

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E DIAGENÉTICA DO PALEÓGENO DA
BACIA DE SÃO PAULO**

ANA CAROLINA ALVES DA COSTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro
Rio Claro-SP
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Ana Carolina Alves da Costa

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E DIAGENÉTICA DO
PALEÓGENO DA BACIA DE SÃO PAULO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Geociências e Meio
Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang
Coorientadora: Dra. Marcia Regina Stradioto

Rio Claro - SP
2025

Costa, Ana Carolina Alves da

C837c Caracterização petrográfica e diagenética do Paleógeno da Bacia de
São Paulo / Ana Carolina Alves da Costa. -- Rio Claro, 2025

154 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Chang Hung Kiang

Coorientadora: Marcia Regina Stradioto

1. Bacia de São Paulo. 2. Formação São Paulo. 3. Formação
Resende. 4. Diagênese. 5. Eodiagênese. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA¹

Este estudo aprofunda o conhecimento petrográfico e diagenético da Bacia de São Paulo, suprimindo lacunas na literatura acadêmica. A pesquisa fornece subsídios para o entendimento das características texturais, mineralógicas e composicionais dos aquíferos que compõem a bacia. Ao apresentar subsídios técnicos detalhados, o trabalho contribui diretamente para a gestão sustentável dos recursos hídricos, alinhada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6.

¹ De acordo com a Portaria UNESP 117-2022 e Instrução AT-PROPG N°02 (22/12/2022), passa a ser recomendado que todas as dissertações e teses, defendidas a partir dessa data apresentem uma descrição do impacto esperado relacionado aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study deepens the petrographic and diagenetic knowledge of the São Paulo Basin, filling gaps in the academic literature. The research provides a basis for understanding the textural, mineralogical, and compositional characteristics of the basin's aquifers. By presenting detailed technical insights, this work directly contributes to the sustainable management of water resources, aligned with Sustainable Development Goal (SDG) 6.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Ana Carolina Alves da Costa

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E DIAGENÉTICA DO PALEÓGENO DA BACIA DE SÃO PAULO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. CHANG HUNG KIANG
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Profa. Dra. LUCY GOMES SANT’ANNA
EACH / USP/São Paulo (SP)

Prof. Dr. SERGIO CAETANO FILHO
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Conceito: Aprovado

Rio Claro (SP), 1 de outubro de 2024.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível graças à colaboração de diversas pessoas e instituições que tornaram este caminho, muitas vezes solitário, em uma jornada mais fácil e gratificante.

Inicialmente, agradeço ao meu orientador, professor Chang Hung Kiang, pela oportunidade, apoio e, sobretudo, por contribuir de maneira fundamental na construção da minha identidade como pesquisadora. Minha gratidão também a minha coorientadora, “Marcinha”, que esteve ao meu lado incansavelmente, todos os dias, durante esses dois anos de mestrado, sempre me lembrando que eu era capaz, mesmo nos dias mais difíceis.

Aos meus pais, que sempre colocaram meus estudos em primeiro lugar e me apoiaram na realização deste mestrado, à minha irmã e à toda família, o meu muito obrigado.

A todos os meus colegas do Laboratório de Análises de Bacias (LEBAC), em especial a Barbara, Felipe e Pedro, que estiveram presentes nos momentos mais inesperados, sempre me apoiando e me motivando. Ao Marcos, pela colaboração em campos e pelas risadas durante as viagens. Ao LEBAC, pelo suporte e oportunidade.

Aos amigos que estiveram próximos durante o mestrado, especialmente ao Luis Locatelli e à Julya Paes, que acompanharam de perto a elaboração deste trabalho e muitas vezes contribuíram, cada um à sua maneira.

À Maria Rita Caetano Chang pelas cuidadosas correções.

Agradeço a UNESPetro, em especial ao Hermes, pela colaboração e preparação das amostras para o MEV, ao Carlos, pela confecção das lâminas delgadas, e ao Iata, pelo auxílio na elaboração das análises de difrações de raio X.

À Luana Fernandes que, representando a FX Fundações, foi fundamental no contato com a Companhia Do Metropolitano de São Paulo (METRÔ) e as extrações de areia Taboão e Itaquareia, além de sua valiosa participação nos trabalhos de campo.

À Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRÔ), pela cooperação e disponibilização dos dados e amostras essenciais para a elaboração deste projeto. Em especial ao geólogo Marcelo Denser Monteiro, que não mediu esforços para me auxiliar em tudo que fosse necessário.

Às extrações de areia Taboão e a Itaquareia, pela oportunidade de coleta de amostras em suas frentes de lavra.

Ao programa de pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente (IGCE-UNESP), pela oportunidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - processo nº 130896/2022-5.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Sonhe grande

Mire distante

Lute com bravura

E, na dúvida, lembre-se:

Você está certa

(Histórias de ninar para garotas rebeldes)

RESUMO

A Bacia de São Paulo é uma pequena bacia paleógena localizada na porção sudeste do Estado de São Paulo, abrangendo parte significativa da Região Metropolitana de São Paulo. Este trabalho teve como objetivo principal aprofundar o conhecimento petrográfico das formações São Paulo e Resende, bem como sequenciar a evolução diagenética dos depósitos paleógenos da Bacia de São Paulo. Foram realizados estudos petrográficos qualitativos e semiquantitativos em amostras coletadas de duas extrações de areia e perfurações do Metrô, permitindo a individualização das formações e a identificação de uma sequência diagenética detalhada. Os resultados petrográficos indicam que os arenitos das formações São Paulo e Resende são classificados majoritariamente como arcóseos e subarcóseos, com diferenças texturais e composicionais significativas entre eles. A análise diagenética revelou que a bacia foi submetida a processos diagenéticos rasos e de baixa intensidade, sem evidências de condições de mesodiagênese ou telodiagênese. O presente estudo contribui para um melhor entendimento das características texturais e mineralógicas dos aquíferos que compõem a Bacia de São Paulo.

Palavra-chave: Bacia de São Paulo, Formação São Paulo, Formação Resende, Diagênese, Eodiagênese.

ABSTRACT

The São Paulo Basin is a small Paleogene basin located in the southeastern part of the State of São Paulo, extending along the Alto Tietê region and covering significant parts of the São Paulo metropolitan area. This study primarily aimed to increase the petrographic understanding of the São Paulo and Resende Formations, as well as to describe the diagenetic evolution of the São Paulo Basin as a whole. Qualitative and semi-quantitative petrographic studies were conducted on samples collected from two sand extractions and Metro drilling operations, allowing for the identification of the formations and the identification of a detailed diagenetic sequence. The results indicate that the sandstones of the São Paulo and Resende Formations can be petrographically classified mainly as arkosic and subarkosic, with significant textural and compositional differences between them. The diagenetic analysis revealed that the Basin underwent shallow and low-intensity diagenetic processes, with no evidence of mesodiagenesis or telodiagenesis conditions. The present study contribute to a better understanding of the textural and mineralogical characteristics of the São Paulo Basin aquifers.

Keywords: São Paulo Basin, São Paulo Formation, Resende Formation, Diagenesis, Eodiagenesis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de exposição da Bacia Sedimentar de São Paulo e áreas de amostragem do presente estudo. (Modificado de Almeida, 1976).	21
Figura 2 - Mapa geológico da Bacia São Paulo na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).....	24
Figura 3 - Unidades litoestratigráficas da Bacia de São Paulo.....	25
Figura 4 - Diagrama de pressão e temperatura relacionadas à diagênese (cinza), a regimes metamórficos e gradientes de pressão e temperatura típicos da crosta terrestre	30
Figura 5 - Esquema de rearranjo de grãos na compactação mecânica e química.....	33
Figura 6 - Sistema de Classificação de unidades geológico-geotécnicas utilizadas pela Companhia Do Metropolitano de São Paulo	38
Figura 7 - Microscópio de luz polarizada e esquema do sistema de geração de imagem	40
Figura 8 - Representação esquemática dos componentes do Microscópio Eletrônico de Varredura	42
Figura 9 - Interferência entre raios	43
Figura 10 - Mapa de Localização da Extração de Areia Taboão e Itaquareia.....	45
Figura 11 - Mapa das linhas da Companhia do Metropolitano de São Paulo, com destaque para a Linha 19- Celeste (em azul), que liga Bosque Maia a Anhangabaú.....	46
Figura 12 –Afloramento da Extração de Areia Taboão, de onde foram extraídas as amostras TB-01, TB-02 e TB-03.	47
Figura 13 –Afloramento da Extração de Areia Taboão, de onde foram extraídas as amostras TB-04, TB-05 e TB-06.	48
Figura 14 –Afloramento da Extração de Areia Taboão, de onde foram extraídas as amostras TB-09,TB-10 e TB-11.	49
Figura 15- Afloramento da Extração de Areia Taboão, de onde foram extraídas as a amostras TB-12 e TB-13.	50
Figura 16 –Amostras da Extração de Areia Itaquareia, IT-01,IT-02,IT-03, IT-04, IT-05, IT06 e IT-08.	51
Figura 17 - Mapa de Localização das 131 sondagens disponibilizadas pela Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô	53
Figura 18 - Modelo de Perfil individual de sondagem disponibilizado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, referente à sondagem número 9381.	54
Figura 19 – (A) Foto representativa das amostras dos testemunhos de sondagem disponibilizadas pelo Metrô; (B) Detalhe de uma das amostras dos testemunhos de sondegens disponibilizadas pelo Metrô; (C) Fragmentos de rocha das amostras do Metrô, antes da metalização; (D) Fragmento de rocha impregnado com resina antes da confecção de lâmina (amostra MT03-18)	55
Figura 20 - Mapa de localização das sondagens selecionadas para amostragem – Seções A-B e C-D	56
Figura 21 – Perfis de amostragem sequencial das sondagens da Linha Celeste disponibilizadas pela Companhia do Metropolitano de São Paulo – Seções A-B e C-D.....	57
Figura 22 - Formação São Paulo: (A) Arcabouço característico da fácies 3Ar ₁ ; (B) Arcabouço característico da fácies 3Ar ₂ , com cimento ferruginoso ; (C) Arcabouço característico da fácies 3Ar ₁ com composição arcoseana.	65

Figura 23- Composição dos arenitos da Formação São Paulo, segundo critério de Folk (1968)	66
Figura 24 - Formação Resende: (A) Arcabouço característico dos arenitos 2Ar ₁ ; (B) Arcabouço característico dos arenitos 2Ar ₂ – amostra; (C) Arcabouço característico dos arenitos 2Ar ₃ .	68
Figura 25- Composição dos arenitos da Formação Resende segundo critérios de Folk (1974)	69
Figura 26 – (A) Grão de quartzo monocristalino; (B) Grão de quartzo policristalino; (C) Grão de quartzo com inclusão de zircão (seta branca); (D) Grão de quartzo monocristalino apresentando golfo de corrosão (seta vermelha); (E) Grão de quartzo policristalino (seta branca); (F) Grão policristalino com > 4 subgrãos; (G) Grão policristalino com >4 subgrãos de alto grau metamorfo.	71
Figura 27 - (A) Feldspato potássico muito dissolvido da Formação São Paulo representativo das amostras das Extrações de Areia; (B) Feldspato potássico parcialmente dissolvido representativo das amostras do Metrô ; (C) Microclínio; (D) Feldspato Plagioclásio	73
Figura 28 – Dissolução de Feldspato potássico em diferentes níveis observado em MEV: (A) Feldspato potássico _(FK) sem alteração, (B) Feldspato potássico parcialmente dissolvido _(FK) ; (C) Feldspato potássico _(FK) dissolvido, gerando porosidade intragranular secundária.	74
Figura 29 –(A) Fragmento lítico de argilito esmagado (seta branca), (B) Litoclasto vulcânico (seta branca)	75
Figura 30- (A) Agregado de muscovita; (B) Grão de muscovita tabular (seta branca); (C) Fotomicrografia obtida por MEV, com análise de EDS, indicando a presença de muscovita ..	75
Figura 31-Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostrando biotita na amostra MT18-27	77
Figura 32 – (A) Augita arredondada (seta branca); (B) Anfíbio (seta branca); (C) Rutilo (seta branca); (D)Turmalina (seta branca);	77
Figura 33 – Minerais opacos: (A) Pirita em grão isolado; (B) Hematita em massa; (C) Zircão (seta branca) (D) Goethita (pontilhado).	78
Figura 34 –(A) Cimentação de ferro(seta branca); (B) Matriz caulinitica (seta branca) e cimentação de ferro (seta vermelha)	79
Figura 35 - Gráfico cimentação <i>versus</i> profundidade com fotomicrografias de microscopia óptica evidenciando a diminuição da cimentação conforme a profundidade, em amostras do sondagens do Metrô.	80
Figura 36 – Fotomicrografia obtida por MEV, com destaque para o fragmento de madeira..	81
Figura 37 – (A) Porosidade secundária intergranular de dissolução de feldspatos; (B) Porosidade secundária intergranular de dissolução de feldspato; (C) Porosidade secundária por dissolução de feldspatos.	82
Figura 38 –Fotomicrografias obtidas por MEV, mostrando porosidade móldica.	83
Figura 39- Gráfico porosidade <i>versus</i> profundidade com fotomicrografias de microscopia óptica, evidenciando a diminuição da porosidade com a profundidade em amostras de arenitos de sondagens do Metrô, na Bacia de São Paulo.	84
Figura 40 – (A) Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a presença de cutícula de argila (seta branca) envolvendo grão de quartzo (Qz); (B) Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a presença de cutícula de argilominerais envolvendo grão; (C) Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a presença de lamelas de argilominerais orientadas tangencialmente à superfície do grão de quartzo(Qz) (seta branca).	86

Figura 41 – (A) Muscovita mecanicamente fraturada e deformada entre grãos de quartzo (nicois descruzados); (B) Muscovita mecanicamente fraturada e deformada entre grãos de quartzo (nicois cruzados); (C) Muscovita com terminação em leque (circulo branco;); (D) Fotomicrografia obtida por MEV de muscovita com terminação em leque.....	88
Figura 42 – (A) Litoclasto argiloso mecanicamente esmagado (nicois descruzados) (seta branca); (B) Litoclasto argiloso mecanicamente esmagado (nicois cruzados) (seta branca) (C)	88
Figura 43 – (A) Dissolução inicial em pertitas; (B) Dissolução ao longo de planos de clivagem; (C) Dissolução parcial do feldspato; (D) Dissolução acentuada, gerando porosidade intergranular.....	90
Figura 44 – Fotomicrografia obtida por MEV de feldspato potássico (K- Felds) parcialmente dissolvido, gerando porosidade secundária	91
Figura 45 – (A) Fotomicrografia obtida por MEV de albita (Alb) parcialmente dissolvida; (B) Fotomicrografia obtida por MEV de anortita (Anort) parcialmente dissolvida	92
Figura 46 – Fotomicrografia obtida por MEV, mostrando a dissolução do piroxênio augita (aug).....	94
Figura 47 – (A) Cimentação por óxido de ferro como película na superfície dos grãos e preenchendo poros; (B) Cimentação de óxido de ferro como película na superfície dos grãos; (C) Cimentação de óxido de ferro como preenchimento intergranular	95
Figura 48 – Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a cimentação de óxido de ferro.	96
Figura 49 – (A) Cimentação por hidróxido de ferro preenchendo espaços intergranulares; (B e C) Bandamento de cimentação por hidróxido de ferro; (D) Cimentação por hidróxido de ferro com diferentes intensidades.....	97
Figura 50- Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando óxido de manganês identificado por EDS	98
Figura 51 – Fotomicrografia evidenciando o crescimento secundário de quartzo (setas brancas).....	100
Figura 52 -Fotomicrografia obtida ao MEV, mostrando o crescimento secundário de quartzo com faces bem desenvolvidas. EDS indica presença de argilominerais com composição esmectítica	100
Figura 53-Fotomicrografia obtida ao MEV de sobrecrecimento de quartzo em degrais, em um mesmo grão, com faces bem desenvolvidas.....	101
Figura 54 -Fotomicrografias obtidas ao MEV de precipitação autigênica de feldspato potássico	102
Figura 55-Fotomicrografia obtida ao MEV, mostrando cimento de TiO_2 em arenito da Formação Resende.....	104
Figura 56 -Fotomicrografia obtida por MEV, evidenciando a presença de gipssita (gip)	105
Figura 57 – Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a presença de jarosita.....	106
Figura 58- Fotomicrografia obtida por MEV, evidenciando a presença de sulfetos de ferro.	107
Figura 59 - Fotomicrografia obtida por MEV, evidenciando a presença de mineral framboidal	108
Figura 60 - Fotomicrografia obtida por MEV, evidenciando a presença de Gibbsita.....	109
Figura 61 – Foto de lâmina e Fotomicrografia obtida por MEV de massas de caulinitas e caulinita tipo <i>booklets</i>	111
Figura 62 – Fotomicrografia de microscopia óptica e fotomicrografia obtida por MEV de caulinita tipo <i>booklet</i>	112

Figura 63 – (A) Fotomicrografia obtida por MEV de esmetitas com textura favo de mel; (B) Fotomicrografia obtida por MEV de esmetitas com textura tipo larval; (C) Fotomicrografia obtida por MEV de esmetita. 113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Amostras coletadas na Extração de Areia Taboão	50
Tabela 2 - Amostras coletadas na Extração de Areia Itaquareia (Unidade 3)	52
Tabela 3 - Sondagens selecionadas para amostragem e respectivas amostras	56
Tabela 4 – Parâmetros texturais utilizados na descrição das lâminas petrográficas	59
Tabela 5 – Descrição e classificação das amostras das Extrações de Areia Taboão e Itaquareia.	63
Tabela 6 – Composição percentual de Q, F e L das amostras da Formação São Paulo e nomenclatura segundo Folk (1968).	66
Tabela 7 - Composição percentual de Q, F e L das amostras da Formação Resende e respectiva nomenclatura segundo os critérios de Folk (1974).	69
Tabela 8 – Fases diagenéticas identificadas nos arenitos das Extrações de Areia Itaquareia e Taboão e dos testemunhos do Metrô da Linha 19-Celeste	115

ANEXOS

ANEXO 1 - Sondagens disponibilizadas pela Companhia do Metropolitano de São Paulo

ANEXO 2 - Banco de dados análises de difração de raio x disponibilizadas pela Companhia do Metropolitano de São Paulo

ANEXO 3 - Banco de dados análises de difração de raio-x - Taboão

ANEXO 4 - Análise de Difração de raio-x -Taboão

ANEXO 5 - Descrição das lâminas petrográficas

ANEXO 6 - Banco de dados cimentação *versus* profundidade

ANEXO 7 – Banco de dados porosidade *versus* profundidade

Sumário

1- INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivo	20
1.2 Localização da Área de Estudo	20
2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Geologia Geral	22
2.1.1 Bacia de São Paulo	22
2.1.2 Formação Resende	25
2.1.3 Formação Tremembé	26
2.1.4 Formação São Paulo	27
2.1.5 Formação Itaquaquecetuba	28
2.1.6 Coberturas Quaternárias	29
2.2 Diagênese	29
2.2.1 Eodiagênese	31
2.2.2 Mesodiagênese	32
2.2.3 Telodiagênese	36
2.3 Classificação dos litotipos por Kutner e Bjornberg (1997)	36
2.4 Técnicas Empregadas	39
2.4.1 Microscopia Óptica	39
2.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	41
2.4.3 Difração de Raios X	42
3- MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 Revisão Bibliográfica e Levantamento de Dados	43
3.2 Amostragem e Descrição Litológica	44
3.2.1 Extração de Areia Taboão	46
3.2.2 Extração de Areia Itaquareia	51
3.2.3 Companhia Metropolitana de São Paulo – METRÔ	52
3.3 Análise Petrográfica	58
3.3.1 Descrição Macroscópica	58
3.3.2 Microscopia Óptica	58
3.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura	60
3.3.4 Difratometria de Raios X	60
3.3.5 Caracterização Microscópica	62
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES	62

4.1 Caracterização Petrográfica	62
4.1.1 Composição Mineralógica e Textura dos Arenitos	64
4.1.2 Arcabouço Mineralógico e Textura dos Arenitos	70
4.2 Análise Diagenética	85
4.2.1 Infiltração de Argilas.....	85
4.2.2 Compactação	87
4.2.3 Dissolução e Geração de Porosidade Secundária.....	89
4.2.4 Cimentação.....	94
4.3 Sequência Diagenética	114
4.4 Considerações Diagenéticas sobre a Evolução dos Aquíferos da Bacia de São Paulo.	115
6. CONCLUSÃO.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

1- INTRODUÇÃO

A Bacia São Paulo é uma pequena bacia paleógena que se estende ao longo do Alto Tietê; localizada na região sudeste do Estado de São Paulo, é delimitada pela Serra da Cantareira, ao norte, e pela Serra do Mar, a sul e sudeste. Segundo Takiya (1991), a bacia apresenta espessura máxima de 290 m; engloba as principais cidades da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), também conhecida como Grande São Paulo, que inclui as regiões leste e sudeste, além das cidades de Barueri, Carapicuíba e Osasco, na região oeste, e Embu-Guaçu e Itapeverica da Serra, na região sudoeste.

