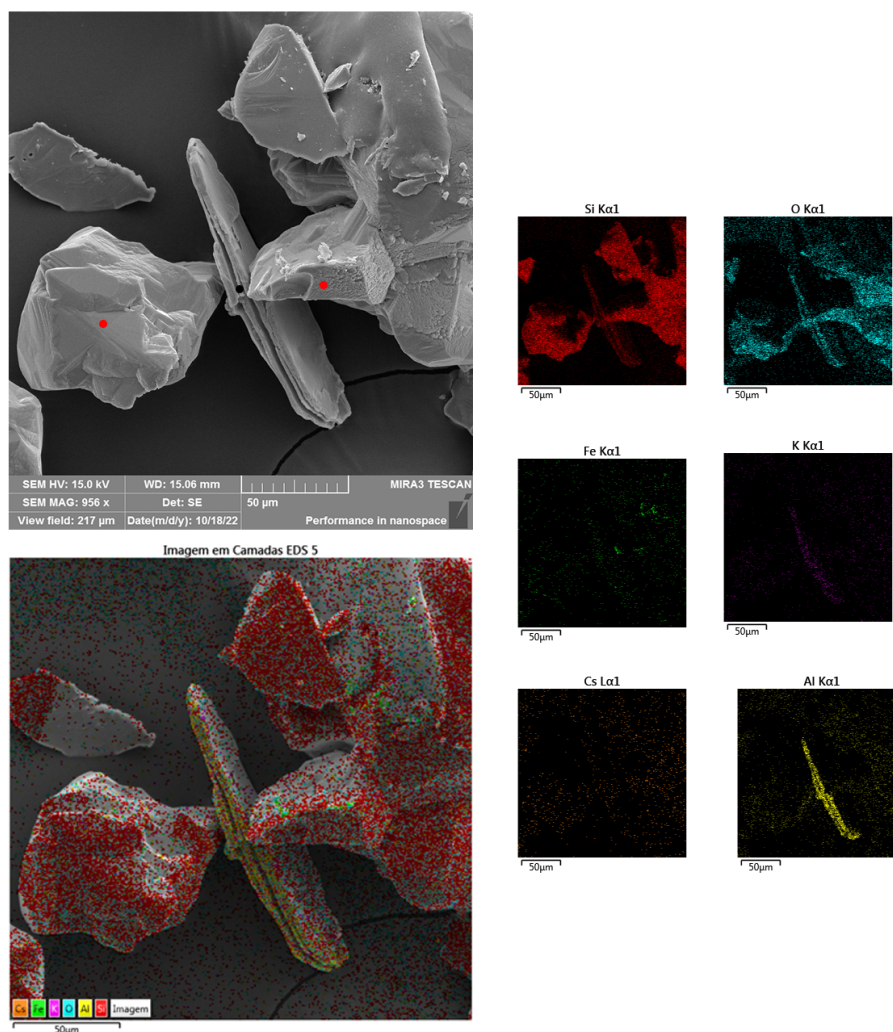
Esta mudança na apresentação se justifica porque para avaliar a presença dos elementos K e Al com a presença da Muscovita calculamos a razão K/Al, onde partimos da estequiometria ideal do mineral Muscovita: de 9,81 % de K e 20,3 % de Al, de acordo com 55, cuja razão é de 0,48. E com base nessa razão, comparamos com a razão encontrada pelo mapeado por EDS através do MEV. Esta razão foi escolhida porque a amostra apresenta grande quantidade de Quartzo e o Si não poderia ser utilizado, pois está presente nos dois minerais. Nas outras amostras, do perfil V3 e V5, não foi possível realizar uma análise quantitativa da mesma forma apresentada aqui porque as amostras contêm mais fases cristalinas, assim a composição elementar de cada mineral interfere uma nas outras tornando uma análise deste tipo inviável.

Tabela 7 – Resultado da análise do mapeamento por EDS da região da Figura 5.27, amostra V8 3-10.

Elemento	Percentagem em peso (Wt %)	Desvio padrão (Wt %)
O	52,0	0,3
Al	11,3	0,1
Si	30,4	0,3
K	4,4	0,1

Na Figura 5.27 indicamos com um ponto preto a região compreendida como sendo possivelmente uma Muscovita, devido a concentração de Al e K, além do O não indicado na imagem. Enquanto que nas regiões indicadas com pontos em vermelho indicamos como sendo possivelmente o mineral Quartzo, pois possuem apenas Si na sua grande maioria. Outros indicativos destes minerais são seus formatos, enquanto a região indicada com ponto preto Muscovita apresenta um formato claramente laminar observado em suas extremidades, característica da Muscovita, as regiões indicadas como pontos vermelhos são granulares e são característica do Quartzo. No entanto, a razão K/Al encontrada nesse mapeamento por EDS foi de 0,39, uma subestimação de 18,75 %, para o valor referenciado de acordo com a estequiometria ideal.

Figura 5.28 – Micrografia de MEV-FEG e mapeamento por EDS da amostra Areia 3-10 cm. Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados (Si, Al, Fe, K, O e Cs) no mapeamento por EDS e na coluna da esquerda a região com ampliação de 50 μm e abaixo a mesma região com o mapeamento por EDS. Os pontos marcados na micrografia localizam a região ocupada por um mineral: ponto vermelho – Quartzo, ponto preto – Muscovita.



Fonte: O autor.

Tabela 8 – Resultado da análise quantitativa do mapeamento por EDS da região da Figura 5.28, amostra Areia 3-10cm.