Ao longo das últimas décadas do século passado, foram conduzidos estudos geológicos sistemáticos na área da bacia, destacando-se as contribuições de Almeida (1976), Coimbra, Riccomini e Melo (1983), Melo, Coimbra e Riccomini (1989); Riccomini (1989) e Takiya (1991). Estes estudos foram essenciais para o conhecimento geológico, estratigráfico e estrutural da bacia, que é formada pelas unidades: Grupo Taubaté (Formações Resende, Tremembé e São Paulo), sotoposto aos sedimentos da Formação Itaquaquacetuba e Depósitos Aluviais e Coluviais. A Bacia de São Paulo constitui o principal reservatório de águas subterrâneas da RMSP. A petrologia dos sedimentos desta bacia é, no entanto, pouco conhecida, particularmente no que se refere às fases diagenéticas que atuaram sobre seus depósitos sedimentares.

A diagênese, conjunto de processos físicos e químicos que alteram as características originais dos sedimentos após sua deposição, durante e após a litificação, desempenha um papel crucial na evolução das rochas sedimentares. As fases diagenéticas, que representam os estágios específicos desse processo, são essenciais para entender as transformações que ocorreram ao longo do tempo e que atualmente definem as características petrográficas dos sedimentos.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo aprofundar o conhecimento petrográfico e buscar sequenciar a evolução diagenética do Paleógeno da Bacia São Paulo. Estes estudos visaram suprir não somente os conhecimentos de interesse acadêmico sobre as unidades, mas também fornecer subsídios para o entendimento das características texturais e mineralógicas dos aquíferos que compõem a bacia.

1.1 Objetivo

Esta pesquisa teve por objetivo o estudo petrográfico e diagenético das unidades estratigráficas – especificamente as formações São Paulo e Resende – da Bacia de São Paulo, a fim de melhor entender a evolução dos eventos diagenéticos aí ocorridos.

Para alcançar este objetivo, foram conduzidas as seguintes atividades:

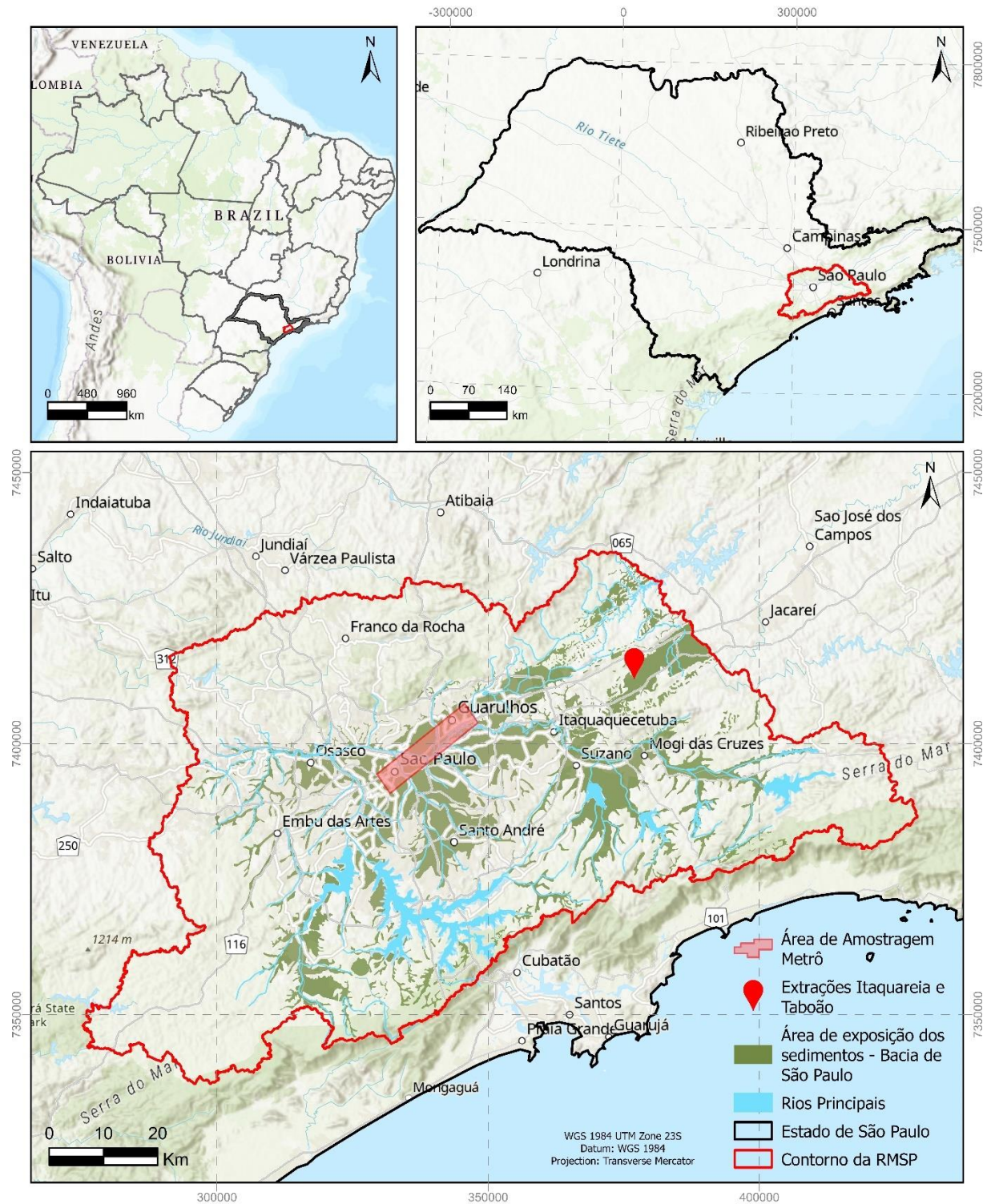
- 1- Estudo petrográfico detalhado, enfatizando aspectos texturais e composicionais das unidades estudadas. Para tanto, foram utilizados diferentes métodos de análise, a fim de melhor caracterizá-las.
- 2- Análise diagenética, calcada no estudo petrográfico, identificando processos que atuaram em cada fase específica, com vistas a estabelecer a evolução desses eventos.

1.2 Localização da Área de Estudo

A área de estudo está localizada na região sudeste do Estado de São Paulo, abarcando os sedimentos da Bacia de São Paulo. Abrange em seu domínio os municípios que configuram a Grande São Paulo, entre Arujá, a leste, e Embu-Guaçu, a oeste, Santana, a norte e Santo André, a sul (Figura 1).

Com área aproximada de 1000 km² (Riccomini, Sant'Anna e Ferrari, 2004) e população de cerca de 21 milhões habitantes (<https://rmsp.pdui.sp.gov.br/>), a área de estudo é responsável por abrigar aproximadamente 29% da população do estado, sendo uma das aglomerações mais significativas do país no que diz respeito a população e renda.

Figura 1 - Mapa de localização da área de exposição da Bacia Sedimentar de São Paulo e áreas de amostragem do presente estudo. (Modificado de Almeida, 1976).



Fonte: Elaborado pela Autora

2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Geologia Geral

2.1.1 Bacia de São Paulo

A Bacia de São Paulo está localizada na região sudeste do Estado de São Paulo. Com 75 km de comprimento, 25 km de largura (Riccomini; Coimbra e Takiya, 1992). A espessura máxima contínua, verificada em sondagens do DAEE por Takiya (1991), é de 256 m; Miranda (2021), reaplicando a técnica de Takiya (1991) para uma nova base de dados, estimou espessura máxima de 370 m. A área aproximada de 1452 km² da bacia ocorre ao longo do Alto do Rio Tietê, na região entre os municípios de Barueri e Santo André, e de Guararema e Itapeverica da Serra. Essa região é delimitada pelas Serras da Cantareira a nordeste, e pela Serra do Mar a sul/sudeste.

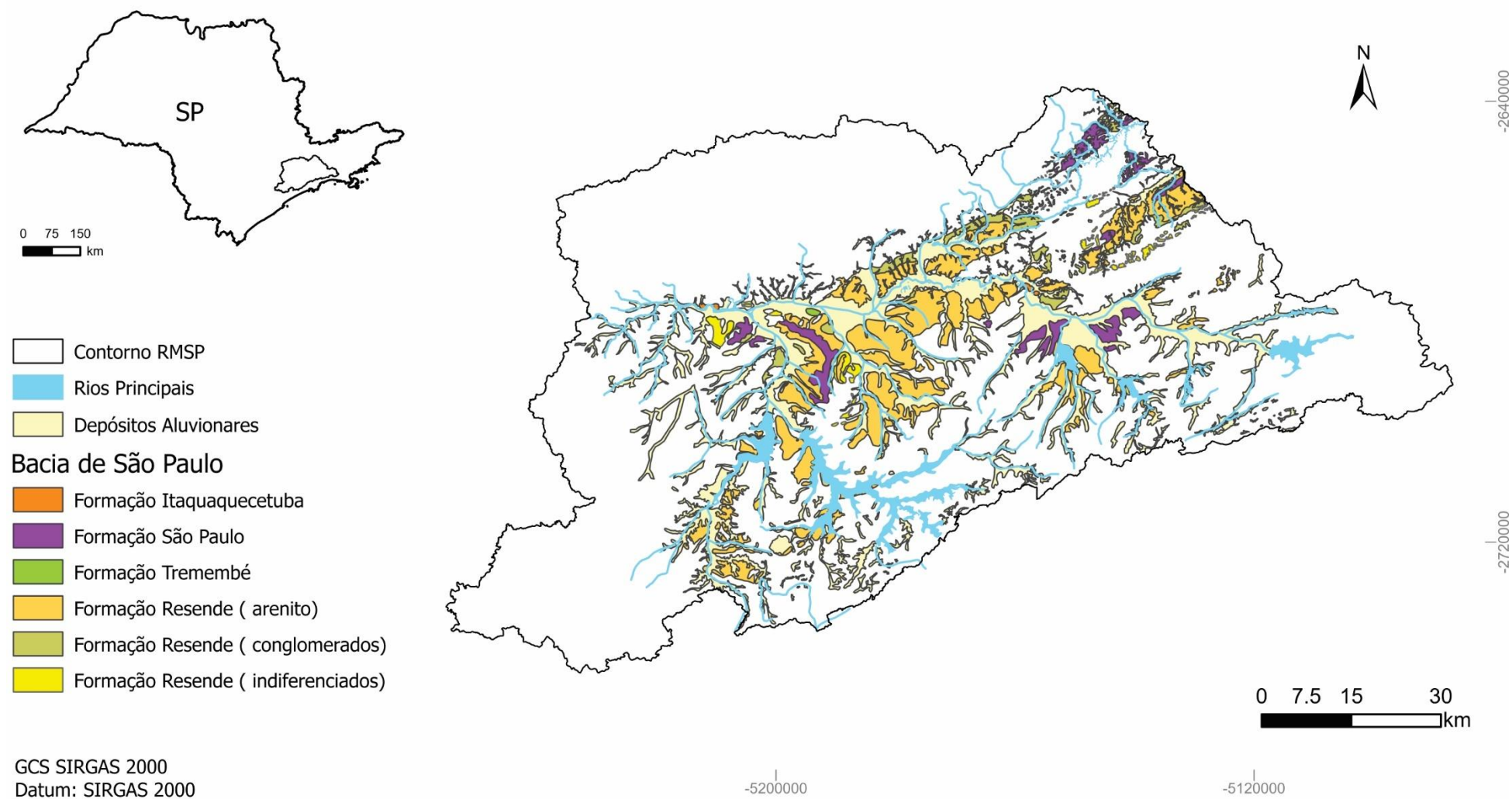
Os sedimentos da Bacia de São Paulo foram inicialmente identificados por Mawe (1812) e posteriormente denominados como “Camadas de São Paulo” por Moraes e Souza (1938), até que Mezzalira (1961) propôs a denominação de “Formação São Paulo” para uma das unidades que estariam depositadas em discordância angular sobre o embasamento cristalino, compondo a “Série Taubaté”. Estudos mais aprofundados referentes à geologia da Bacia de São Paulo só foram elaborados na década de 1990 por Coimbra; Riccomini e Melo (1983); Coutinho (1980); Riccomini (1989); Takiya (1991).

A bacia assenta-se sobre rochas ígneas, metamórficas e intrusivas, que fazem parte da unidade geotectônica do Cinturão de Dobramentos Ribeira (Hasui, 1978), associadas ao Complexo Embu e aos grupos São Roque e Serra do Itaberaba, além de rochas granitoides intrusivas. O complexo Embu constitui predominantemente o substrato do embasamento, ocorrendo como gnaisses, migmatitos e rochas metamórficas de baixo grau, de idade Arqueana a Neoproterozoica (Almeida e Carneiro, 1998), sendo limitado pelas falhas de Taxaquara e Cubatão. Os grupos São Roque e Serra do Itaberaba são compostos por rochas metassedimentares e metavulcânicas (Rodrigues, 1998). Os granitoides intrusivos sintectônicos ou pós-tectônicos aos terrenos metamórficos (Hasui, 1978) ocorrem em grande quantidade sustentando altos morfológicos dentro da bacia (Coutinho, 1980).

A Bacia de São Paulo faz parte de um conjunto cenozoico de bacias inseridas no contexto do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), definidas por Riccomini (1989). É uma bacia do tipo rifte, controlado por falhas normais reativadas ao longo das zonas de cisalhamento de Taxaquara e Jaguari (Riccomini; Coimbra e Takiya, 1992).

Segundo Riccomini (1989), a bacia apresenta sedimentação exclusivamente continental, que pode ser dividida em duas fases. A primeira, sin-tectônica ao rifte, é responsável pela deposição do Grupo Taubaté. Sua deposição se iniciou com um material vulcano-sedimentar, em um sistema de leques aluviais associados a uma planície aluvial de rios entrelaçados, que deu origem à Formação Resende. Esse sistema passa a um sistema lacustre, responsável pela deposição da Formação Tremembé (Riccomini; Coimbra e Takiya, 1992) e, em seguida, para um sistema fluvial meandrante, que deu origem à Formação São Paulo (Figura 2).

Figura 2 - Mapa geológico da Bacia São Paulo na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)



(Modificado de Almeida e Loreti Jr, 2019)

Posteriormente à tectônica diastrófica, houve uma segunda fase de preenchimento que recobriu de forma discordante as rochas do embasamento pré-cambriano. Esta fase é caracterizada por sedimentos oligocênicos, de um sistema fluvial entrelaçado, cujos depósitos compõem a Formação Itaquaquecetuba (Coimbra; Riccomini e Melo, 1983; Melo; Coimbra e Riccomini, 1989), e por depósitos aluviais e coluviais do Pleistoceno ao Holoceno, que recobrem parcialmente as formações descritas (Figura 3).

Figura 3 - Unidades litoestratigráficas da Bacia de São Paulo

EON	ERA	PERÍODO	IDADE (Ma)	RELAÇÕES TECTONO-ESTRATIGRÁFICAS DA BACIA DE SÃO PAULO
FANEROZOICO	CENOZOICO	Quaternário	2,58	Q2a Depósitos Aluvionares
				BACIA DE SÃO PAULO
		Neógeno	23,03	Nit Formação Itaquaquecetuba
				Grupo Taubaté
				Ensp Formação São Paulo
				Formação Resende ENr
		Paleógeno		Enri Indiferenciados Enrgc Conglomerados Enra Arenito Enft Formação Tremembé
			66	
PROTEROZOICO				Em Embasamento Cristalino

(Modificado de Almeida e Loreti Jr., 2019)

2.1.2 Formação Resende

A Formação Resende foi originalmente definida por Amador (1975); posteriormente foi objeto de diversos estudos (Amador e Castro, 1976; Lima e Melo, 1994; Riccomini, 1989; Vespucci e Suguio, 1984). Com idade oligocênica (Lima e Amador, 1985), ela se apresenta como unidade basal e lateral do Grupo Taubaté, originada a partir do preenchimento sedimentar dos eventos sin-tectônicos durante a fase de instalação do Rifte Continental do Sudeste do Brasil. A partir da gradação de um sistema de leques aluviais para um sistema de *playa-lake*, a Formação Resende interdigita-se lateral e verticalmente com a Formação Tremembé acima.

Caracterizada por um trato de sistema de leques aluviais em bordas de falhas, associados a depósitos fluviais de rios entrelaçados axiais à bacia (Riccomini; Sant'Anna e Ferrari, 2004), a unidade expressa a gradação de uma porção proximal, a mediana e distal, a partir das bordas tectonicamente ativas da bacia (Riccomini, 1989). Segundo Riccomini, Coimbra e Takiya (1992), a Formação Resende corresponde a 80% do preenchimento sedimentar da Bacia de São

Paulo, representando a unidade de maior extensão em área, com espessuras que podem ultrapassar 200 m.

A porção proximal ocorre nas posições basais e laterais ao rifte. É constituída predominantemente por conglomerados compostos por fragmentos polimíticos do embasamento, com granulometria de seixos a blocos, angulosos a subarredondados, agrupados em uma matriz argilosa a arenosa esverdeada. Os conglomerados interdigitam-se com arenitos grossos a médios, mal selecionados, com estratificação cruzada acanalada de médio porte, resultantes da sedimentação em planície aluvial de rios entrelaçados, e lamitos provenientes de corridas de lama. Esta fácies proximal é comumente verificada na borda da bacia, associada a zonas de falhas tectonicamente ativas durante a sedimentação, como o do sistema de falhamentos Taxaquara-Jaguari (Riccomini *et al.*, 1987).

A porção mediana da unidade é lateralmente interdigitada com os depósitos proximais e distais. Composta por lamitos seixosos a arenosos, de coloração esverdeada, representa a transição entre os depósitos de leque aluvial e o de sistema fluvial.

A porção distal representa um ambiente de planície aluvial e rios entrelaçados. É composta por arenitos mal selecionados, maciços ou com estratificação cruzada acanalada de médio porte, que constituem corpos lenticulares de espessuras métricas a decimétricas, intercalados com lamitos argilosos. A porção distal também pode apresentar sedimentos silto-arenosos, ricos em argila (esmectitas) e com abundante matéria orgânica (Riccomini; Coimbra e Takiya, 1992).

Lima e Amador (1985) realizaram estudos palinológicos na formação, indicando idades do Neo-Eoceno. Estudos posteriores de pólen esporos e troncos (Yamamoto, 1995) corroboram essa idade.

2.1.3 Formação Tremembé

A Formação Tremembé foi originalmente definida por Almeida (1958) e posteriormente estudada por Riccomini (1989). De idade oligocênica, essa unidade litoestratigráfica ocorre expressivamente na Bacia de Taubaté, porém em menor expressão na Bacia de São Paulo. A espessura máxima estimada é de 60 m; estende-se por área de aproximadamente 4 km², segundo dados das sondagens executadas na Estação Barra Funda do Metrô, descritos por Takiya (1991).

Interdigita-se lateral e verticalmente com os depósitos da Formação Resende; ao final de sua sedimentação grada para um sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo (Mancini e Riccomini, 1995; Riccomini, 1989) .

A seção-tipo na Bacia de Taubaté, sugerida por Riccomini (1989) a partir do testemunho de sondagem nº42 do Conselho Nacional do Petróleo (CNP) e dados de afloramento, mostra cinco principais litofácies da unidade: argilitos verdes maciços, dolomitos, ritmitos de folhelhos, margas e arenitos. Na Bacia de São Paulo, seus sedimentos consistem em camadas tabulares de argilas siltosas de coloração preta a cinza-esverdeadas.

2.1.4 Formação São Paulo

A unidade teve seu nome original definido por Rego (1933), tendo sido definida como Formação por Riccomini; Coimbra e Takiya (1992), a partir da seção colunar descrita por Suguio e Barbour (1969). De idade oligocênica, a unidade tem importante ocorrência na Bacia de São Paulo, representando a transição do sistema aluvial da Formação Resende para um sistema fluvial meandrante, com planícies de inundação bem desenvolvidas (Riccomini; Sant'Anna e Ferrari, 2004) Moraes

A Formação São Paulo é litologicamente composta por conglomerados, arenitos com estratificação plano-paralela, acanaladas e cruzadas, que gradam para siltitos laminados e argilitos (Takiya, 1997). A unidade pode ser separada em duas litofácies principais (Riccomini, 1989). Uma litofácies é composta por um ciclo granodecrescente que se inicia com base conglomerática, passando para arenito grosso com estratificação plano-paralela à cruzada, sotopostos a siltitos e argilitos laminados, correspondendo a depósitos de canais meandantes com características de canais abandonados. A outra litofácies é constituída por arenitos de granulação média a grossa, com granodecrescência ascendente, que passam para sedimentos mais finos, como siltitos e argilitos (Riccomini; Coimbra e Takiya, 1992). Esses sedimentos finos apresentam caráter rítmico, com estratificações plano-paralelas que possuem grande extensão lateral, depositados em planícies de inundação.

Os depósitos da Formação São Paulo estão associados a couraças limoníticas (Suguio e Barbour 1969), que atribuem à unidade características de sustentação morfológica do relevo, devido à impermeabilidade das camadas pelíticas.

Variando entre 70 m e 100 m de espessura, segundo as sondagens descritas por Takiya (1991), a Formação São Paulo tem idade oligocênica, atribuída por correlação com datações palinológicas da unidade na Bacia de Taubaté (Riccomini, 1989).

2.1.5 Formação Itaquaquetuba

A Formação Itaquaquetuba foi descrita e proposta por Junqueira (1969) e Suguio e Takahash (1970), e formalizada por Coimbra; Riccomini e Melo (1983), a partir da sua área-tipo em portos de areia do Rio Tietê, em Itaquaquetuba.

De idade do Mioceno Inferior (Arai e Yamamoto, 1995), os sedimentos da unidade ocorrem sobrepostos em discordância sobre as rochas do embasamento pré-cambriano. Apresenta espessuras que variam entre 20 m e 130 m, com base em aluviões do Rio Tietê e Pinheiros (Takiya, 1997).

A Formação possui cinco litofácies principais (Riccomini, 1989), representativas de depósitos de sistemas fluviais entrelaçados. A primeira é composta por arenitos com estratificação cruzada acanalada e tabular de grande porte, com granulometria de média a grossa. Apresenta estruturas de fluxo de grãos além de abundância de troncos vegetais fósseis, evidenciando um retrabalhamento eólico em períodos de exposição subaérea dos canais de rios entrelaçados. A segunda litofácies compreende conglomerados correspondentes a lençóis aluviais dendríticos (Coimbra; Riccomini e Melo, 1983). Uma litofácies de arenitos maciços de granulação média, com estruturas tipo *pillow*, decimétricas, representam a fluidez dos sedimentos em barras arenosas que causam a destruição de estruturas fluviais originais das outras fácies (Riccomini; Coimbra e Takiya, 1992). A quarta litofácies compreende lamitos maciços, siltico-arenosos, de coloração esverdeada. A quinta litofácies é composta por blocos retrabalhados de rochas do embasamento envoltos em uma matriz de folhelhos siltosos a arenitos, simplificada e chamados de brechas e megabrechas, ricos em matéria orgânica e fósseis carbonificados; esta litofácies está relacionada a cunhas clásticas, resultantes da movimentação dos falhamentos NNW e ENE que delimitam a bacia (Almeida e Carneiro 1998).

As características gerais de tipo de sistemas fluviais responsáveis pelos depósitos da bacia induziram alguns autores a interpretar o paleoclima de deposição como semiárido (Coimbra; Riccomini e Melo, 1983, Melo e Ponçano, 1983), enquanto os conteúdos fossilíferos, como fósseis de madeira, permitiram a interpretação de um paleoclima úmido (Riccomini,

1989; Riccomini e Coimbra; Takiya, 1992). Bedani e Saad (2009), com base na interpretação do sistema deposicional e na idade, colocaram a unidade em posição estratigráfica correspondente à da Formação Resende.

A Formação Itaquaquecetuba apresenta um vasto registo fossilífero (Biagolini; Bernardes-De-Oliveira e Caramês, 2013), sendo ele composto por macrofósseis (Fittipaldi *et al.*, 1989) e palinórfos (Santos, 2005). Os conteúdos fósseis vão desde carvão fóssil piritizado (Tolentino, 1965), madeira fóssil substituída por marcassita (Suguio e Takahash, 1970), folhas e frutos (Fittipaldi, 1990) até amostras de grãos de pólen estudados por Yamamoto (1995).

2.1.6 Coberturas Quaternárias

Por fim, ao longo das drenagens atuais encontram-se os depósitos aluvionares e coluvionares, sedimentos que datam do Quaternário e perduram em deposição até os dias atuais. Podem ser separados em depósitos pleistocênicos e holocênicos. Os depósitos pleistocênicos possuem espessura e distribuição restrita às drenagens e são compostos basicamente por areias, argilas e turfas provenientes do processo de evolução da planície fluvial, devido às variações de volume e conformação de meandros abandonados (Melo *et al.*, 1987). Enquanto isso, os depósitos holocênicos correspondem a coluviões e aluviões formados por cascalheiras.

Os depósitos coluviais são caracterizados por linhas de seixos em matriz argilosa ou arenosa. Os depósitos aluviais são representados por conglomerados sobrepostos por areias médias com estratificação cruzada acanalada (Campos *et al.*, 2002). Esses depósitos estão dispostos nas planícies aluviais dos rios Tietê, Pinheiros, Tamanduateí, Aricanduva, Cabaçu e seus tributários (Riccomini; Coimbra e Takiya, 1992; Takiya, 1997).

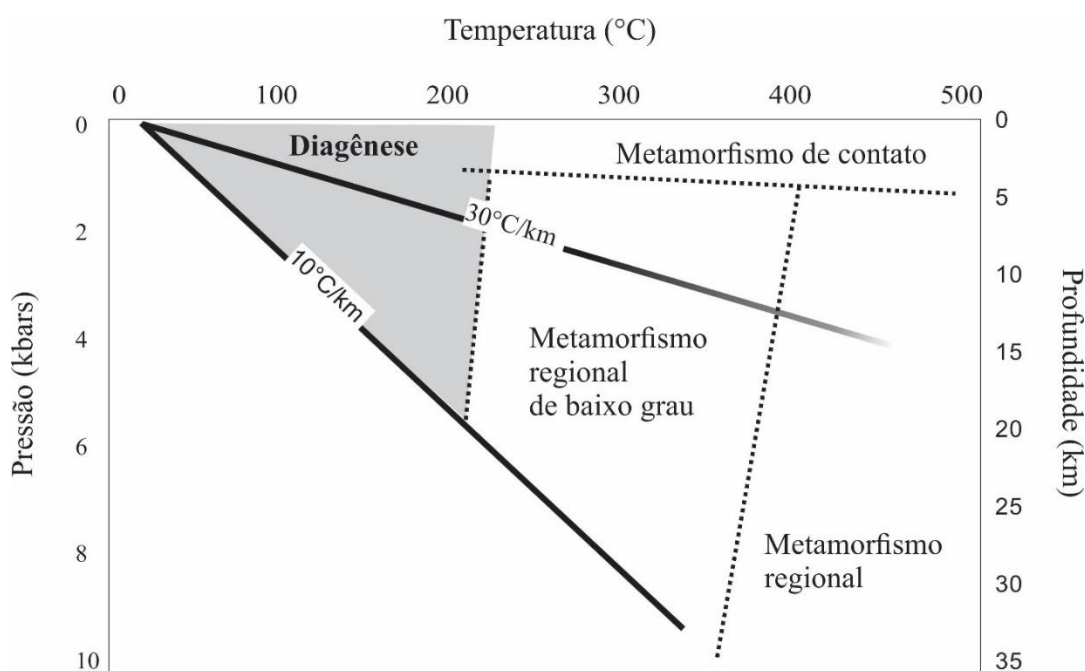
2.2 Diagênese

O termo diagênese refere-se a um conjunto de processos químicos, físicos e biológicos que atuam sobre os depósitos sedimentares originais e suas águas intersticiais, buscando alcançar um equilíbrio textural e geoquímico com o ambiente (Burley; Kantorowicz e Waugh, 1985; Curtis, 1977). Esse processo pode ocorrer em sedimentos depositados, em depósitos

residuais e em todos os tipos de rochas presentes na superfície da crosta terrestre, nos primeiros milhares de metros de profundidade.

A diagênese abrange um amplo espectro de modificações pós-deposicionais nos sedimentos, tendo como limite superior a deposição do sedimento após o processo intempérico, e como limite inferior os primeiros sinais de metamorfismo, com temperaturas de 180°C a 250°C e pressão atingindo de 4 kbar a 6 kbar (Figura 4).

Figura 4 - Diagrama de pressão e temperatura relacionadas à diagênese (cinza), a regimes metamórficos e gradientes de pressão e temperatura típicos da crosta terrestre



Fonte: Modificado de Burley e Wonder (2009)

Os processos diagenéticos são controlados por um conjunto de fatores que juntos são fundamentais para que as reações diagenéticas ocorram: pressão, temperatura, profundidade, composição da assembleia mineral primária, química dos fluidos de formação, fluxo de fluidos, ambiente deposicional e história de soterramento da bacia. Além desses fatores, o tempo é um componente crítico nas reações diagenéticas, podendo ocorrer em escala de dezenas de milhares de anos (Walderhaug, 1994) até alguns milhões de anos (Boles, 1987).

A interação entre os sedimentos e os fluidos intersticiais são responsáveis pela maioria dos processos químicos envolvidos nas reações diagenéticas (Goenopawiro, 1997). Estes, segundo Galloway (1984), podem ser classificados em três regimes

- 1- Meteórico: atua em porções rasas da bacia, sob ação de águas superficiais e de precipitação;
- 2- Compactacional: atua quando as águas aprisionadas no sedimento são expulsas dos poros, durante o soterramento e consequente compactação;
- 3- Termobárico: atua nas porções mais profundas da bacia, sob alta pressão e temperatura, durante a liberação de volumes significativos de água, a partir de reações de desidratação de argilominerais.

Croquete e Pray (1970), ao empregarem a profundidade de soterramento como critério para descrever os processos diagenéticos em calcário, propuseram uma divisão diagenética em três regimes simples e inclusivos: Eodiagênese, Mesodiagênese e Telodiagênese. Essa abordagem, inicialmente aplicada a calcários, é comumente estendida a todos os tipos de sedimentos indeformados, uma vez que os mesmos processos e controles fundamentais operam na diagênese clástica e carbonática.

2.2.1 Eodiagênese

A eodiagênese, também chamada de diagênese rasa ou diagênese precoce, engloba processos diagenéticos que ocorrem na superfície ou próximo dela, com profundidade máxima de 1-2 km e variações de temperatura entre 30°C e 70°C (Morad; Ketzer e De Ros, 2000). Nesse estágio, a química das águas intersticiais é influenciada pelo ambiente deposicional antes de um efetivo soterramento (Morad et al., 1991), dependendo das características físicas, biológicas e geoquímicas gerais do sistema deposicional. Os processos eodiagenéticos também podem ser influenciados pela mudança relativa do nível do mar, nas fácies de deposição e na extensão da mistura entre águas marinhas e meteóricas (Morad; Ketzer e De Ros, 2000).

As alterações eodiagenéticas mais comuns em sedimentos incluem a redução do volume por compactação, em consequência da expulsão das águas intersticiais, e a alteração de minerais instáveis, como a dissolução parcial de feldspatos e decomposição de minerais máficos. Além disso, é característico dessa etapa a precipitação de cimento carbonático, dolomítico, siderítico, como caliches e calcretes, e a formação de nódulos e películas de quartzo, a depender das mudanças de pH que controlam o meio. A infiltração mecânica das argilas também é um processo comum nesta fase (Crone, 1975); relaciona-se à entrada de sedimentos finos nos espaços intergranulares, conduzidas por infiltração de água episódicas (Walker, Waugh e

Grone, 1978). Esse evento pode ser expressivo, reduzindo a porosidade e a maturidade dos sedimentos (Caetano-Chang e Wu, 2003) e tendo influência direta na permeabilidade dos sedimentos.

A porosidade secundária advém do processo de dissolução e substituição, constituindo uma parte substancial da porosidade total de uma rocha. Os poros secundários, assim como os poros primários, tendem a se compactar e ser preenchidos com a evolução das fases autigênicas, de forma que a quantidade absoluta de porosidade secundária diminui com a profundidade (Milliken, 2013). A porosidade secundária pode se desenvolver durante toda a história do reservatório, nas fases eodiagênética, mesodiagenética e telodigenética. Schmidt e McDonald (1979) reconhecem cinco classes genéticas de formação de porosidade:

- a- Fraturamento;
- b- Esmagamento;
- c- Dissolução dos grãos sedimentares e matriz;
- d- Dissolução do cimento autigênico de *pore filling*;
- e- Dissolução de minerais autigênicos substituíveis.

2.2.2 Mesodiagênese

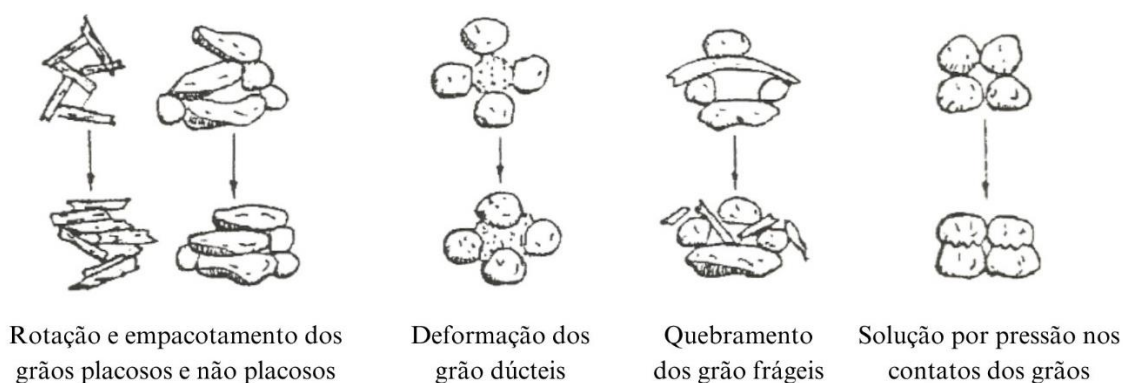
A mesodiagênese foi originalmente definida por Schmidt e McDonald (1979) e contempla processos físicos, químicos e biológicos que atuam sobre o sedimento em subsuperfície, durante seu soterramento efetivo. Ocorrendo em sistema fechado, sob uma profundidade capaz de isolar a rocha e os fluidos intersticiais da influência do ambiente deposicional e processos superficiais (Bruhn e De Ros, 1987), esta fase é influenciada por aumentos de temperatura e pressão, que causam modificações nos sedimentos a ponto de induzir o processo de litificação. Esse processo é limitado pelo início do metamorfismo de baixo grau (Choquette e Pray, 1970), podendo evoluir para telodiagênese por soerguimento do sedimento.

A mesodiagênese, conforme proposto por Morad; Ketzer e De Ros (2000), pode ser dividida em estágios superficial e profundo. A mesodiagênese superficial ocorre em profundidades que variam de 2 km a 3 km, com temperaturas que oscilam entre 70°C e 100°C.

Por sua vez, a mesodiagênese profunda ocorre em profundidades em torno de 3 km, a depender do gradiente geotérmico, apresentando temperaturas maiores que 100°C até o limite inferior do metamorfismo, situado em aproximadamente 200°C a 250°C. Sob tais condições profundas, a energia pode ser transferida para dentro ou fora do sistema, porém não é possível a transferência de matéria (Hutcheon, 1983).

Na mesodiagênese rasa, as primeiras alterações ocorrem pela sobrecarga da coluna crescente de sedimentos acima, que proporcionam compactação mecânica capaz de reduzir a porosidade com o aumento do soterramento dos sedimentos, promovendo a expulsão dos fluidos. Neste caso ocorrem as situações evidenciadas por Goenopawiro (1997) e Jonas e McBride (1977): 1- rotação, escorregamento e rearranjo dos grãos; 2- deformação de grãos dúcteis (pseudomatriz); 3- quebra de grãos rígidos; 4- dissolução por pressão (Figura 5). Segundo Fuchtbauer (1967), a compactação mecânica é o processo responsável pela maior redução de porosidade, e depende diretamente da composição, granulometria e forma das partículas sedimentares envolvidas.

Figura 5 - Esquema de rearranjo de grãos na compactação mecânica e química.