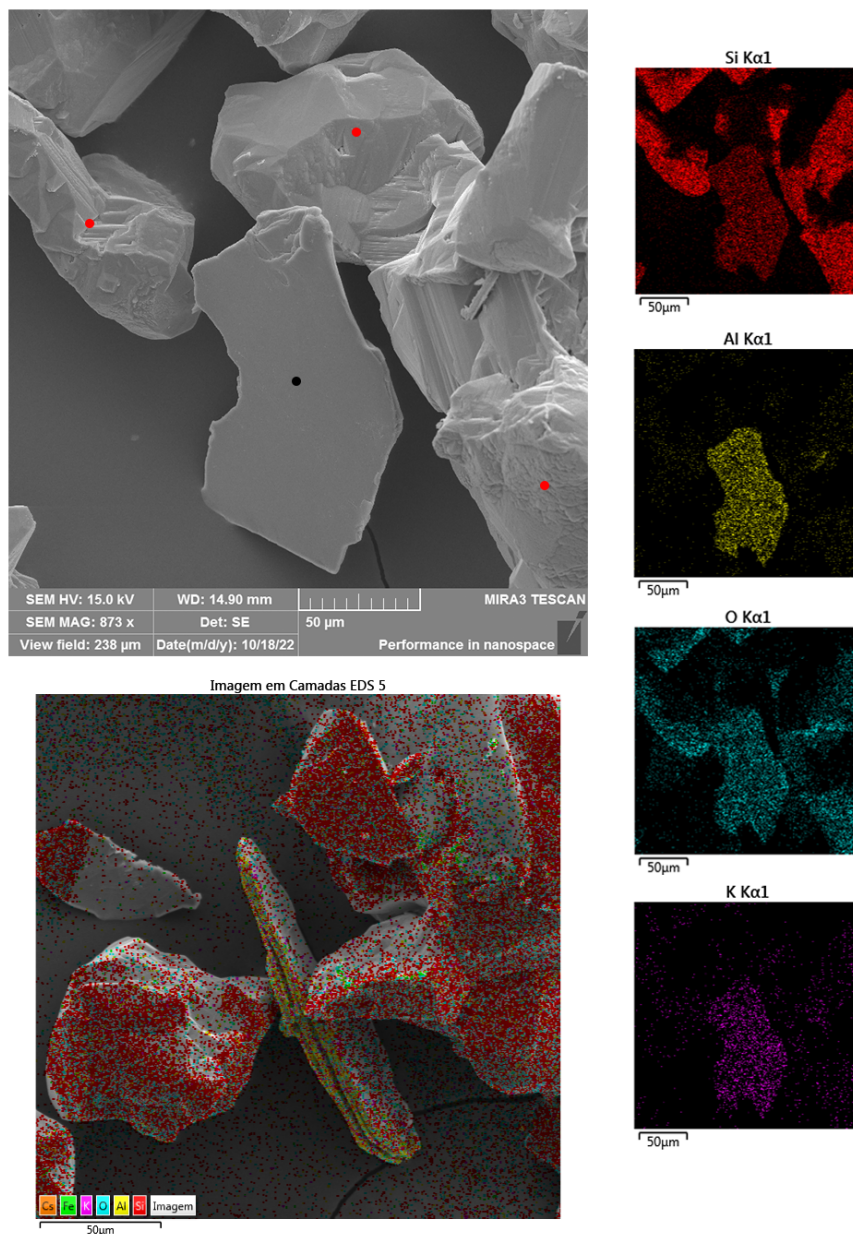
Elemento	Percentagem em peso (Wt %)	Desvio padrão (Wt %)
O	52,4	0,5
Al	1,9	0,1
Si	43,2	0,4
K	0,7	0,1

Fonte: O autor.

Na Figura 5.28, podemos ver com clareza o comportamento laminar do que é pos-

sivelmente a Muscovita, além de podermos observar os grãos de Quartzo, regiões indicadas com pontos vermelhos. Também observamos outras placas ao fundo da imagem, que não foram detectadas no mapeamento por EDS, porém possuem formato semelhante as formas laminares de Muscovita. Neste mapeamento por EDS o percentual de Al e K medido foi baixo, devido à área pequena de exposição da região indicada pelo ponto preto da Muscovita, porém, a razão K/Al nesse local foi 0,37. Assim, houve também uma subestimação de 22,9 % quando comparamos com o valor esperado. Além disso, também chama atenção a presença do Cs nessa micrografia, observado pelo mapeamento por EDS, um forte indicativo de que ocorreu a substituição isomórfica na Muscovita. Entretanto, o elemento Cs apareceu em baixa concentração, e não foi possível quantificar sua intensidade.

Figura 5.29 – Micrografia de MEV-FEG e mapeamento por EDS da amostra Areia 3-10 cm . Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados (Si, Al, O e K) no mapeamento por EDS e na coluna da esquerda a região com ampliação de 50 μm e abaixo a mesma região com o mapeamento por EDS. Os pontos marcados na micrografia localizam a região ocupada por um mineral: ponto vermelho – Quartzo, ponto preto – Muscovita.



Fonte: O autor.