Fonte: Jonas e McBride (1977)

Com o aumento da profundidade, a compactação transita do domínio mecânico para o domínio químico (Thomson, 1959). Com o aumento da profundidade, a pressão e temperatura também aumentam, sendo fatores cruciais para a indução de reações químicas. A temperatura atua aumentando a energia cinética das partículas reagentes, aumentando a velocidade das reações e, conseqüentemente, intensificando os processos diagenéticos. As reações químicas são induzidas com o propósito de estabilização sob as condições de pressão e temperatura em evolução, culminando na formação de uma nova assembleia mineral. Sendo assim, minerais podem se dissolver, precipitar ou ser substituídos.

A primeira reação do domínio da compactação química acontece com a dissolução por pressão. Esta é influenciada pela mineralogia, química e estrutura mineral (Matter e Ramseyerl, 1985) e promove a evolução de contatos côncavos e convexos para interpenetrantes ou suturados, devido à interação da fase sólida (minerais) com os fluidos intersticiais, que provoca a dissolução de minerais menos resistentes (Milliken, 2013). Nesta fase, a dissolução por aumento da solubilidade causa a diminuição da permeabilidade à medida que aumenta a compactação química.

A mesodiagênese rasa contempla também o processo de cimentação que, segundo Suguio (2003), é o processo de maior importância na consolidação dos sedimentos. A cimentação consiste na precipitação de minerais autigênicos preenchendo os poros primários dos sedimentos detríticos que, assim, se tornam litificados (Worden e Burley, 2003). A cimentação pode ser encontrada como cimento de crescimento sintaxial, cimento de preenchimento de poro, cimento de substituição em superfície de grãos e, por fim, cimentos de substituição intensiva de grãos (Worden e Burley, 2003). Esta precipitação é controlada pela disponibilidade e concentração de componentes necessários para precipitação e a distribuição no meio. Os principais tipos de cimento são:

- a) Cimentação por sílica: ocorre principalmente como quartzo ou em suas formas criptocristalinas (chert, calcedônia); este tende a ocorrer a temperaturas de 80°C a 100°C;
- b) Cimentação por carbonato: precipitação de calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$), que pode conter ferro em sua constituição (e.g., ankerita), e a siderita (FeCO_3), em temperaturas próximas a 100°C;
- c) Cimentação por óxidos e hidróxidos de ferro: precipitação de cutículas de óxidos e hidróxidos de ferro circundando grãos detríticos (De Ros e Moraes, 1984) e gerando filmes de hematita, pirita e goethita, a partir da dissolução de minerais ferromagnesianos como biotita, hornblenda e piroxênio;
- d) Cimentação por argilas: precipitação de caulinita, illita e clorita, podendo ocorrer também esmectitas, montmorilonitas e saponitas.

À medida que os sedimentos entram em uma janela mesodiagenética profunda, sob condições de profundidade maior que 3 km e temperatura maior que 100°C, é comum o desenvolvimento de uma porosidade secundária decorrente da dissolução de grãos estruturais e de sedimento intergranular.

A precipitação de feldspato potássico autigênico e, em menor proporção, albita, depende da dissolução e substituição de feldspatos detríticos, micas e outros silicatos diageneticamente instáveis, situação em que a disponibilidade dos elementos químicos (sílica e cátions alcalinos) são mais importantes que temperatura e pressão (De Ros, 1985). Sendo assim, é necessário que as águas de formação sejam alcalinas e ricas em Na ou K, Si, Al, elementos abundantes em processos de hidrólise e dissolução. A depender da disponibilidade de elementos da diversificada assembleia de minerais detríticos, podem ser gerados diferentes minerais como albita (por albitização), esmectitas e caulinita em maiores proporções, bem como titanita, anatásio, esfalerita, barita, ankerita, siderita e fluorita e argilas autigênicas (illita) (Milliken, 2013).

O processo de dissolução e substituição mineral também proporciona o crescimento secundário de quartzo (*overgrowth* - sobrecrecimento), que normalmente ocorre como crescimento secundário de quartzo em volta de grãos de quartzo, pela fusão de vários pequenos cristais sobre um grão hospedeiro, até formar um hábito piramidal (McBride, 1989a). Tal crescimento pode advir de fontes que proporcionam a presença de águas enriquecidas em sílica como, por exemplo: dissolução de sílica amorfa de fragmentos biológicos ou vulcânicos; excesso de sílica dissolvida advinda da transformação de esmectita em illita ou clorita; substituição de minerais silicáticos por carbonatos ou a dissolução de anfíbólios e piroxênios. (McBride, 1989a)

Durante a mesodiagênese profunda também é comum a precipitação de argilominerais autigênicos. Esta acontece a partir da substituição parcial ou completa de grãos detríticos, preenchendo os vazios deixados pela dissolução de grãos do arcabouço, caracterizando uma neoformação, ou pela precipitação de minerais preenchendo espaços porosos intercristalinos. Argilominerais característicos de substituição ocorrem pela precipitação de caulinita, illita, esmectita, clorita e interestratificados de illita-esmectita (Wilson e Pittman, 1977).

É comum a precipitação de minerais opacos durante as fases mais avançadas da mesodiagênese profunda. É característica a precipitação de pirita e, menos comumente, de sulfetos de Cu, Pb e Zn decorrente da redução térmica do sulfato (Morad; Ketzer e De Ros, 2000), o que gera a precipitação de cristais neoformados bem desenvolvidos, que normalmente preenchem poros intergranulares ou substituem grãos e cimentos com hábitos prismáticos e idiomórficos. Além da precipitação mesodiagenética tardia de piritas e óxidos de ferro, também é comum a precipitação de óxidos de titânio.

2.2.3 Telodiagênese

A Telodiagênese é o último estágio da diagênese. Esta ocorre quando as sequências sedimentares sofreram modificações eo e mesodiagenéticas e são elevadas e afetadas por condições superficiais, sofrendo influência do influxo de águas meteóricas e alívio de pressão (Morad; Ketzer e De Ros, 2000), ocasionando a desestabilização dos minerais anteriormente formados e promovendo a readaptação às novas condições. Segundo Morad; Ketzer e De Ros (2000), fatores como: (i) clima, (ii) carga hidráulica, (iii) grau de perda de porosidade e permeabilidade durante as fases anteriores, (iv) presença de camadas impermeáveis que impedem a infiltração da água meteórica, (v) presença de falhas que facilitam a condução de águas meteóricas para porções mais profundas, (vi) tempo de exposição e (vii) composição mineralógica, controlam a distribuição espacial e temporal da telodiagênese, Devido a esses fatores limitantes, a espessura das alterações telodiagenéticas pode variar de dezenas a centenas de metros, dependendo da penetração das águas meteóricas.

A água meteórica desempenha um papel significativo para que ocorram as alterações geoquímicas nos sedimentos. Entre essas reações, destaca-se a dissolução de grãos instáveis do arcabouço, como feldspatos, mica, minerais pesados e fragmentos de rocha (Emery; Myers e Young, 1990). Além disso, os cimentos eodiagenéticos e mesodiagenéticos também podem sofrer dissolução pelo fluxo de água meteórica (Bloch, 1994). Processos de oxidação e dissolução tardia de minerais férricos também são comuns, conferindo aos sedimentos uma coloração avermelhada característica.

2.3 Classificação dos litotipos por Kutner e Bjornberg (1997)

Localizada no maior centro urbano do país, a cidade de São Paulo sempre enfrentou uma significativa demanda de construções para aumento do transporte público. Com grande expressão, a execução de túneis metroferroviários teve início em 1969. A elaboração de diversos projetos desde então disponibilizou um grande número de sondagens geológico-geotécnicas que foram estudadas desde a década de 1960. A experiência adquirida na execução de obras do Metrô contribuiu significativamente para o aprimoramento do conhecimento nessa área.

Inspirado em modelos como os de Coutinho (1989), Melo; Coimbra e Riccomini (1989) e Vargas (1992), Kutner e Bjornberg (1997) apresentaram um modelo de classificação objetiva, aplicável aos materiais geológicos das unidades sedimentares da Bacia de São Paulo, e relevantes para os projetos de engenharia (Figura 6). Tal proposta surgiu devido à dificuldade encontrada na compartimentação das unidades estratigráficas, dada a variedade de litotipos e a complexidade nas relações estratigráficas. Permitindo identificar os principais compartimentos geológicos da Bacia de São Paulo e separá-los em unidades, a classificação não contempla formações como Tremembé e Itaquaquacetuba, uma vez que estas unidades apresentam ocorrências restritas e locais. A classificação foi baseada na análise de algumas centenas de sondagens executadas nos projetos de infraestrutura metroviária.

Figura 6 - Sistema de Classificação de unidades geológico-geotécnicas utilizadas pela Companhia Do Metropolitano de São Paulo

DEPÓSITOS TECTOGENICOS	
5	Aterros com materiais diversos com predomínio de argila siltosa pouco arenosa, geralmente com pedregulhos e/ou matéria orgânica.

DEPÓSITOS ALUVIONARES	
• Facies argiloso	• Facies arenoso
4Tt	Turfa muito mole, preta.
4Ag1	Argila siltosa com matéria orgânica disseminada, plástica, muito mole, cinza e marrom.
4Ag2	Argila arenosa (areia fina), com mat. orgânica, muito mole a med. consistente, marrom e cinza.
4Ag3	Argila siltosa arenosa, com pedregulhos e mat. orgânica, plástica, mole, cinza e marrom.

FORMAÇÃO SÃO PAULO	
• Facies argiloso • Argilas vermelhas	• Facies arenoso
3Agm1	Argila siltosa pouco arenosa, porosa, de consistência mole a média, vermelha e amarela.
3Agm2	Argila siltosa pouco arenosa, porosa, de consistência média a rija, vermelha.
• Argilas variegadas	
1Ag	Argila siltosa pouco arenosa, de consistência rija a dura, variegada (amarela, cinza e vermelha).
3Ag2	Argila arenosa pouco siltosa, de consistência média a dura, variegada (amarela, cinza e vermelha).

FORMAÇÃO RESENDE	
• Facies argiloso	• Facies arenoso
2Ag1	Argila siltosa pouco arenosa (areia fina e média) medianamente plástica a plástica, rija a dura, cinza esverdeada.
2Ag2	Argila arenosa (areia fina e média), pouco micacea, pouco a medianamente plástica, rija a dura, cinza.
2Ag3	Argila arenosa (areia fina e média), micáceo, compacto a muito compacto, medianamente plástica a plástica, rija a dura, cinza e marrom.
2Ar1	Areia fina e média argilosa, pouco siltosa, pouco plástica, pouco compacta a compacta, cinza amarela.
2Ar2	Areia média e grossa, pouco siltosa, medianamente a muito compacta, cinza amarela.
2Ar3	Areia média e grossa, pouco siltosa, com fragmentos de quartzo e pedregulhos variados, medianamente a muito compacta, cinza amarela.

EMBASAMENTO CRISTALINO	
1SR1	Silte argiloso pouco arenoso, pouco a medianamente compacto, cinza avermelhado (solo residual maduro).
1SR1	Silte arenoso (areia fina e média), micáceo, compacto a muito compacto, cinza escuro (solo residual jovem).
1SR	Silte argiloso pouco arenoso (areia fina e média), micáceo, compacto a muito compacto, verde (saprólito).
1R	Gnaiss de textura protomilonítica, granulação média, foliação subvertical a 60°-70°, fraturas inclinadas (45°) a subverticais, pouco a medianamente alterado (A2/A3), coerente (C2), fraturado (F2).

Fonte: (Kutner e Bjornberg (1997), *apud* Gurgueira, 2013)

A classificação de Kutner e Bjornberg (1997) foi inicialmente aplicada na descrição de amostras no projeto básico da Linha 4 – Amarela e posteriormente adotada em todos os projetos, desde o projeto básico da Linha 5 – Lilás (Gurgueira, 2013). Essa classificação será utilizada no presente trabalho para a compartimentação das unidades da Bacia de São Paulo.

A classificação de Kutner e Bjornberg (1997) foi feita a partir da caracterização tátil-visual utilizada na descrição de amostras e, posteriormente, foram descritas por Gurgueira (2013), que atribuiu ambientes sedimentares para cada unidade geológico-geotécnica:

Depósitos Aluvionares: Divididos em fácies argilosa e fácies arenosa:

- 4Tf, 4Ag₁, 4Ag₂, 4Ag₃ – Depósitos fluviais meandantes de planície de inundação ou meandros abandonados;
- 4Ar₁, 4Ar₂, 4Ar₃ – Depósitos fluviais de canais meandantes.

Formação São Paulo: Dividida em três subunidades, sendo duas fácies argilosas, compreendendo argilas vermelhas e argilas variegadas, e uma fácies arenosa:

- 3Ag_{p1}, 3Ag_{p2} – Camada Superficial Alterada;
- 3Ag₁, 3Ag₂ – Depósitos fluviais meandantes de planície de inundação ou meandros abandonados;
- 3Ar₁, 3Ar₂ – Depósitos fluviais de canais meandantes ou de rompimento de diques marginais.

Formação Resende: Dividida em três subunidades, sendo elas argilosa, diamictitos e arenitos:

- 2Ar₃ – Depósitos de leques aluviais proximais;
- 2Ag₁, 2Ag₂, 2Ag₃ – Depósitos de leques aluviais medianos e distais;
- 2Ar₁, 2Ar₂ – Depósitos fluviais provenientes de canais de rios entrelaçados.

2.4 Técnicas Empregadas

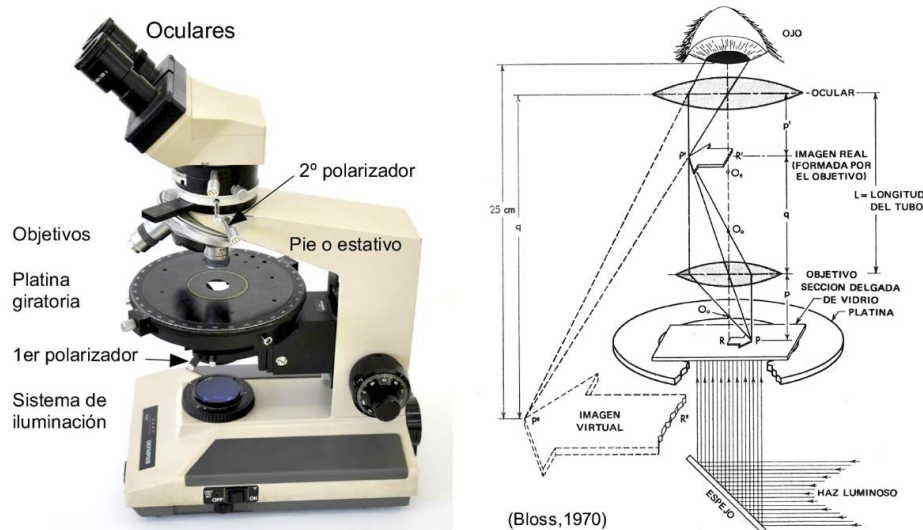
2.4.1 Microscopia Óptica

O microscópio petrográfico utiliza um sistema de lentes e filtros de polarização que, em conjunto, normalizam a refração da luz proveniente da amostra, de modo que filtrem quais as ondas de luz ou vibrações passam por eles e direcionando-as para um único ponto. O sistema é composto por dois tipos de polarizadores, um que filtra e outro que permite determinar a direção e a quantidade de luz que a amostra recebe.

Atualmente, microscópios petrográficos polarizadores podem empregar dois tipos de fonte de luz, a luz transmitida e a luz refletida (Figura 7). No caso do microscópio de luz transmitida, a fonte luminosa é posicionada na parte inferior do instrumento e é direcionada através de um sistema de lentes para iluminar amostras de rochas transparentes ou translúcidas.

Estas amostras são então observadas com ampliação através de objetivas oculares. Em contrapartida, nos microscópios de luz refletida, a fonte luminosa está localizada acima da amostra, possibilitando uma observação indireta da reflexão da luz sobre amostras opacas.

Figura 7 - Microscópio de luz polarizada e esquema do sistema de geração de imagem



Fonte: Bloss (1970)

A aplicação da microscopia petrográfica viabiliza uma análise minuciosa de minerais e rochas, considerando que cada espécie mineral possui uma composição química única, determinando seu retículo cristalino. Dessa forma, cada mineral apresenta propriedades ópticas distintas, tais como birrefringência, pleocroísmo e extinção, possibilitando a identificação com base em propriedades ópticas específicas. Ao serem examinados em conjunto em uma lâmina delgada, esses elementos propiciam a classificação da rocha conforme sua composição mineralógica.

Além disso, a técnica possibilita a análise de características entre os minerais, como texturas, incluindo forma, tamanho e arranjo dos minerais. Essa abordagem é essencial para entender a origem da rocha e seus processos ígneos, sedimentares ou metamórficos, contribuindo para a reconstrução de eventos geológicos.

Ademais, a técnica é valiosa para a interpretação e avaliação de processos diagenéticos, abordagem empregada nesta dissertação. Essa análise inclui a identificação de alterações diagenéticas, como a presença de minerais secundários, recristalização e porosidade. Esses elementos contribuem para uma compreensão mais abrangente dos processos que afetaram a rocha ao longo do tempo geológico.

2.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

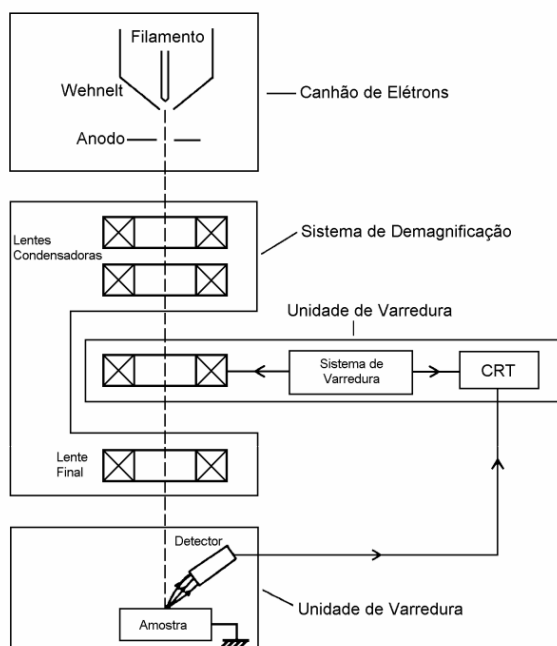
A microscopia eletrônica de varredura utiliza um feixe de elétrons (elétrons primários) no lugar da radiação de luz empregada no microscópio óptico convencional. A interação do feixe com a amostra resulta na liberação de elétrons (secundários, retro-espalhados, Auger, entre outros), raios X característicos e fótons. Estes são coletados por detectores que permitem gerar uma imagem. Dependendo do material é possível atingir um aumento de até 900000X, em que a alta resolução está na faixa de 1 a 5 nanômetros (Nagatani *et al.*, 1987)

Sendo assim, é possível explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas, e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está sincronizada com a do feixe incidente, permitindo a formação de imagens a partir de detecção de elétrons secundários ou a execução de análises físico-químicas a partir de elétrons retro-espalhados (Bozzola e Russell, 1999).

A utilização do MEV possibilita a obtenção de características como topografia, superfície, composição e cristalografia, facilitando a análise detalhada da composição mineralógica de rochas, bem como da morfologia dos grãos, poros e as interações mineralógicas.

O MEV é composto basicamente por uma coluna óptica-eletrônica, unidade de varredura, câmara de amostra, sistema de detectores, sistema de visualização de imagem e um sistema de vácuo (Figura 8).

Figura 8 - Representação esquemática dos componentes do Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Extraído de (2004)

O MEV também pode ser utilizado para análises químicas qualitativas de materiais por microanálises. A ação do feixe de elétrons permite a identificação da emissão de raios X pela amostra, possibilitando a identificação de sua composição e a determinação dos elementos químicos constituintes do mineral observado (Goldstein *et al.*, 1992). Tal análise pode ser executada a partir da leitura dos raios emitidos pela amostra, pela medida de suas energias (EDS) ou pelo comprimento de onda (WDS).

2.4.3 Difração de Raios X

A técnica de Difração de Raios X (DRX) é largamente utilizada para a caracterização de estruturas cristalinas. A técnica difratométrica utiliza do fenômeno das bandas do espectro eletromagnético para extrair informações referentes à estrutura da matéria, uma vez que a emissão, absorção e espalhamento do feixe incidente é específica para cada composto. Tendo por base o princípio da difração de raios X pelos planos atômicos dos cristais, é possível a caracterização das estruturas cristalinas e, a partir delas, a identificação dos minerais (Moore e Reynolds, 1989)

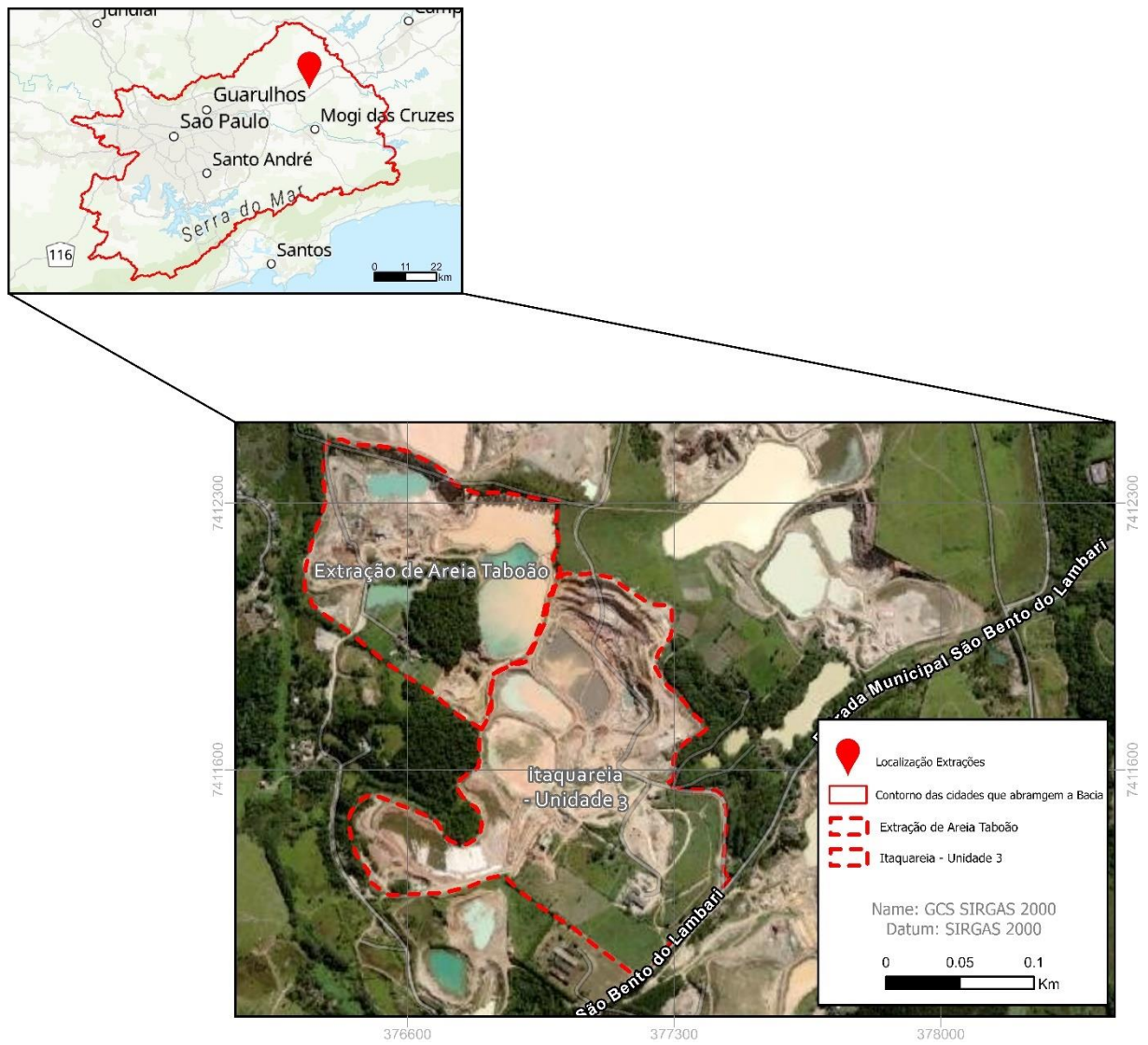
Além disso, foram conduzidos levantamentos bibliográficos específicos relacionados aos processos digenéticos, utilizando técnicas petrográficas como fundamento. Para viabilizar a realização do estudo petrográfico, também foi efetuado um levantamento bibliográfico detalhado sobre a metodologia a ser aplicada.

3.2 Amostragem e Descrição Litológica

Para a realização das análises petrográficas e digenéticas foram utilizadas duas abordagens distintas de amostragem, visando atender à heterogeneidade litológica de cada unidade da Bacia de São Paulo, tendo como referência as seções-tipo e perfis complementares das formações paleógenas encontradas na literatura. As duas áreas de amostragens escolhidas se justificam por estar em uma região onde ocorrem as maiores espessuras da bacia.

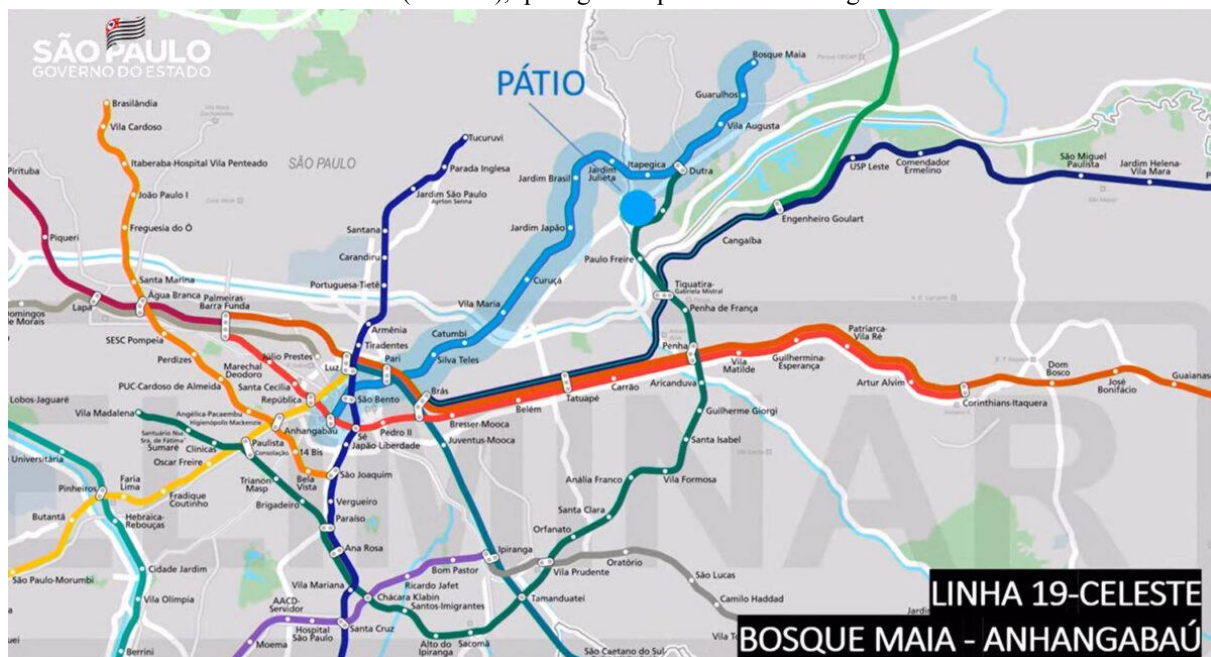
A primeira consistiu em coletas em duas extrações de areia localizadas em Mogi das Cruzes: Extração de Areia Taboão e Itaquareia (Figura 10). A segunda envolveu a análise de testemunhos de sondagens provenientes de poços perfurados da Linha 19 – Celeste, pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, na região da Grande São Paulo (Figura 11).

Figura 10 - Mapa de Localização da Extração de Areia Taboão e Itaquareia



Fonte: Elaborado pela Autora

Figura 11 - Mapa das linhas da Companhia do Metropolitano de São Paulo, com destaque para a Linha 19-Celeste (em azul), que liga Bosque Maia a Anhangabaú



Fonte : CTPM

3.2.1 Extração de Areia Taboão

Localizada na porção norte de Mogi das Cruzes, a Extração de Areia Taboão pode ser acessada pela Estrada Municipal São Bento do Lambari. Nessa mineração, extrai-se principalmente areia da Formação Resende.

Para a coleta de amostras, foram considerados aspectos como litologia, estrutura e geometria, respeitando os limites estratigráficos de cada unidade aflorante. Foram coletadas 14 amostras, das quais seis pertencem à Formação São Paulo e o restante à Formação Resende, unidades aflorantes na área (Figuras 12, 13, 14 e 15; Tabela 1). Estas receberam a nomenclatura de TB. Todas as amostras foram encaminhadas para a confecção de lâminas delgadas, metalização e desagregação para a posterior submissão às técnicas de análise escolhidas.

Figura 12 –Afloramento da Extração de Areia Taboão, de onde foram extraídas as amostras TB-01, TB-02 e TB-03.

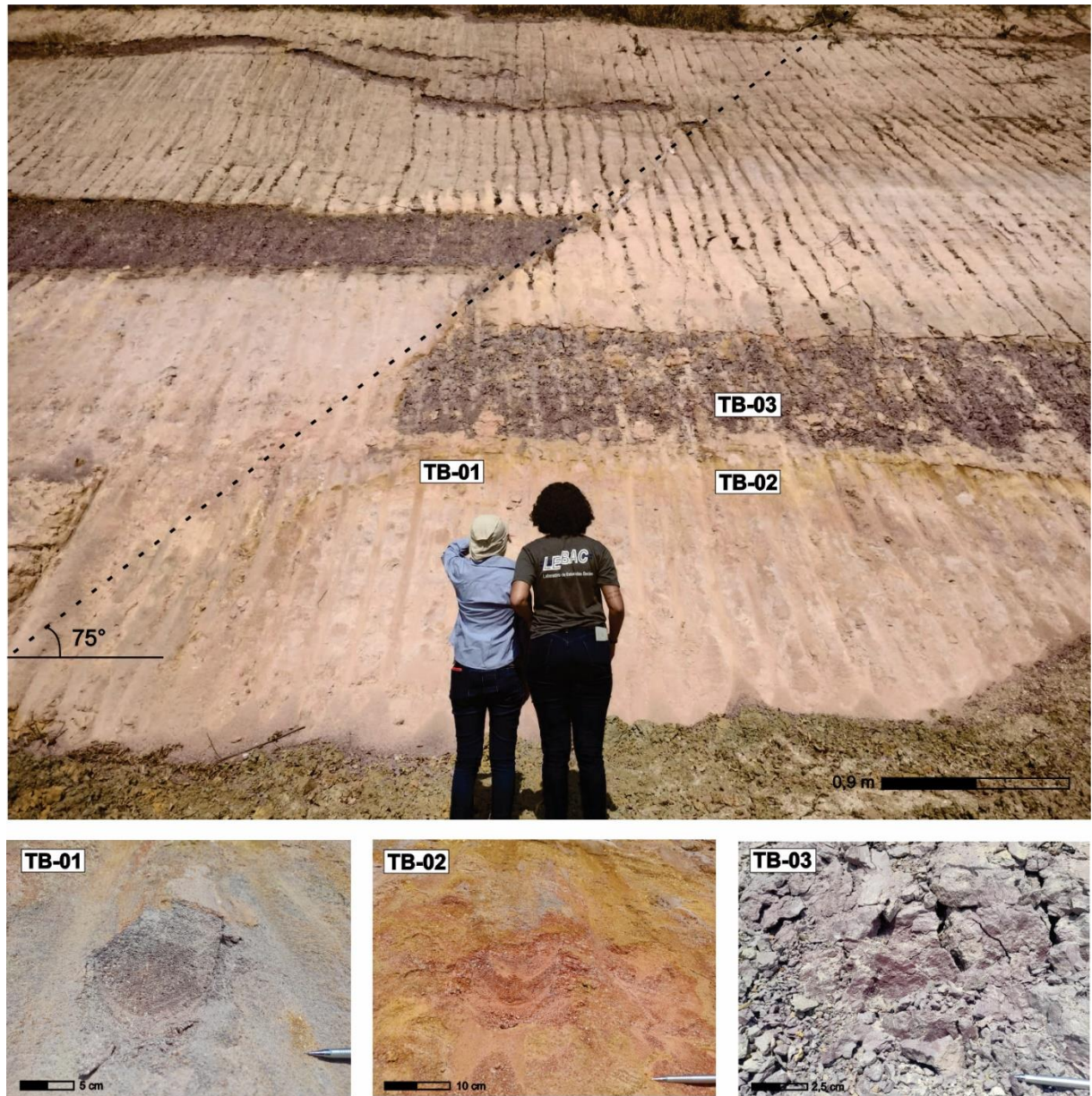


Figura 13 –Afloramento da Extração de Areia Taboão, de onde foram extraídas as amostras TB-04, TB-05 e TB-06.

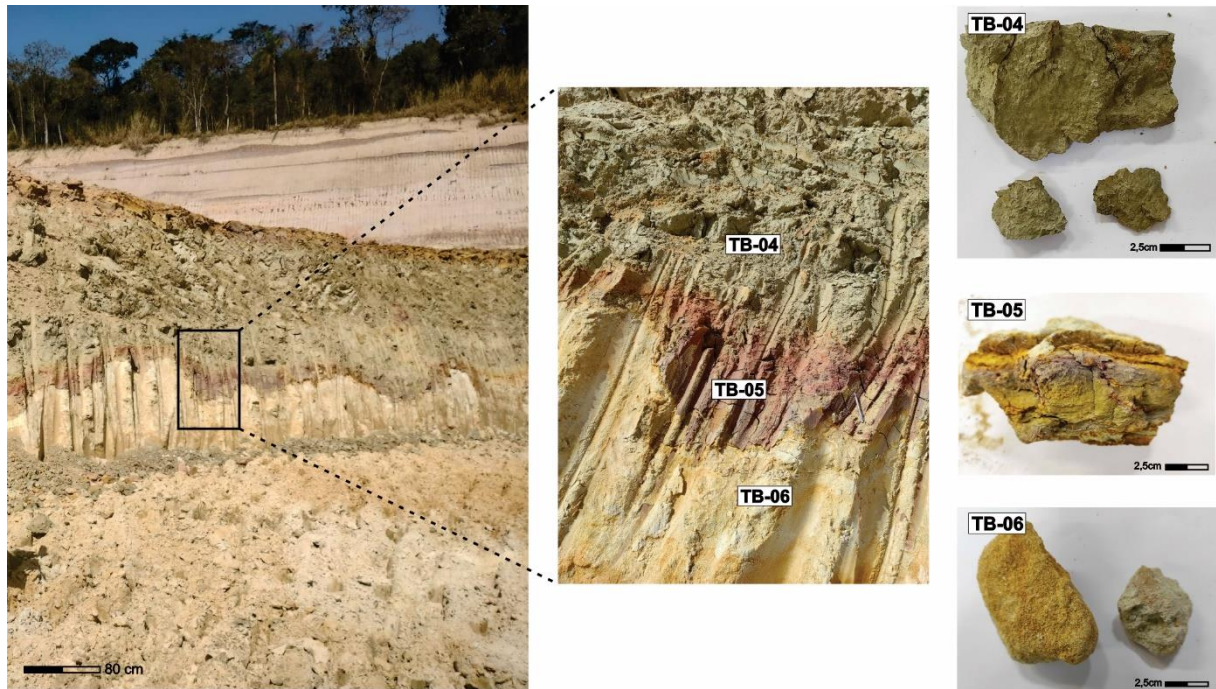


Figura 14 –Afloramento da Extração de Areia Taboão, de onde foram extraídas as amostras TB-09,TB-10 e TB-11.

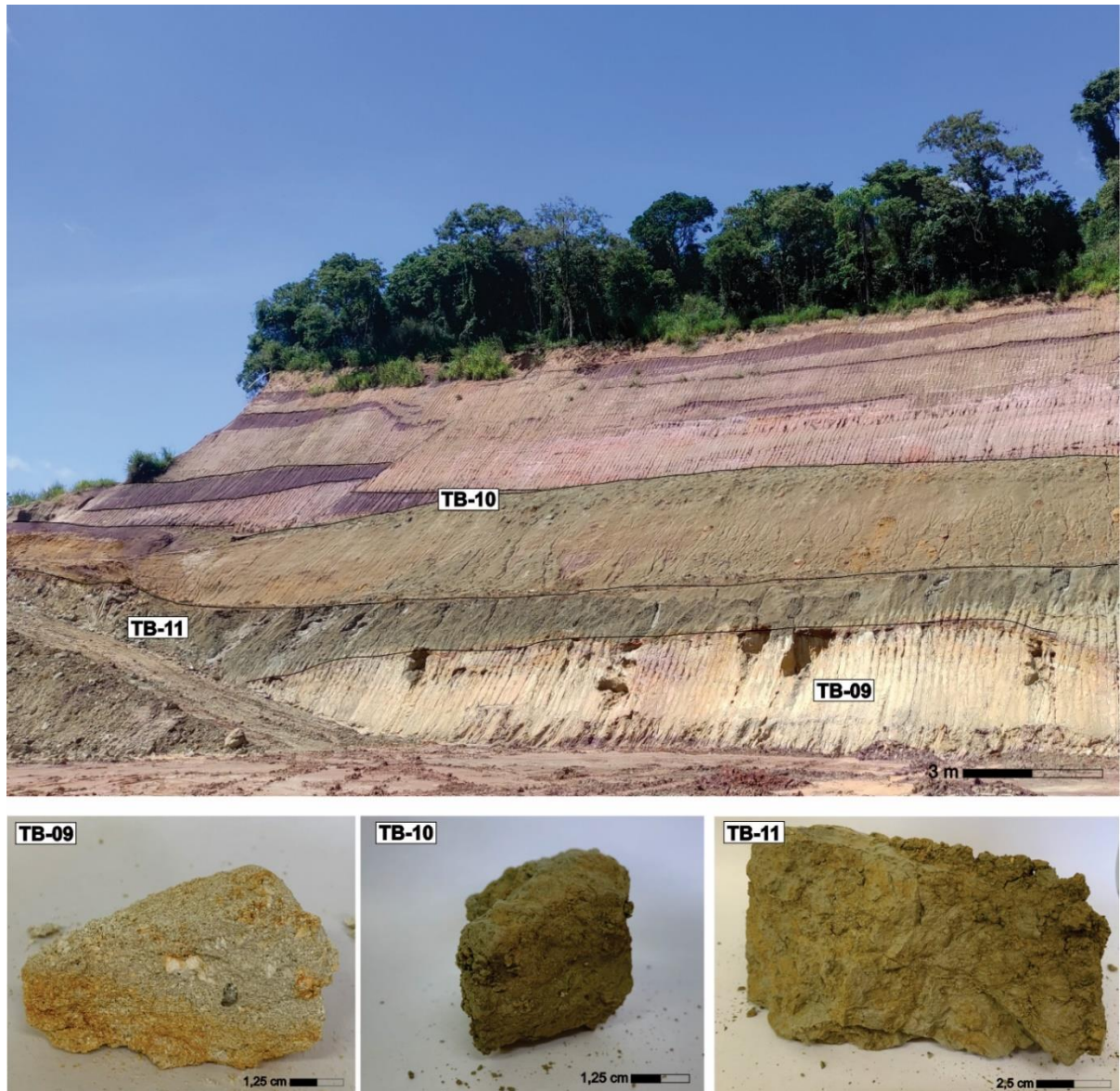


Figura 15- Afloramento da Extração de Areia Taboão, de onde foram extraídas as amostras TB-12 e TB-13.