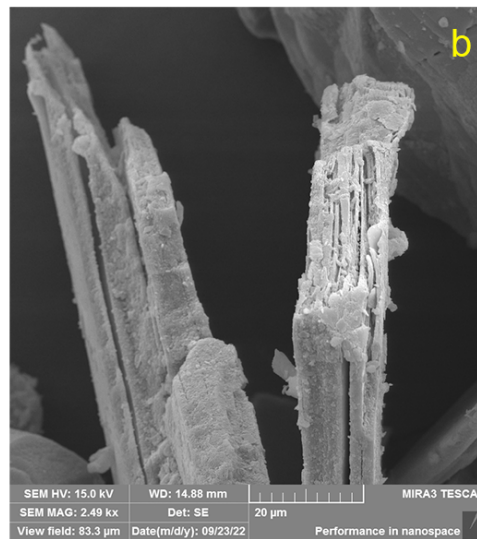
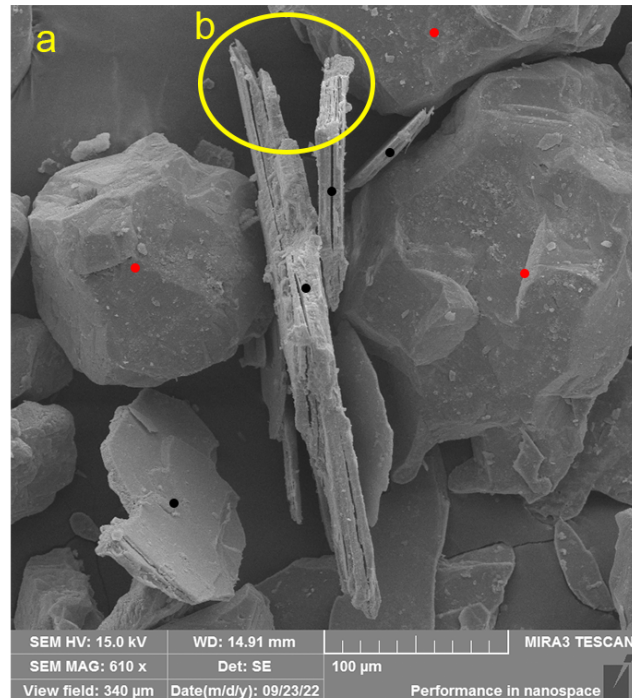
Tabela 9 – Resultado da análise do mapeamento por EDS da região da Figura 5.29, amostra Areia 3-10cm.

Elemento	Porcentagem em peso (Wt %)	Desvio padrão (Wt %)
O	51,6	0,5
Al	5,9	0,2
Si	40,1	0,4
K	2,4	0,2

Fonte: O autor.

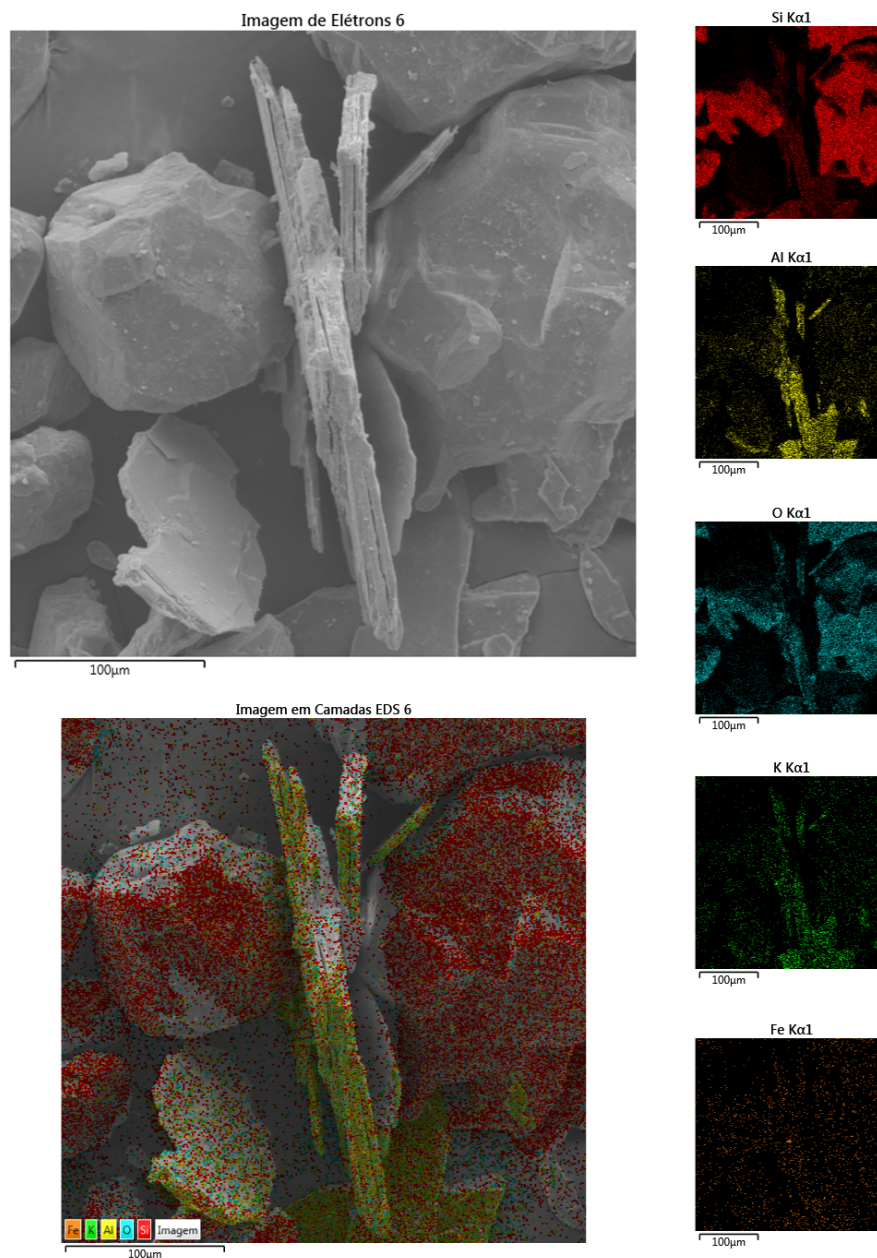
Na Figura 5.29, vemos a superfície lisa e plana da Muscovita, região indicada com ponto preto. Além disso, notamos que o formato da Muscovita é semelhante com os mostrados anteriormente, isso reforça que temos o mineral muscovita nestas amostras do perfil V8. Também, nas regiões com pontos preto, observamos grãos de Quartzo. E com base no mapeamento por EDS obtemos a razão K/Al foi de 0,4. Novamente houve uma subestimação de 17 % comparado com o valor esperado.

Figura 5.30 – Micrografia da TFSA da amostra V8 10-20. Indicada na figura a região (a) com escala de 100 μm e sua região de destaque (b) com escala de 20 μm . Os pontos marcados na micrografia acima localizam a região ocupada por um mineral: ponto vermelho – Quartzo, ponto preto – Muscovita.



Fonte: O autor.

Figura 5.31 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na 5.30. Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados na região, a saber: Si, Al, O, K e Fe, e na coluna da esquerda a região mapeada e abaixo a esma região com o mapeamento por EDS.



Fonte: O autor.

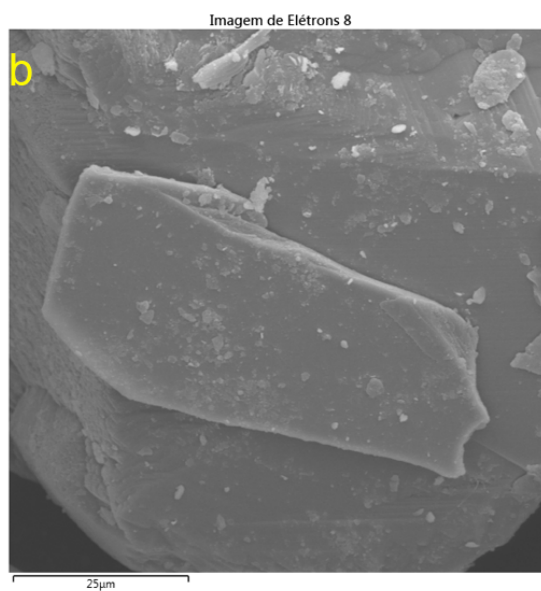
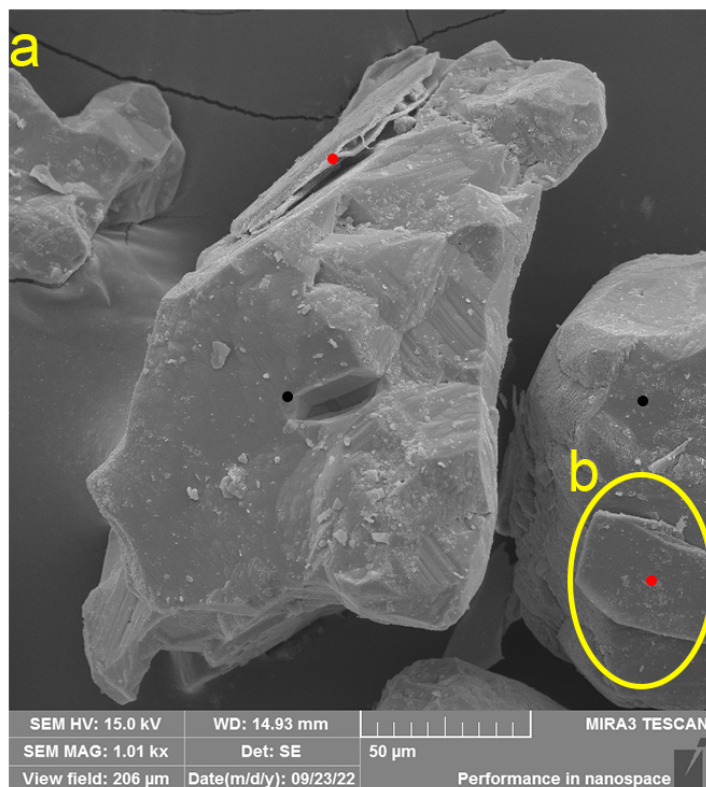
Tabela 10 – Resultado da análise do mapeamento por EDS da região da Figura 5.30, amostra V8 10-20.

Elemento	Percentagem em peso (Wt %)	Desvio padrão (Wt %)
O	52,5	0,3
Al	4,9	0,1
Si	39,4	0,3
K	1,88	0,09

Fonte: O autor.

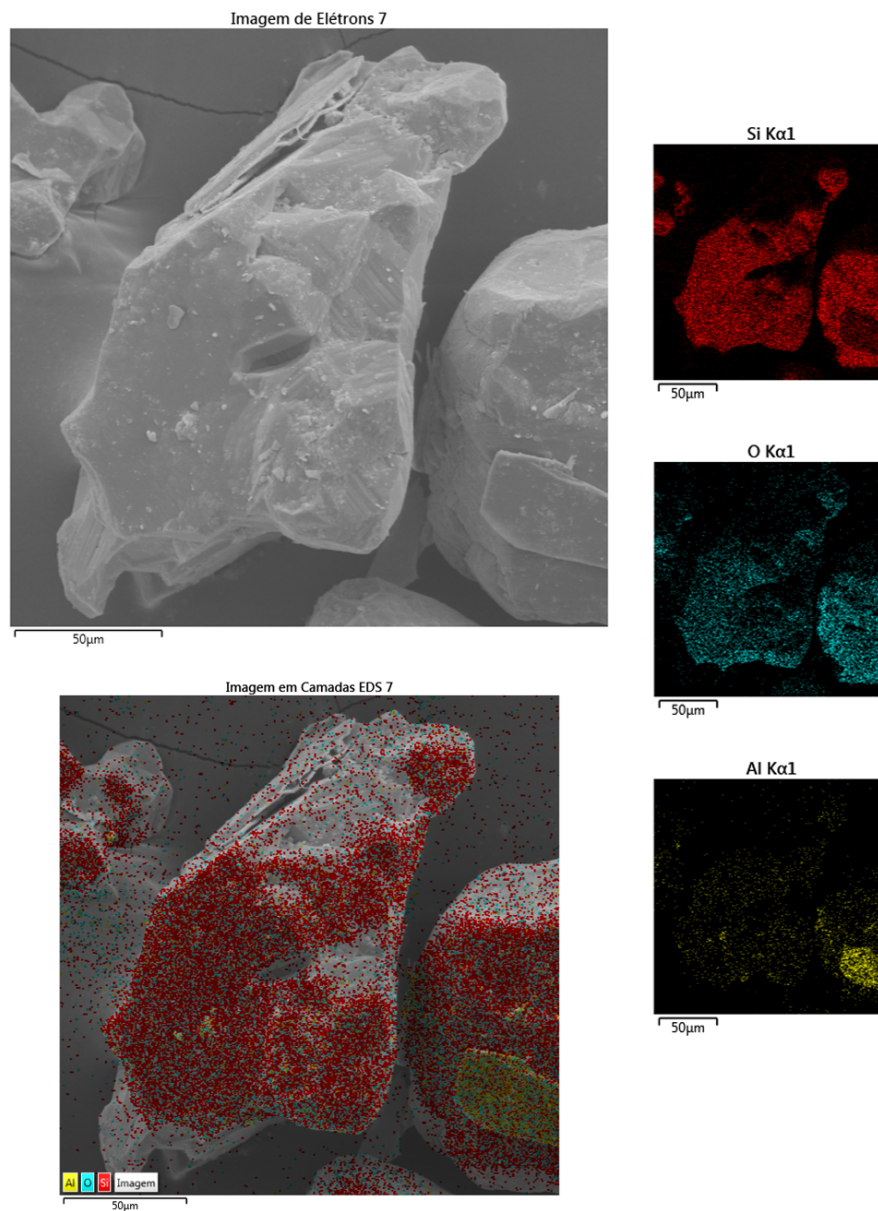
Na Figura 5.30, podemos ver os grãos de Quartzo, regiões indicadas com pontos vermelhos e suas formas granulares. Além disso, podemos observar uma grande quantia de lâminas de Muscovita, regiões indicadas com ponto vermelhos. E na região ampliada evidenciamos o formato lamelar característico do mineral Muscovita. Notamos que o mapeamento por EDS nessa região forneceu a razão de Al e K de 0,38, novamente uma subestimação de 21 %.