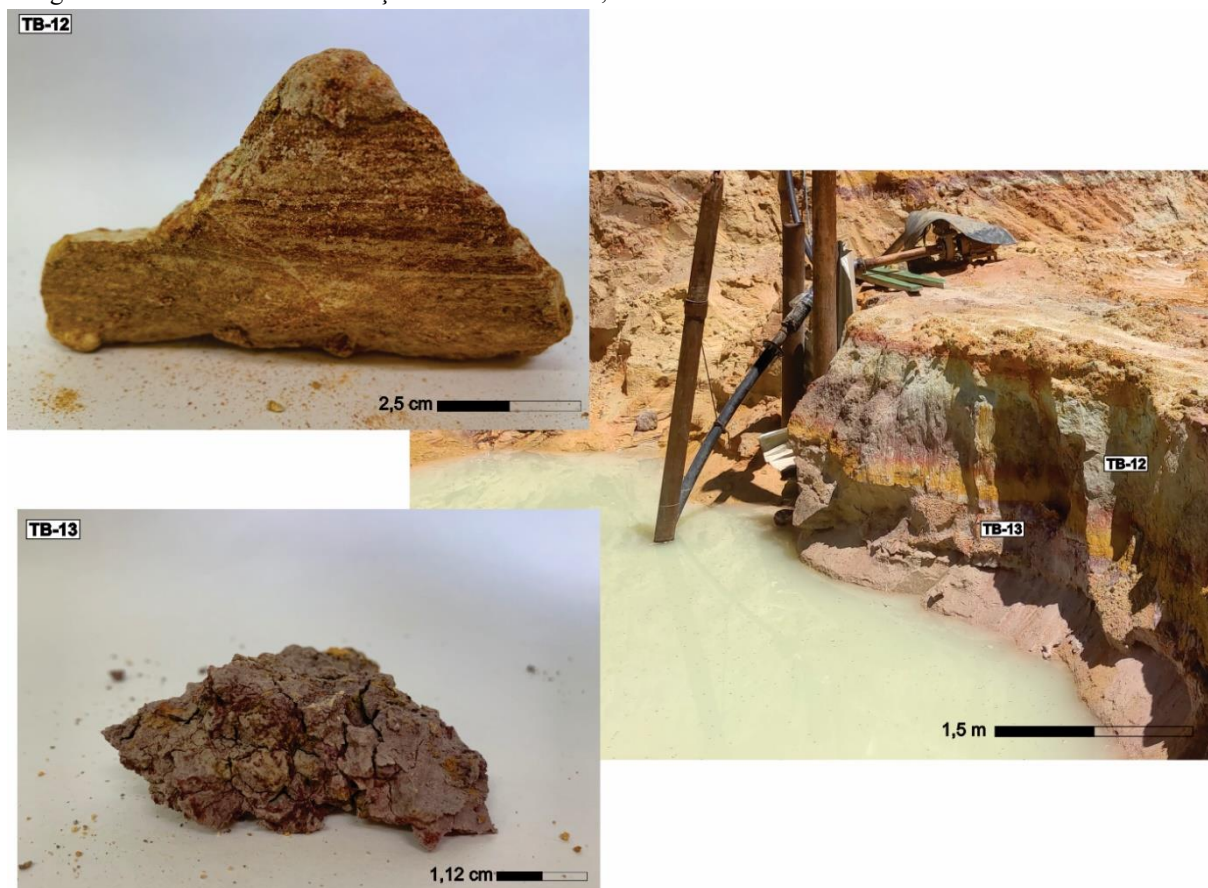


Tabela 1 - Amostras coletadas na Extração de Areia Taboão

EXTRAÇÃO DE AREIA TABOÃO				
Amostra	X	Y	Campanha de Campo	Formação
TB-01	376788	7411757	1ª Campanha	Formação São Paulo
TB-02	376788	7411757	1ª Campanha	Formação São Paulo
TB-03	376788	7411757	1ª Campanha	Formação São Paulo
TB-04	376790	7411824	1ª Campanha	Formação Resende
TB-05	376790	7411824	1ª Campanha	Formação São Paulo
TB-06	376790	7411824	1ª Campanha	Formação Resende
TB-07	376490	7411824	1ª Campanha	Formação São Paulo
TB-08	376490	7411824	1ª Campanha	Formação Resende
TB-09	376741	7411799	2ª Campanha	Formação Resende
TB-10	376799	7411748	2ª Campanha	Formação Resende
TB-11	376772	7411767	2ª Campanha	Formação Resende
TB-12	376760	7411967	2ª Campanha	Formação Resende
TB-13	376760	7411967	2ª Campanha	Formação São Paulo
TB-14	376760	7411967	2ª Campanha	Formação Resende

3.2.2 Extração de Areia Itaquareia

Localizada adjacente a Extração de Areia Taboão, a Extração de Areia Itaquareia contempla a terceira unidade do Grupo Itaquareia. Foi realizada a mesma coleta sistemática de amostras, resultando na amostragem de oito amostras, das quais duas pertencentes à Formação São Paulo e cinco à Formação Resende (Figura 16 e Tabela 2). Estas amostras receberam a nomenclatura de IT. Todas as amostras foram encaminhadas para a confecção de lâminas delgadas, metalização e desagregação, visando posterior submissão às técnicas escolhidas.

Figura 16 – Amostras da Extração de Areia Itaquareia, IT-01, IT-02, IT-03, IT-04, IT-05, IT-06 e IT-08.



Tabela 2 - Amostras coletadas na Extração de Areia Itaquareia (Unidade 3)

EXTRAÇÃO DE AREIA ITAQUAREIA				
Amostra	x	y	Campanha de Campo	Formação
IT-01	377131	7411886	2ª Campanha	Formação Resende
IT-02	377131	7411886	2ª Campanha	Formação Resende
IT-03	377131	7411886	2ª Campanha	Formação Resende
IT-04	377131	7411886	2ª Campanha	Formação Resende
IT-05	377131	7411886	2ª Campanha	Formação Resende
IT-06	377069	7412005	2ª Campanha	Formação São Paulo
IT-08	377069	7412005	2ª Campanha	Formação São Paulo

3.2.3 Companhia Metropolitano de São Paulo – METRÔ

Foram utilizados neste trabalho os dados de 131 sondagens a percussão (SPT), rotativas e mistas de 4'', disponibilizadas pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, correspondentes a perfurações realizadas para a construção da Linha Celeste (Figura 11).

As sondagens utilizadas neste trabalho estão concentradas na zona norte da RMSP e na cidade de Guarulhos (Figura 17). A organização das informações geotécnicas provenientes das sondagens a percussão, rotativas e mistas exemplificadas é detalhada no Anexo 1. A Figura 18 apresenta um modelo de perfil individual de sondagem utilizado para a extração dos dados. Esse banco de dados foi utilizado na seleção das sondagens mais apropriadas para investigação petrográfica.



Figura 18 - Modelo de Perfil individual de sondagem disponibilizado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, referente à sondagem número 9381.

PROFUNDIDADE	COTAS	AVANÇO	AMOSTRAS	CLASSIFICAÇÃO TÁCTIL-VISUAL DO SOLO DESCRIÇÃO DO MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO GEOLOGICA	COR	CONVENÇÃO GRÁFICA
0.15	766,37		0	Piso de concreto		Vermelho	
1			1	Argila pouco arenosa (areia fina), pouco plástica, muito mole a mole	AT		
2			2				
3			3				
4			4				
5.00	761,52		5	Argila arenosa (areia fina a média), com pedregulhos finos a médios, medianamente consistente		Vermelho claro e cinza	
6.00	760,52		6	Areia fina a média argilosa, pouco compacta		Vermelho claro	
7.00	759,52		7	Argila arenosa (areia fina a grossa), medianamente consistente		Amarelo, rosa e cinza	
8.00	758,52		8	Areia fina a grossa argilosa, pouco compacta		Amarelo	
9.00	757,52	9.00	9	Argila arenosa (areia fina), medianamente consistente		Amarelo e cinza	
10.00	756,52		10	Areia fina a grossa argilosa, pouco a medianamente compacta		Amarelo	
11			11				
12.00	754,52		12	Argila arenosa (areia fina a grossa), mole		Amarelo	
13.00	753,52		13	Areia fina a grossa argilosa, fofa		Roxo claro e cinza claro	
14.00	752,52		14	Argila arenosa (areia fina), medianamente consistente		Amarelo escuro	
15.00	751,52		15	Areia fina a média argilosa, pouco compacta		Amarelo escuro e cinza	
16.10	750,42		16	Argila pouco siltosa, medianamente consistente a rija		Amarelo	
17			17				
18.20	748,32		18	Areia fina a média argilosa, pouco caulínica, medianamente compacta a compacta		Amarelo a branco	
19			19				
20.00	746,52		20	Areia média a grossa argilosa, medianamente compacta		Amarelo	
21			21				
22.20	744,32		22	Argila pouco arenosa (areia fina), rija a muito rija		Cinza	
23			23				
24.10	742,42		24	Areia fina a média pouco argilosa, medianamente compacta		Cinza claro e roxo claro	
25			25				
26.30	740,22		26	Argila pouco siltosa, rija		Cinza	
27			27				
28			28				
29			29				
30.00	736,52		30	Argila pouco arenosa (areia fina), muito rija		Cinza	
31			31				
32.00	734,52		32	Argila pouco siltosa, rija		Cinza e amarelo	
33.20	733,32		33	Areia média a grossa pouco argilosa, compacta		Variegado	
34			34				

PROFUNDIDADE	COTAS	AVANÇO	AMOSTRAS	CLASSIFICAÇÃO TÁCTIL-VISUAL DO SOLO DESCRIÇÃO DO MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO GEOLOGICA	COR	CONVENÇÃO GRÁFICA
34.30	732,22		34	Argila pouco siltosa, dura			
35			35				
36			36				
37			37				
38			38				
39			39				
40			40				
41			41				
42			42				
43			43				
44			44				
45			45				
46			46				
47			47				
48			48				
49.00	717,52		49	Areia fina argilosa, muito compacta		Cinza	
50			50				
51			51				
52.00	714,52		52	Areia fina a média pouco argilosa, muito compacta		Cinza	
53			53				
54			54				
55			55				
56			56				
57			57				
58			58				
59			59				
60			60				
61			61				
62			62				
63.15	703,37	63.15	63	Fim de sondagem a 63,15 m			
64			64				

LINHA	CELESTE	COORDENADAS	DE-19.34.00.00/2W2-9381
LOCAL	Avenida Tiradentes - Guarulhos/SP		
SONDAGEM Nº	DIREÇÃO	COORDENADAS	E 171,181.03
SP-9381	INCLINAÇÃO	VERTICAL	N 259,880.02

Onze sondagens foram selecionadas do acervo Metroviário para amostragem (Tabela 3), com base na quantidade e qualidade das amostras recuperadas (Figura 19-A, B), bem como na disposição espacial ao longo da extensão da linha do Metrô (Figura 20), segundo um perfil amostral sequencial (Figura 21). O objetivo foi garantir que as amostras selecionadas representassem da melhor forma possível a variação diagenética das unidades analisadas dentro o conjunto de amostras mais preservadas. Desta forma, foram confeccionadas 29 lâminas (Figura 19-D), das quais 10 pertencem à Formação São Paulo e 19 à Formação Resende. Foram metalizados 43 fragmentos de rocha para análise ao microscópio eletrônico de varredura e espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (Figura 19-C).

Figura 19 – (A) Foto representativa das amostras dos testemunhos de sondagem disponibilizadas pelo Metrô; (B) Detalhe de uma das amostras dos testemunhos de sondagens disponibilizadas pelo Metrô; (C) Fragmentos de rocha das amostras do Metrô, antes da metalização; (D) Fragmento de rocha impregnado com resina antes da confecção de lâmina (amostra MT03-18)

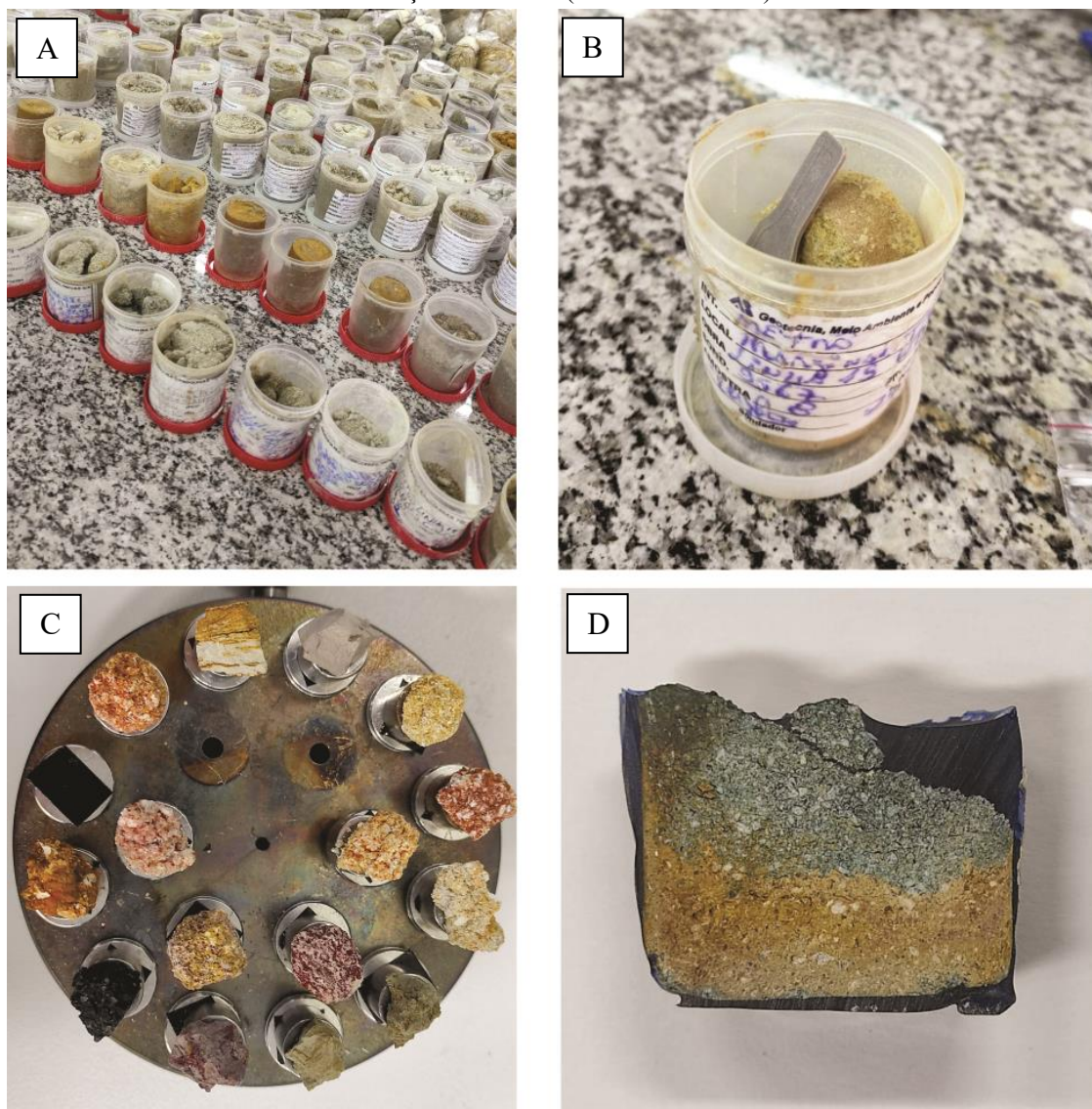
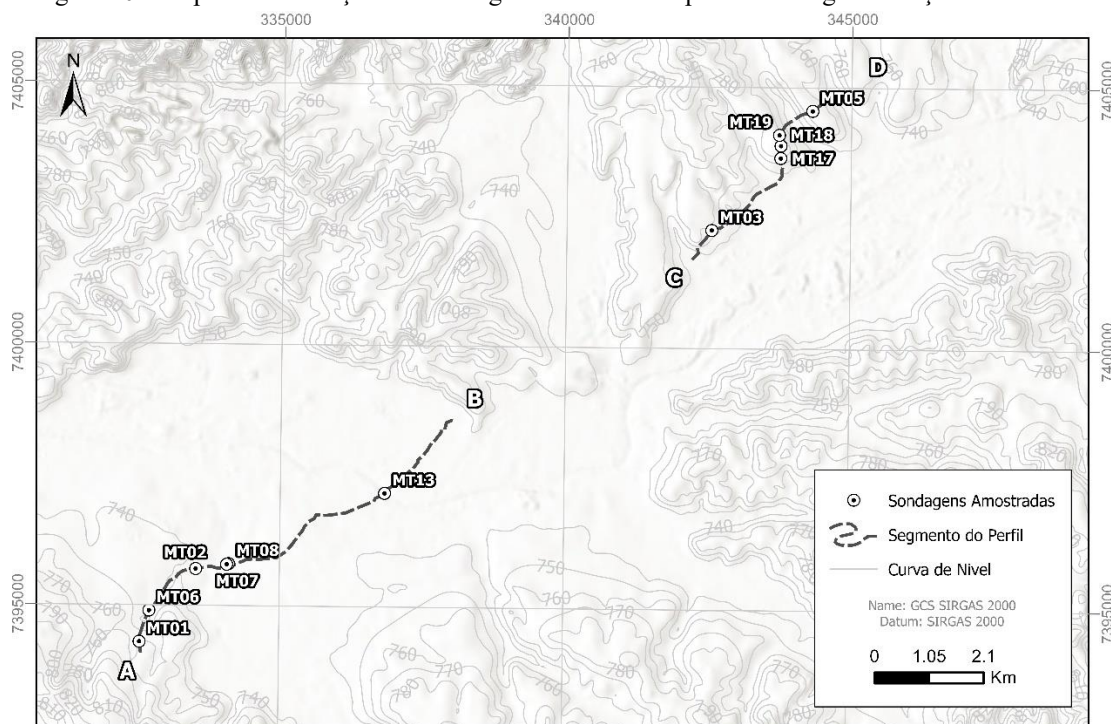