Figura 5.32 – Micrografia de MEV da amostra V8 10-20. (a) Micrografia da região com escala de 50 μm . (b) Região ampliada indicada em (a) com escala de 25 μm . Os pontos marcados na micrografia localizam a região ocupada por um mineral: ponto vermelho – Muscovita, ponto preto – Quartzo.



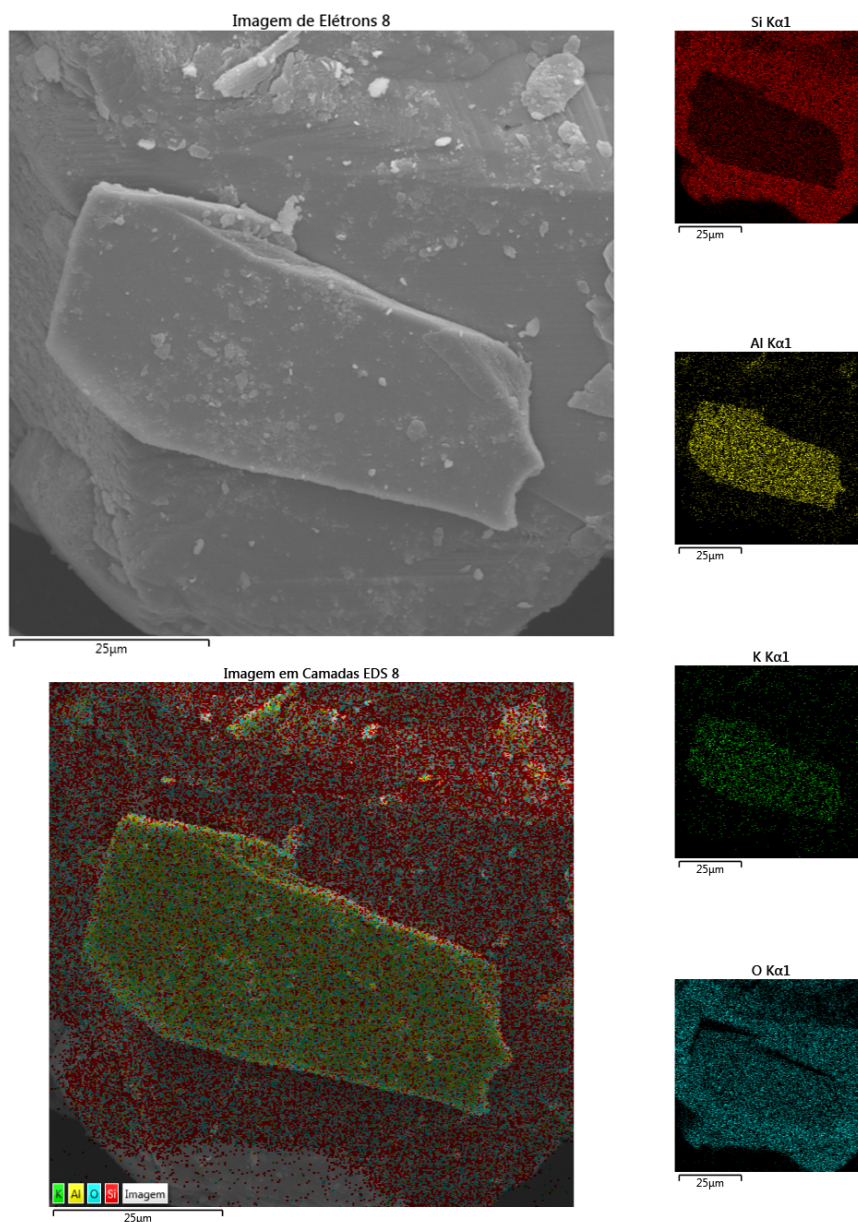
Fonte: O autor.

Figura 5.33 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (a) apresentada na Figura 5.32. Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados na região, a saber: Si, O e Al, e na coluna da esquerda a região mapeada e abaixo a esma região com o mapeamento por EDS.



Fonte: O autor.

Figura 5.34 – Mapeamento por EDS que contém a região da micrografia da região (b) apresentada na Figura 5.32. Na coluna da direita indicamos os elementos encontrados na região, a saber: Si, O e Al, e na coluna da esquerda a região mapeada e abaixo a esma região com o mapeamento por EDS.



Fonte: O autor.

Tabela 11 – Resultado quantitativo da análise do mapeamento por EDS da região da Figura 5.34, amostra V8 10-20.

Elemento	Percentagem em peso (Wt %)	Desvio Padrão (Wt %)
O	54,4	0,3
Al	5,7	0,1
Si	37,6	0,3
K	2,4	0,1

Fonte: O autor.

Na Figura 5.32 (a) notamos grãos de Quartzo, regiões indicadas com pontos vermelhos, e pequenas placas de Muscovita, regiões indicadas com pontos pretos. As formas dos dois minerais são semelhantes Ao que observamos nas análises anteriores. E na Figura 5.32 (b) vemos uma placa de hábito lamelar de Muscovita, bem definida e com a superfície inteira sendo mostrada na imagem. Essa é uma medida importante, pois é possível ver com clareza seu formato, a superfície lisa e como ela está colocada sobre um grão de Quartzo.

No mapeamento por EDS que apresentamos na Figura 5.32 (c), vemos que pela ampla área só foi identificado Si e Al, Porém com o mapeamento por EDS que apresentamos na Figura 5.32 (d) notamos que a placa, região indicada com ponto preto e marcada para ampliação em (a), é uma Muscovita, uma vez que tem em sua composição também o K, e ao determinarmos a razão K/Al obtemos o valor de 0,42, uma subestimação de 12,5 % do valor esperado.

5.4 Resultados Gerais

As densidade de partículas apresentaram valores médios entre as profundidades de: $2,658 \pm 0,004 \text{ g/cm}^3$ no perfil V3, com uma diferença percentual de 4,3 % do resultado obtido por 15; $2,60 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$ no perfil V5, com uma diferença percentual de 4 % do resultado obtido por 15; e de $2,65 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ para o perfil V8, com uma diferença percentual de 4,33 % do resultado obtido por 15. Essas diferenças percentuais podem ser explicadas pela diferença entre os métodos de análise utilizados, e, também, pela diferença entre as profundidades de cada perfil.

Determinamos a classe textural dos três perfis estudados, a saber: V3 4-60 foi classificado como Franco Argilosa e V3 60+ foi classificado como Argila, 15 classificou o perfil V3 como sendo Argiloso, ambas profundidades; o perfil V5 foi classificado nesse trabalho como Franco Arenoso, nas duas profundidades analisadas, que também foi a classificação textural obtida por 15 na profundidade de 0-25 cm; e o perfil V8 foi classificado como Areia, em ambas profundidades, enquanto 15 classificou como Arenosa na profundidade analisada.

Pela composição química elementar notamos uma predominância de Si e Al em todos os perfis analisados, com destaque também para o K, Fe e Ti, que são elementos comuns de encontrar em solos brasileiros. No perfil V3, observamos a predominância de elementos comuns de encontrar em Quartzitos, o Al, Si e Fe, além do K e Ti, que encontramos em Micas. No perfil V5, notamos principalmente teores em maior quantidade de Si, Al e K, principais elementos encontrados em Micas, e o Fe, que apareceu em um teor abaixo dos demais, porém devido ao seu peso elementar deve ser considerado. No perfil V8, notamos os elementos Si, Al e K, em altos teores, destamos que estes elementos são encontrados em Micas, além deles reforçamos a existência do Cs, elemento raro de encontrar na natureza.

Os principais minerais que encontramos nos três perfis são os minerais que compõem o material de origem, ou seja, Quartzito e Micaxisto. Assim, no perfil V3, encontramos os seguintes minerais Muscovita, Caulinita, Gibbsita, Anatásio, Hematita e Quartzo. No perfil V5 foi identificado os seguintes minerais Muscovita, Caulinita, Anatásio e Quartzo. No perfil V8,

encontramos os minerais Muscovita e Quartzo. Dentre esses minerais encontrados, destaca-se a Muscovita, onde foi encontrada nos três perfis analisados, com possibilidade da ocorrência de substituição isomórfica.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, para os três perfis de solos estudados do PESD, determinamos a densidade de partículas e a textura do solo, parâmetros físicos, a composição química elementar, a mineralogia e aspectos morfológicos das partículas. Além disso, pudemos comparar e corroborar com o trabalho de 15 no sentido de fornecer mais informações das características dos solos do PESD.

Com base no presente estudo e caracterização, notamos que: o perfil V3, classificado como CAMBISSOLO, tem em sua composição mineral a maior variedade como Gibbsita, Caulinita, Muscovita, Anatásio, Goethita, Calcita e Hematita; o perfil V5, classificado como NEOSSOLO, tem em sua composição os minerais Muscovita, Caulinita, Gibbsita, Anatásio e Quartzo, e tem a proximidade dos percentuais granulométricos entre as profundidades, ou seja, é mais uniforme conforme o aumento da profundidade em relação a textura; o perfil V8, também NEOSSOLO, é o solo menos intemperizado dentre os analisados porque ele apresentou predominantemente dois minerais, Muscovita e Quartzo, em sua composição mineral, que são minerais primários, e sua classificação textural foi Areia, sem a presença de argila. Por fim, este estudo e caracterização refletem a geodiversidade local e a influência das rochas do Grupo Araxá na formação do PESD.

Em relação a trabalhos futuros podemos elencar duas possibilidades para continuarmos os estudos com estes três perfis: a realização da quantificação da composição mineral com o uso do Método de Rietveld para os três perfis; investigar a possível substituição isomórfica do K por Cs em Muscovita, uma vez que o Cs apareceu principalmente no perfil V8, e identificamos o mineral Muscovita nos três perfis analisados.