Tabela 3 - Sondagens selecionadas para amostragem e respectivas amostras

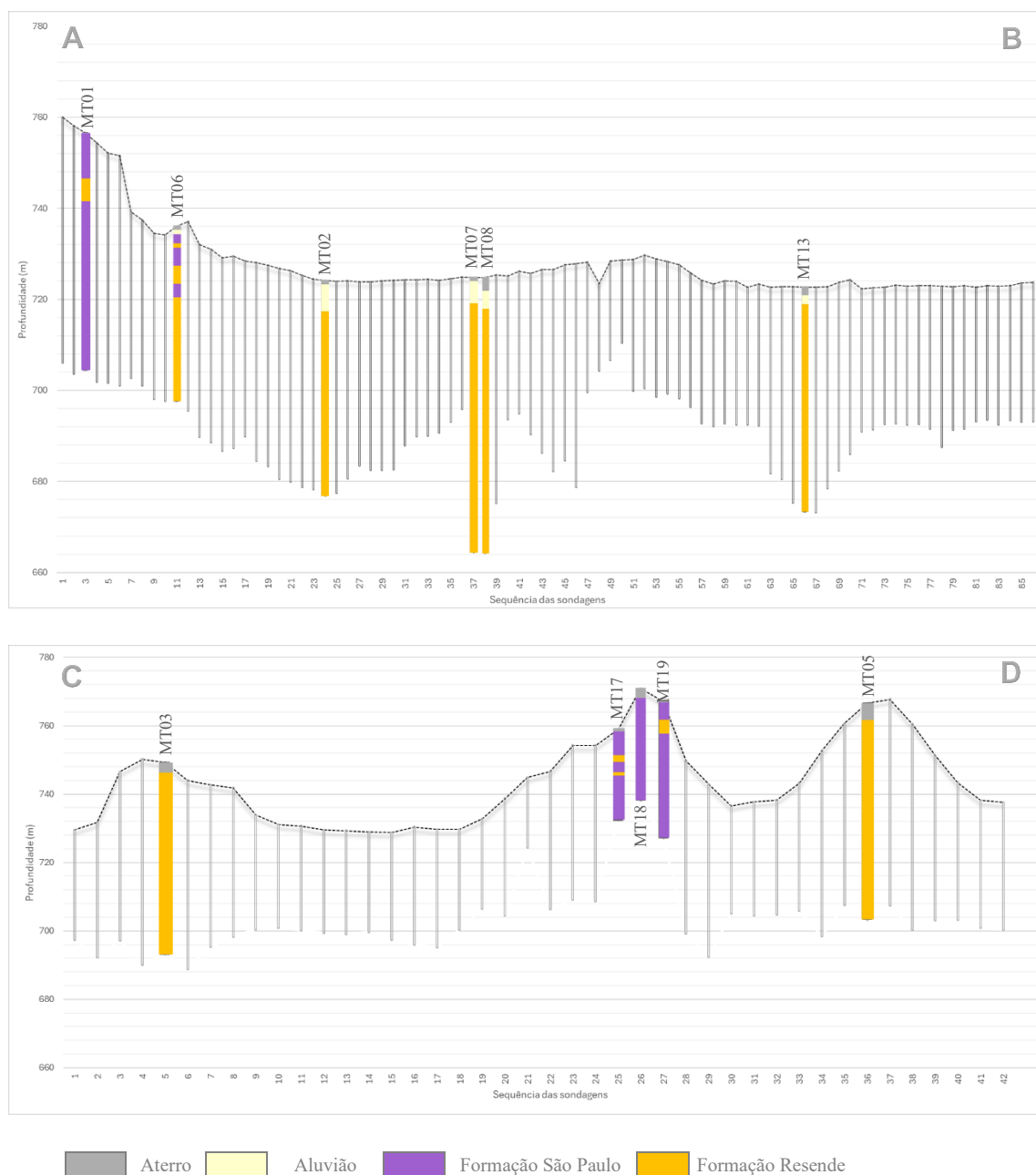
Sondagens selecionadas para Amostragem					Quantidade de Amostras		
Nº							
Sondagem	Nomenclatura	X	Y	Cota	Profundidade	Lâmina	MEV
SP9614	MT01	332542	7394299	756.54	52.45	6	7
SP9449	MT06	332708	7394896	736.07	38.45	2	1
SP9409	MT02	333524	7395699	724.22	47.3	-	1
SP9237	MT07	334069	7395787	724.81	60.36	7	8
SP9230	MT08	334103	7395799	724.72	60.42	1	1
SP9567	MT13	336838	7397180	722.63	49.27	4	4
SP9293	MT03	342552	7402259	749.27	56.1	5	6
SP9347	MT17	343756	7403660	758.99	26.15	1	3
SP9353	MT18	343759	7403890	770.9	32.45	-	3
SP9358	MT19	343728	7404100	767.11	39.06	-	2
SP9381	MT05	344311	7404556	766.52	63.15	3	7

Figura 20 - Mapa de localização das sondagens selecionadas para amostragem – Seções A-B e C-D



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 21 – Perfis de amostragem sequencial das sondagens da Linha Celeste disponibilizadas pela Companhia do Metropolitano de São Paulo – Seções A-B e C-D



Adicionalmente às sondagens, foram disponibilizados 126 ensaios de difratometria de raios X, correspondentes aos intervalos amostrados das sondagens disponibilizadas. O anexo 2 exemplifica o banco de dados das análises de difração de raios X, apresentando informações tanto qualitativas quanto quantitativas.

3.3 Análise Petrográfica

As amostras selecionadas de testemunhos e de afloramentos foram encaminhadas para a confecção de lâminas delgadas e metalização, para serem submetidas às técnicas de Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura, respectivamente. Outras nove amostras da Extração de Areia Taboão foram submetidas à análise total e à análise de finos por Difração de raios X; foram também analisados difratogramas cedidos pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, compiladas no banco de dados disponível no Anexo 2.

3.3.1 Descrição Macroscópica

Durante a fase de coleta em campo, as amostras obtidas foram sujeitas a uma análise macroscópica sistemática preliminar, que envolveu uma avaliação visual direta com base na composição mineral, textura (granulometria), estrutura sedimentar, grau de compactação e cor.

3.3.2 Microscopia Óptica

As amostras selecionadas para microscopia óptica foram encaminhadas ao Laboratório de Laminação LABLAM da UNESPetro, IGCE- Rio Claro-SP, para confecção de lâminas delgadas. No processo, adotou-se o método de impregnação de Cesero *et al.* (1989), o qual consiste na impregnação de amostras com resina epóxi e corante azul de metileno, e posterior laminação a 0,03 mm, de forma a serem analisadas em microscópio de luz transmitida.

Essa abordagem foi empregada em virtude da sua capacidade de realçar e evidenciar espaços vazios existentes na matriz das rochas sedimentares, permitindo uma visualização mais nítida de poros e vazios em escala microscópica. Tal aprimoramento da visualização contribuiu para uma análise minuciosa da distribuição, textura, geometria e conectividade dos poros, aspectos importantes no contexto de unidades aquíferas. Com isso, foi possível a avaliação qualitativa e quantitativa dos poros, viabilizando a identificação de porosidade secundária. A opção de utilização desta técnica foi fundada na necessidade de caracterização da permeabilidade e armazenamento de fluidos em um reservatório.

A análise petrográfica foi realizada utilizando-se o Microscópio Axio Imager.A2 Zeiss, com câmera acoplada, da UNESPetro, e teve como propósito a descrição e identificação da

composição mineralógica e textural do arcabouço das rochas sedimentares, bem como a determinação da composição mineralógica da matriz e dos cimentos que envolvem os grãos do arcabouço.

Adicionalmente, foram investigadas as fases autigênicas presentes, visando estabelecer as relações paragenéticas e reconstruir a história diagenética das unidades. Essa abordagem também buscou a caracterização de aspectos texturais como granulometria, forma, arredondamento e composição mineralógica dos grãos. A quantificação petrográfica foi realizada a partir da contagem de 200 componentes em seções delgadas ao longo de transectas perpendiculares à estrutura e textura da rocha analisada; tais contagens permitiram determinar a abundância de grãos no arcabouço, cimento, matriz e porosidade em porcentagem presente nas lâminas.

A caracterização petrográfica priorizou a descrição de parâmetros texturais e composicionais, de modo a melhor evidenciar as características diagenéticas. Os aspectos texturais utilizados constam na tabela 4, tendo sido descritos com base tanto na composição do arcabouço quanto da matriz. Para a granulometria foi utilizada a classificação de Wentworth (1922).

Tabela 4 – Parâmetros texturais utilizados na descrição das lâminas petrográficas

Seleção	Tamanho dos grãos (diâmetro em mm)	Contatos	Arredondamento	Arcabouço
mb=mta boa	af= areia fina	p = pontual	ar = arredondado	sg = sustent. grãos
b = boa	am= areia média	f = flutuante	sar = subarredon.	sm = sustent. matriz
m = média	amf=areia fina a média	s = suturado	san = subangular	sc = sustent. cimento
r = ruim	ag= areia grossa	r = reto	an = anguloso	
Empacotamento	Porosidade	Matriz	Cimento	Orientação
fr = frouxo	inter = intergran	p = pouca	carb = carbonático	est=estratíf.
m = médio	intra = intragran	m = moderada	ferr = ferruginoso	gr=gradação
n = normal		e = elevada	sil = silicático	
fc = fechado			arg = argiloso	

Para a classificação mineralógica das rochas foi utilizado o diagrama ternário de Folk (1974). As porcentagens de constituintes essenciais foram recalculadas para totalizar 100%, com base nos índices QFL, conforme abaixo descritos:

Q: Inclui todos os tipos de quartzo: monocristalinos, policristalinos ou quartzos isolados dentro de fragmentos de rochas;

F: Inclui todos os tipos de feldspatos, de composição potássica ou sódico-cálcica, além de fragmentos de granito e gnaiss de granulação grossa;

L: Inclui todos os fragmentos de rocha vulcânica, sedimentar ou metamórfica, com granulação fina inferior a 0,06 mm, como: sílex, ardósia, xisto, vulcânica, calcário, arenito, entre outras.

3.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

As amostras selecionadas para Microscopia Eletrônica de Varredura foram fragmentadas, de forma que representassem integralmente a totalidade do material. A espécie separada foi fixada em um porta-amostras de microscópio (*stub*), por meio de um adesivo condutor de carbono, considerando a melhor orientação em relação ao feixe de varredura. Posteriormente procedeu-se à cobertura da amostra por evaporação a vácuo, aplicando uma camada condutora de ouro por meio do processo de *sputtering*. Esse método assegurou uma deposição uniforme e fina do metal sobre a amostra, preservando a resolução da imagem e garantindo uma eficiente produção de elétrons secundários.

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram efetuadas no equipamento SEM *Scanning Electron Microscope*, JEOL, no LEBAC, UNESP, Rio Claro, utilizando detectores de elétrons secundários e retroespalhados (*backscattered*), e Analisador de Energia Dispersiva (EDS) acoplado.

3.3.4 Difractometria de Raios X

As amostras da Extração de Areia Taboão para análise por difração de raios X foram submetidas a dois métodos de preparação diferentes: método de difração de rocha total e método de difração de fração fina, para determinação de argilominerais.

Antes de serem submetidas a qualquer um desses métodos, as amostras consolidadas foram desagregadas em partes menores e submetidas a um processo de pulverização no moinho almofariz pistilo MA590; posteriormente o material passou por seleção em peneira, com vistas a homogeneizar o tamanho das partículas de amostra em 10 μm , evitando-se desvios ou distorções nas medidas. Para a análise difratométrica total, o material previamente pulverizado foi colocado em um porta-amostra, de forma que não tivesse orientação.

Para a caracterização dos argilominerais presentes na rocha, a fração fina (argila) foi isolada por meio de sedimentação em proveta, conforme estabelecido na Lei de Stoke, utilizando o método proposto por Brindley (1980). Neste procedimento, a amostra pulverizada é introduzida em uma proveta preenchida com água até a marca de 1000 mL, sendo então homogeneizada e submetida à decantação por um período de 5 minutos. Após a decantação, os primeiros 300 mL superiores foram retirados da proveta por meio de pipetagem. A porção extraída foi deixada em descanso por um período de 24 horas, para decantação do material argiloso. Posteriormente, esse material foi separado e pipetado em lâminas de vidro esterilizadas com álcool 70° GL, assegurando a disposição adequada dos minerais para análise subsequente.

O equipamento utilizado para as análises foi o Difratômetro de Raios-X D2 PHASER/Brunker, do LARIN - UNESPetro - UNESP - Rio Claro. O difratograma é equipado com um contador proporcional e analisador de altura de pulso por radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.54184\text{\AA}$), voltagem 30kV e corrente elétrica de 10 mA. Os espectros de difração foram coletados em intervalos específicos, adaptados para cada tipo de identificação (fração total ou fração fina). A rotação do girômetro foi configurada a uma velocidade de 15°/min, com um passo de 0,02. As fendas características usadas foram de 0,6 mm para análise da fração total, 0,1 mm para análise do pico 060 e 0,2 mm para a análise da fração fina.

Os porta-amostras contendo materiais moídos foram submetidos a uma varredura na faixa de 4° a 90° em 2θ , com o propósito de caracterizar a assembleia mineral das rochas a partir dos picos gerados. Em seguida, foi conduzida a análise por meio do pico 060 na amostra total, que compreendeu uma varredura de 59,1° a 62,3°, garantindo a identificação de argilominerais di ou trioctaédricos.

O material na fração argila (<2 μm), orientado sobre lâmina, foi submetido a uma varredura de material fino para identificação dos picos presentes na faixa de 2° a 28° em 2θ . A lâmina de material fino foi então submetida a solvatação por etilenoglicol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) em um

recipiente fechado, por 16 horas, e foi então submetida a uma nova difração de raios X, a fim de identificar os argilominerais expansíveis. Posteriormente, a mesma lâmina foi aquecida a uma temperatura de 500 °C, por 1 hora, sendo em seguida submetida a uma nova análise.

Os difratogramas gerados foram analisados e interpretados no Programa DIFFRAC.SUITE EVA (BRUKER), comparados com padrões existentes em banco de dados fornecido pelo PDF-4 Minerals 2023 e o PDF-2 2003, permitindo a identificação dos minerais das amostras (análise qualitativa). Além disto, para uma melhor identificação dos minerais finos, foi realizada uma qualificação dos argilominerais a partir da Tabela “Clay Mineral Identification Flow Diagram” da USGS, Tabela “Spacings of reflections of minerals likely to occur in clays listed in order decreasing d(Å)” e a Tabela de valores d(060) e 2θ para argilominerais de Brindley (1980).

3.3.5 Caracterização Microscópica

Para a análise petrográfica da Formação São Paulo e da Formação Resende foram utilizadas 17 lâminas de amostras de arenitos provenientes das Extrações de Areia Taboão e Itaquareia, e 29 lâminas de arenitos do Metrô, contemplando as diferentes fácies definidas por Kutner e Bjornberg (1997), conforme anteriormente explicitado. Correspondente à Formação São Paulo, foram selecionadas 10 amostras da fácies 3Ar₁ e 6 amostras da fácies 3Ar₂. Correspondente à Formação Resende, foram selecionadas 14 amostras da fácies 2Ar₁, 4 amostras da fácies 2Ar₂ e 11 amostras da fácies 2Ar₃. As descrições e separações geotécnicas de fácies das amostras foram baseadas nas descrições dos perfis das respectivas sondagens, conferindo-se sua veracidade conforme necessário.

Para a microscopia eletrônica de varredura foram utilizados 67 fragmentos de rochas metalizados.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização Petrográfica

4.1.1 Caracterização Macroscópica

A descrição macroscópica detalhada permitiu a aplicação do sistema de classificação de unidades geológico-geotécnicas utilizado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, conforme descrito na seção 2.3 (Tabela 5).

Tabela 5 – Descrição e classificação das amostras das Extrações de Areia Taboão e Itaquareia.

Amostra	Formação	Descrição	Fácies Geotécnica
TB-01	Formação São Paulo	Areia fina a média siltosa, pouco compactada, com coloração roxa e cinza	3Ar ₁
TB-02	Formação São Paulo	Areia fina a média siltosa, com coloração cinza, e laranja avermelhada	3Ar ₁
TB-03	Formação São Paulo	Argila arenosa (areia fina) com coloração roxa, dura, maciça	3Ag ₂
TB-04	Formação Resende	Argila maciça, dura, com coloração cinza esverdeada	2Ag ₁
TB-05	Formação São Paulo	Areia fina a média siltosa, compactada, com coloração laranja esbranquiçada e vermelha, e variações plano-paralelas de cores; Argila plástica, com coloração variegada	3Ar ₁
TB-06	Formação Resende	Areia fina a média, medianamente compactada, com coloração amarela e cinza,	2Ar ₁
TB-07	Formação São Paulo	Argila siltosa, dura, variegada (com variação de cor entre roxo e vermelho)	3Ar ₁
TB-08	Formação Resende	Areia média a grossa pouco siltosa, com fragmentos de quartzo e feldspato, medianamente compactada, com coloração bege, laranja e amarela	2Ar ₃
TB-09	Formação Resende	Areia média a grossa, pouco siltosa, com fragmentos de quartzo e feldspato, compactada, amarela e cinza	2Ar ₃
TB-10	Formação Resende	Argila siltosa, dura, com coloração cinza esverdeada	2Ag ₁
TB-11	Formação Resende	Argila arenosa (areia fina), dura, com coloração cinza	2Ag ₂
TB-12	Formação Resende	Areia fina a média pouco siltosa, muito compacta, com bandas paralelas de variação de coloração e granulação, e coloração amarela, cinza e vermelha	2Ar ₁
TB-13	Formação São Paulo	Argila, consistência média, friável, variegada (com variação de cor entre roxo e vermelho)	3Ag ₂
TB-14	Formação Resende	Areia média a grossa, medianamente compactada, coloração laranja, amarela e cinza	2Ar ₂
IT-01	Formação Resende	Argila siltosa, plástica, dura, coloração cinza marrom	2Ag ₁
IT-02	Formação Resende	Areia média com variação plano-paralela de cores amarelas e cinzas; Areia média a grossa com fragmentos de quartzo, feldspatos e micas, com coloração laranja e cinza	2Ar ₃
IT-03	Formação Resende	Areia média a grossa com fragmentos maiores de quartzo e feldspato, medianamente compactada, com coloração alaranjada	2Ar ₃
IT-04	Formação Resende	Areia média a grossa, com gradação granocrescente, com fragmentos de quartzo e feldspatos, coloração avermelhada, cinza e laranja	2Ar ₃
IT-05	Formação Resende	Areia fina a grossa com seixos de quartzo e feldspatos, medianamente compactada, com coloração vermelha	2Ar ₃
IT-06	Formação São Paulo	Areia fina a média argilosa, compactada, com variação de coloração por bandas cinzas e vermelhas	3Ar ₁
IT-08	Formação São Paulo	Areia fina a grossa argilosa, com seixos de feldspato e quartzo, medianamente compactada, com coloração roxo avermelhada e branca	3Ar ₂