REFERÊNCIAS

- 1 MACHADO, G.; JUNIOR, E. F. Geodiversidade, geoconservação e geoturismo: Uma discussão sobre a valoração e a conservação do patrimônio natural. *Okara: Geografia em Debate*, v. 15, n. 2, p. 125–147, 2021.
- 2 SILVA, C. *Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado para entender o presente e prever o futuro*. [S.l.]: Companhia De Pesquisa De Recursos Minerais - Cprm, 2008. 264 p.
- 3 FILHO, R. d. F. P. *Inventário e avaliação da geodiversidade no município de Goiás e Parque Estadual da Serra Dourada*. Dissertação (mestrado em geografia) — Universidade Federal de Goiás, 2014.
- 4 NAVARRO, G.; ZANARDO, A.; CONCEIÇÃO, F. O grupo araxá na região sul-sudoeste do estado de goiás. *Geologia USP. Série Científica*, v. 13, p. 5–28, 06 2013.
- 5 SIMÕES, L. S. A. *O Grupo Araxá na região de Mossâmedes-Goiás, e as ocorrências minerais associadas*. 219 p. Dissertação (Mestrado em geografia) — Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, 1984.
- 6 NASCIMENTO, M. A. L. do. Geomorfologia do estado de goiás. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 12, n. 1, p. 01–22, 1992.
- 7 CASSETI, V. *Geomorfologia*. 2005. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia>>. Acesso em: 12 de nov de 2023.
- 8 DARDENNE, M. A. The brazilia fold belt. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ, A. F.; CAMPOS, D. A. *Tectonic evolution of South America*. [S.l.]: Rio de Janeiro: SBG, 2000. p. 231–236.
- 9 HILLEL, D. *Introduction to environmental soil physics*. [S.l.]: Elsevier, 2003.
- 10 BERTONI J.; LOMBARDI NETO, F. Recursos naturais de caráter renovável. In: BERTONI, J. *Conservação do Solo*. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008. p. 27–36.
- 11 ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V. d.; ROCHA, W. S. D. d. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. *Química e mineralogia do solo-Parte I: Conceitos básicos*, v. 2, 2009.
- 12 NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. G.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. *Fertilidade do Solo*. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 133–204.
- 13 MOORE, D. M.; JR, R. C. R. et al. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. *Oxford University Press (OUP)*, 1989.
- 14 WHITTIG L. D.; ALLARDICE, W. R. X-ray diffraction techniques. In: PAGE, A. L. *Methods of soil analysis*. Madison, Wis: American Society of Agronomy Soil Science Society of America, 1982. p. 331–362. ISBN 0-89118-072-9.
- 15 MOMOLI, R. S. et al. Conservação dos solos e ecoturismo no parque estadual da serra dourada, goiás. *GEOGRAFIA*, UNESP - Universidade Estadual Paulista, v. 46, n. 1, p. 1–21, aug 2021. ISSN 0100-7912.

- 16 KER, J. *Pedologia : Fundamentos*. Viosa - Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo, 2015. ISBN 9788586504099.
- 17 LEPSCH, I. F. *19 lições de pedologia*. [S.l.]: Oficina de textos, 2021.
- 18 FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: VAN LIER, Q. J. *Física do Solo*. Viosa (MG): Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo, 2010. cap. 1. ISBN 9788586504068.
- 19 DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. An introduction to the rock-forming minerals. In: DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. [S.l.]: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2013. cap. Layered Silicates, p. 174–180.
- 20 QUOOS, J. H. *Triângulo Textural*. [S.l.]: Insituto Federal de Santa Catarina, 2019. Disponível em: <https://docente.ifsc.edu.br/joao.quoos/textura_solo/textura.html>. Acesso em: 22 de set de 2024.
- 21 RESENDE, M. et al. *Mineralogia de Solos Brasileiros: interpretações e aplicações*. Lavras - MG: Editor Ufla, 2011. ISBN 9788587692962.
- 22 SANTOS, H. G. dos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. [S.l.]: Embrapa, 2018.
- 23 RÊGO, L. G. D. S. et al. Mineralogia de solos sob florestas estacionais decíduais na região norte de minas gerais. In: *Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*. [S.l.]: Nucleo Regional Nordeste da SBCS, 2015.
- 24 TEIXEIRA, W. et al. *Decifrando a terra*. [S.l.]: São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.
- 25 PRESS FRANK E GROTZINGER, J. e. J. T. Minerais: constituintes básicos das rochas. In: PRESS, F.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. *Para Entender a Terra*. [S.l.]: Bookman Editora, 2006. cap. 3, p. 77–100.
- 26 BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. Introdução à difração de raios-xem cristais. *Universidade Federal do Ceará*, p. 1–20, 2000.
- 27 BRIGANTI, L. *Estudos estruturais e biofísicos de enzimas degradadoras de hemicelulose visando suas aplica  es na biotecnologia industrial*. 199 p. Tese (Doutorado em ciências) — Universidade de São Paulo, 04 2021.
- 28 NESSE, W. D. *Introduction to mineralogy*. [S.l.]: New York: Oxford University Press, 2000.
- 29 NARDY, A. J. R. *Mineralogia   ptica*. 2010. Disponível em: <<http://www1.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/T4.pdf>>. Acesso em: 12 mai de 2023.
- 30 TEIXEIRA, P. C. et al. *Manual de métodos de análise de solo*. [S.l.]: Brasília, DF: Embrapa Brasil, 2017. 21-27 p.
- 31 HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. *Física. 5   edi  o*. [S.l.]: Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2004.
- 32 BITTENCOURT, T. d. M. G. *Pré-processamento digital de imagens obtidas na faixa espectral do infravermelho distante*. Disserta  o (Mestrado em engenharia) — Universidade de São Paulo, 2012.

- 33 SMITH, E.; DENT, G. *Modern Raman spectroscopy: a practical approach*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.
- 34 GRIFFITHS, P. R. Introduction to vibrational spectroscopy. *Handbook of vibrational spectroscopy*, Wiley Online Library, 2006.
- 35 NAKAMOTO, K. *Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds, part B: applications in coordination, organometallic, and bioinorganic chemistry*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- 36 STEVENSON, F. J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1994.
- 37 STUART, B. H. *Infrared spectroscopy: fundamentals and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- 38 SCHARDOSIN, J. *Caracterização da matéria orgânica humificada (ácido húmico) de solo por técnicas espectroscópicas, análise térmica e microscopia eletrônica*. Dissertação (Mestrado em ciências) — Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2018.
- 39 CLARO, P. R. Espectroscopia vibracional. *Revista de Ciência Elementar*, v. 6, Jun 2018.
- 40 CANELLAS, L.; VELLOSO, A. X.; SANTOS, G. de A. Modelos estruturais de substâncias húmicas. *Humosfera: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas. Seropédica e Campos dos Goytacazes: UENF*, p. 34–53, 2005.
- 41 FARMERED, V. The infrared spectra of minerals, mineralogical society. *Adlard & Son, Surrey, UK*, 1974.
- 42 WIERTEL, T. C. et al. Caracterização qualitativa da terra fina seca ao ar e das respectivas frações granulométricas de um latossolo por espectroscopias. In: UEPG (Ed.). *Encontro Anual de Iniciação Científica*. Ponta Grossa: [s.n.], 2019.
- 43 WHITNEY, D. L.; EVANS, B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, Mineralogical Society of America, v. 95, n. 1, p. 185–187, dec 2009.
- 44 HUBBELL, S. P. Neutral theory and the evolution of ecological equivalence. *Ecology*, Wiley Online Library, v. 87, n. 6, p. 1387–1398, 2006.
- 45 SCHOWALTER, T. Arthropod diversity and functional importance in old-growth forests of north america. *Forests*, MDPI, v. 8, n. 4, p. 97, 2017.
- 46 CULLITY, B. D.; SMOLUCHOWSKI, R. *Elements of X-ray Diffraction*. [S.l.]: American Institute of Physics, 1957. v. 10. 50–50 p.
- 47 GÜNTHER, H. *NMR spectroscopy: basic principles, concepts and applications in chemistry*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- 48 JENKINS, W. *X-Ray Fluorescence*. 2. ed. John Wiley & Sons, 1999. ISBN 0471299421. Disponível em: <https://www.ebook.de/de/product/3599841/jenkins_winefordner_x_ray_fluorescence_2e.html>.
- 49 JONES, A. A. X-ray fluorescence spectrometry. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, Wiley Online Library, v. 9, p. 85–121, 1983.

- 50 PARREIRA, P. S. *Metodologia de EDXRF e aplicações com um sistema portátil*. 1. ed. [S.l.]: LFNATEC - Publicação Técnica do Laboratório de Física Nuclear Aplicada, 2006. v. 10.
- 51 WIERTEL, T. C. *Composição Mineral da Fração Argila de Amostras de um Latossolo pelo Método de Rietveld com Dados de Difração de Raios X*. [S.l.], 2020.
- 52 TELES, V.; ANDREANI, L.; VALADARES, L. Uso de microscopia de luz e eletrônica como técnicas de análise morfológica. *Embrapa*, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2017., 2017.
- 53 ROCHA, J. E. N. D. *Sistema Inteligente de Diagnósticos Energéticos e de Análise de Investimentos em Projetos de Eficiência Energética Gerenciados pelo Lado da Demanda*. Tese (Doutorado em engenharia) — PUC-Rio, 2013.
- 54 PRANDEL, L. V. *Integração de Métodos de Caracterização Mineralógica de Solos Cauliníticos*. Tese (Doutorado em ciências) — Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2015.
- 55 RICHARDSON, S. M.; RICHARDSON, J. W. Crystal structure of a pink muscovite from Archer's Post, Kenya: implications for reverse pleochroism in dioctahedral micas. *American Mineralogist*, v. 67, n. 1-2, p. 69–75, 02 1982. ISSN 0003-004X.
- 56 FRANK, H. T. *CALCITA – CaCO₃*. [S.l.]: Departamento de Mineralogia e Petrologia - UFRGs, 2024. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/minmicro/Calcita.pdf>>. Acesso em: 20 ago de 2024.
- 57 RELOSI, N. et al. Effect of addition of clay minerals on the properties of epoxy/polyester powder coatings. *Polímeros*, v. 28, p. 355–367, 09 2018.
- 58 MOHAMED, A. et al. Size effect of hematite particles on the cr(vi) reduction by shewanella oneidensis mr-1. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 2, p. 105096, 2021. ISSN 2213-3437.
- 59 SANTOS, J.; COSTA, M.; SILVA, J. F. a contribuição da formação barreiras como fonte dos sedimentos dos manguezais e de fundo do rio marapanim na região de marapanim (pa) com base na assinatura de minerais pesados. *BOLETIM DO MUSEU DE GEOCIÊNCIAS DA AMAZÔNIA*, Boletim do Museu de Geociencias da Amazonia, v. 8 (2021), n. 1, p. 1–34, maio 2021. ISSN 2594-942X.
- 60 MICHELON, C. J. et al. Densidade e porosidade do solo. In: VAN LIER, Q. J. *Física do Solo*. first. [S.l.]: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2023. cap. 4.
- 61 BIRKELAND, P. W. *Soils and geomorphology*. third. [S.l.]: Oxford University Press, 1984. 448 p.
- 62 LUZ, A. B. d.; COSTA, M. J. Feldspato. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. *Rochas & minerais industriais: usos e especificações*. [S.l.]: CETEM/MCT, 2005. cap. 19, p. 427–451.
- 63 MCKINLEY, J. et al. X-ray microprobe analysis of cs-containing micas from hanford, washington. *Argonne National Laboratory*, 2018.