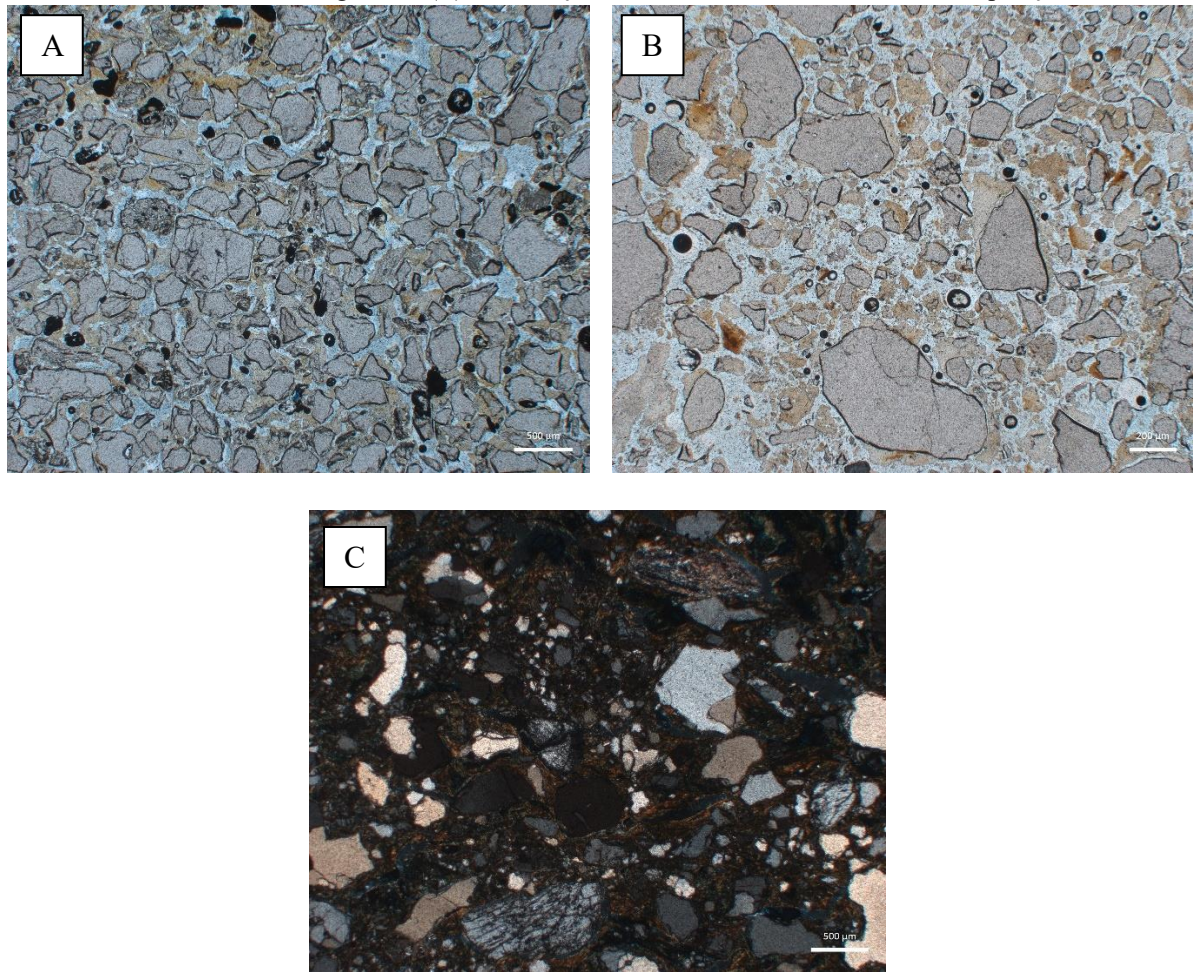
4.1.1 Composição Mineralógica e Textura dos Arenitos

4.1.1.1 Formação São Paulo

Foram analisadas 11 amostras de arenitos da Formação São Paulo que representam a fácies geotécnica 3Ar₁, sendo 6 correspondentes às amostras das Extrações de Areia Taboão e Itaquareia e 5 correspondentes às amostras dos testemunhos disponibilizados pelo Metrô. Macroscopicamente, a fácies 3Ar₁ foi descrita como uma areia argilosa de granulação fina a média, com compactação moderada, e coloração amarela e vermelha. Microscopicamente, esses arenitos foram caracterizados por uma granulometria que varia de areia fina a grossa, com seleção modal média. Os grãos são em geral subangulares a subarredondados (Figura 22-A). O empacotamento dos grãos varia de frouxo a médio, predominando contatos flutuantes e pontuais. O arcabouço é sustentado pelos grãos e matriz argilosa moderada com cimento ferruginoso, e uma média de 27%. A porosidade é predominantemente intergranular, com uma média de 20,4%; subordinadamente ocorre porosidade intergranular, com uma média de 1,5%.

Os arenitos correspondentes à fácies geotécnica 3Ar₂ foram caracterizados com base em seis amostras, sendo uma amostra da Extração de Areia Itaquareia e cinco do Metrô. Macroscopicamente, esta fácies foi descrita como areia argilosa de granulação variada, que contém pedregulhos, com compactação de moderada a elevada e coloração vermelha. Microscopicamente, os arenitos da fácies 3Ar₂ da Formação São Paulo são caracterizados por apresentarem granulometria que varia de areia média a areia muito grossa, com grânulos maiores que 2 mm e seleção modal ruim. Os grãos são subarredondados a arredondados (Figura 22-B). O empacotamento dos grãos é frouxo, predominando contatos flutuantes. O arcabouço é sustentado pelos grãos e matriz argilosa, com cimento ferruginoso, em média de 19%. A porosidade dominante é a intergranular, com uma média de 19,8%; subordinadamente ocorre também porosidade intragranular, com uma média de 1,4%.

Figura 22 - Formação São Paulo: (A) Arcabouço característico da fácies 3Ar₁ ; (B) Arcabouço característico da fácies 3Ar₂, com cimento ferruginoso ; (C) Arcabouço característico da fácies 3Ar₁ com composição arcoseana.



Essas duas fácies são constituídas predominantemente por grãos de quartzo, feldspato, fragmentos de rocha, minerais opacos, sendo comum a presença de muscovita; ocorrem minerais acessórios como zircão, titanita, rutilo e augita. A matriz é formada por argilominerais infiltrados e o cimento tem composição argilosa e ferruginosa. Os arenitos da Formação São Paulo são classificados, de acordo com Folk (1974), essencialmente como arcóseos e subarcóseos, excetuando quatro amostras da fácies 3Ar₁ e 3Ar₂ classificadas como sublitanarenitos e quartzarenitos (Figura 23 e Tabela 6). Ressalta-se que a decomposição dos grãos de feldspatos, que será posteriormente melhor abordada, pode mascarar a classificação destes arenitos no diagrama de Folk.

Figura 23- Composição dos arenitos da Formação São Paulo, segundo critério de Folk (1968)

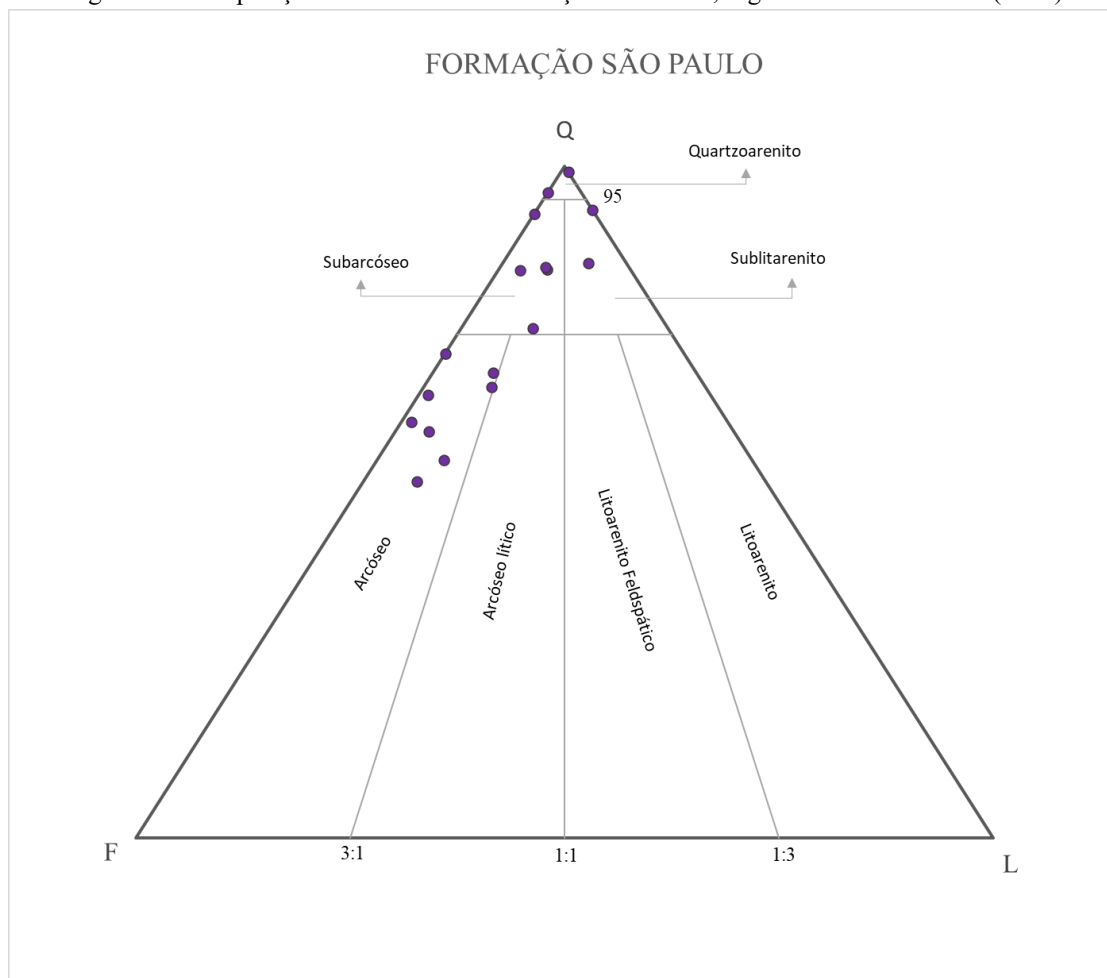


Tabela 6 – Composição percentual de Q, F e L das amostras da Formação São Paulo e nomenclatura segundo Folk (1968).

Amostra	Litologia	Qz mono e policristalino (%)	Feldspatos (%)	Fragmentos Líticos (%)	Nome da Rocha
MT01-19	3Ar ₁	96.0629921	3.937008	0	Quartzarenito
MT01-43	3Ar ₂	93.4579439	0	6.542056	Sublitoarenito
MT01-24	3Ar ₂	92.920354	7.079646	0	Subarcóseo
MT01-16	3Ar ₂	75.9259259	15.74074	8.333333	Subarcóseo
MT03-05	3Ar ₁	69.2982456	23.68421	7.017544	Arcóseo
MT17-18	3Ar ₁	84.6774194	9.677419	5.645161	Subarcóseo
MT01-08	3Ar ₂	99.1071429	0	0.892857	Quartzarenito
MT06-05	3Ar ₁	84.4827586	12.93103	2.586207	Subarcóseo
MT06-07	3Ar ₂	84.9557522	9.734513	5.309735	Subarcóseo
MT01-05	3Ar ₁	85.5555556	4.444444	10	Sublitoarenito
TB-01	3Ar ₁	60.5769231	35.57692	3.846154	Arcóseo
TB-02	3Ar ₁	72.1518987	27.8481	0	Arcóseo
TB-05A	3Ar ₁	53.125	40.625	6.25	Arcóseo
TB-05B	3Ar ₁	67.1052632	25	7.894737	Arcóseo
TB-07	3Ar ₁	61.9047619	36.90476	1.190476	Arcóseo

IT-06	3Ar ₁	56.25	35.9375	7.8125	Arcóseo
IT-08	3Ar ₂	65.9574468	32.97872	1.06383	Arcóseo

4.1.1.2 Formação Resende

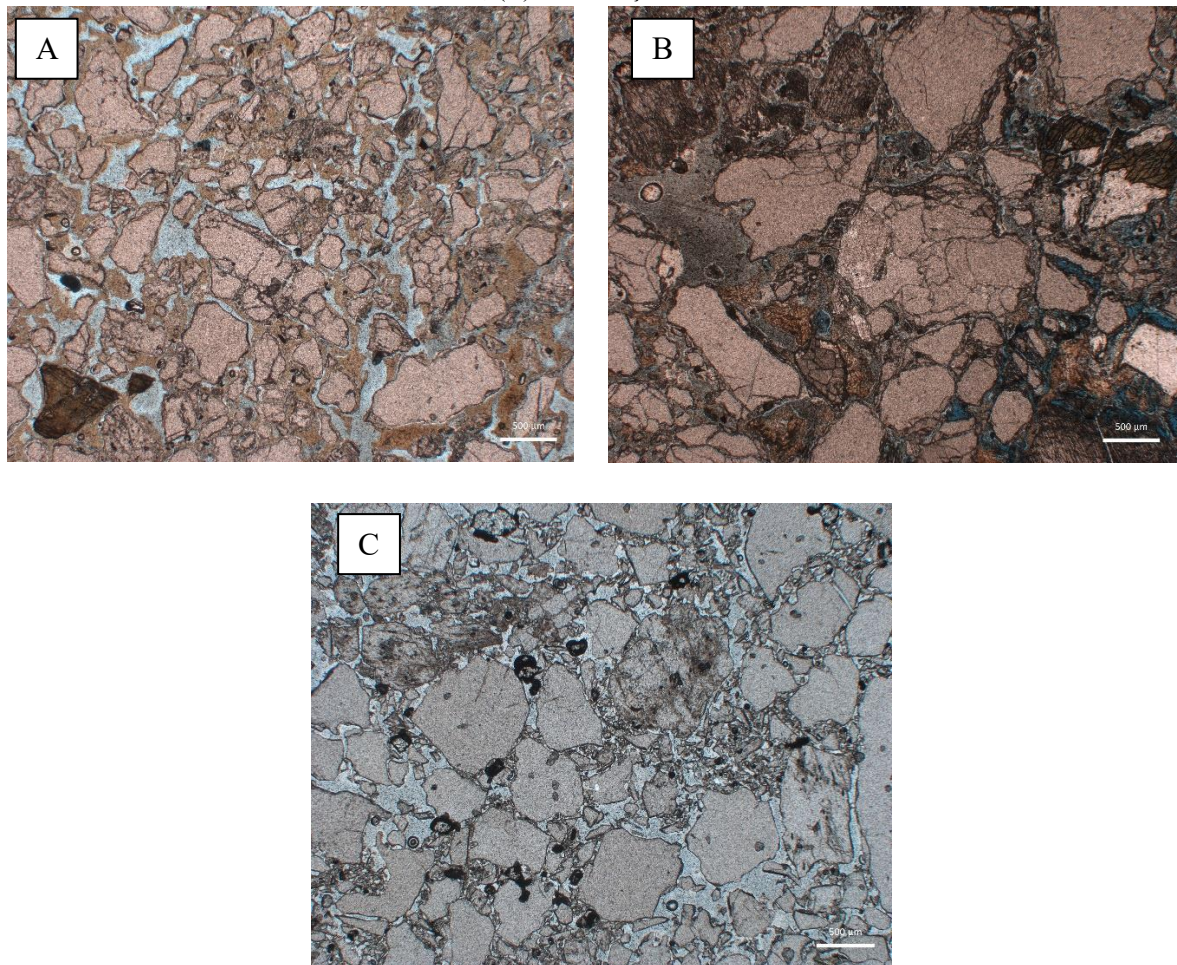
Foram analisadas 14 amostras de arenitos da Formação Resende que representam a fácies geotécnica 2Ar₁, sendo 2 correspondentes às amostras da Extrações de Areia Taboão e Itaquareia e 12 correspondentes às amostras dos testemunhos disponibilizados pelo Metrô. Macroscopicamente essa fácies foi descrita como areia argilosa com granulação fina a média, pouco siltosa, com compactação leve a moderada, e coloração cinza a amarela. Microscopicamente, os arenitos 2Ar₁ da unidade são caracterizados por uma granulometria que varia de areia fina a muito grossa (>1mm), com seleção modal média. Os grãos são em geral subangulares a subarredondados (Figura 24-A). O empacotamento dos grãos varia de muito frouxo a normal, aumentando com a profundidade; predominam contatos pontuais e flutuantes; ocasionalmente, em profundidade, ocorrem contatos retos. O arcabouço é sustentado pelos grãos e localmente pela matriz argilosa, com presença variando de pouca a moderada; com cimento ferruginoso, compondo uma média de 17%. A porosidade é predominantemente intergranular, com uma média de 17,8%; a porosidade intragranular é subordinada, com uma média de 0,7%.

Os arenitos correspondentes à fácies geotécnica 2Ar₂ foram caracterizados com base em quatro amostras, sendo três amostras das Extrações de Areia e uma do Metrô. Macroscopicamente essa fácies foi descrita como areia siltosa com granulação média a grossa, com compactação moderada, cinza amarelada. Microscopicamente, os arenitos da fácies 2Ar₂ apresentam granulometria de areia grossa, com seleção modal ruim. Os grãos apresentam-se subarredondados. O empacotamento dos grãos é frouxo a médio, predominando contatos pontuais (Figura 24-B). O arcabouço é sustentado pelos grãos, e a matriz siltosa, que se apresenta moderada, ocorre com uma média de 11,6%. A porosidade é predominantemente intergranular, com uma média de 23%; a porosidade intragranular é um pouco mais expressiva nesta fácies, com uma média de 2,25 %.

Foram analisadas 11 amostras de arenitos da fácies 2Ar₃, representados por 4 amostras do Metrô e 7 amostras das Extrações de areia. Macroscopicamente, esta fácies foi descrita como areia siltosa, de granulação média e grossa, com fragmentos de quartzo e seixos variados, com compactação moderada e coloração cinza amarelada. Microscopicamente, os arenitos da fácies

2Ar₃ apresentam granulação que varia de areia grossa a muito grossa, com grânulos de quartzo e feldspato (3 mm a 4 mm), caracterizando uma seleção ruim. Os grãos são subarredondados (Figura 24-C). O empacotamento dos grãos é frouxo e aumenta conforme a profundidade, podendo chegar a moderado; predominam contatos pontuais e retos. O arcabouço é sustentado pelos grãos e a matriz siltosa com cimento ferruginoso, presente em uma média de 18% nas amostras. A porosidade dominante é intergranular, que ocorre em média de 15%, podendo ocorrer também intragranular, com uma média de 1,32%.

Figura 24 - Formação Resende: (A) Arcabouço característico dos arenitos 2Ar₁; (B) Arcabouço característico dos arenitos 2Ar₂— amostra; (C) Arcabouço característico dos arenitos 2Ar₃.



Essas três fácies da Formação Resende são constituídas predominantemente por grãos de quartzo, feldspato, fragmentos líticos, minerais opacos, sendo comum a presença de muscovitas mecanicamente deformadas e acessórios como anfíbólio, titanita, augita, zircão, rutilo, turmalina, anatásio, entre outros. A matriz é formada por argilominerais infiltrados e o cimento tem composição argilosa. Os arenitos da Formação Resende foram classificados, de

acordo com Folk (1974), como arcóseos e subarcóseos, conforme mostrado na Figura 25 e Tabela 7, além de duas amostras classificadas como arcóseo lítico e uma como quartzoarenito.

Figura 25- Composição dos arenitos da Formação Resende segundo critérios de Folk (1974)

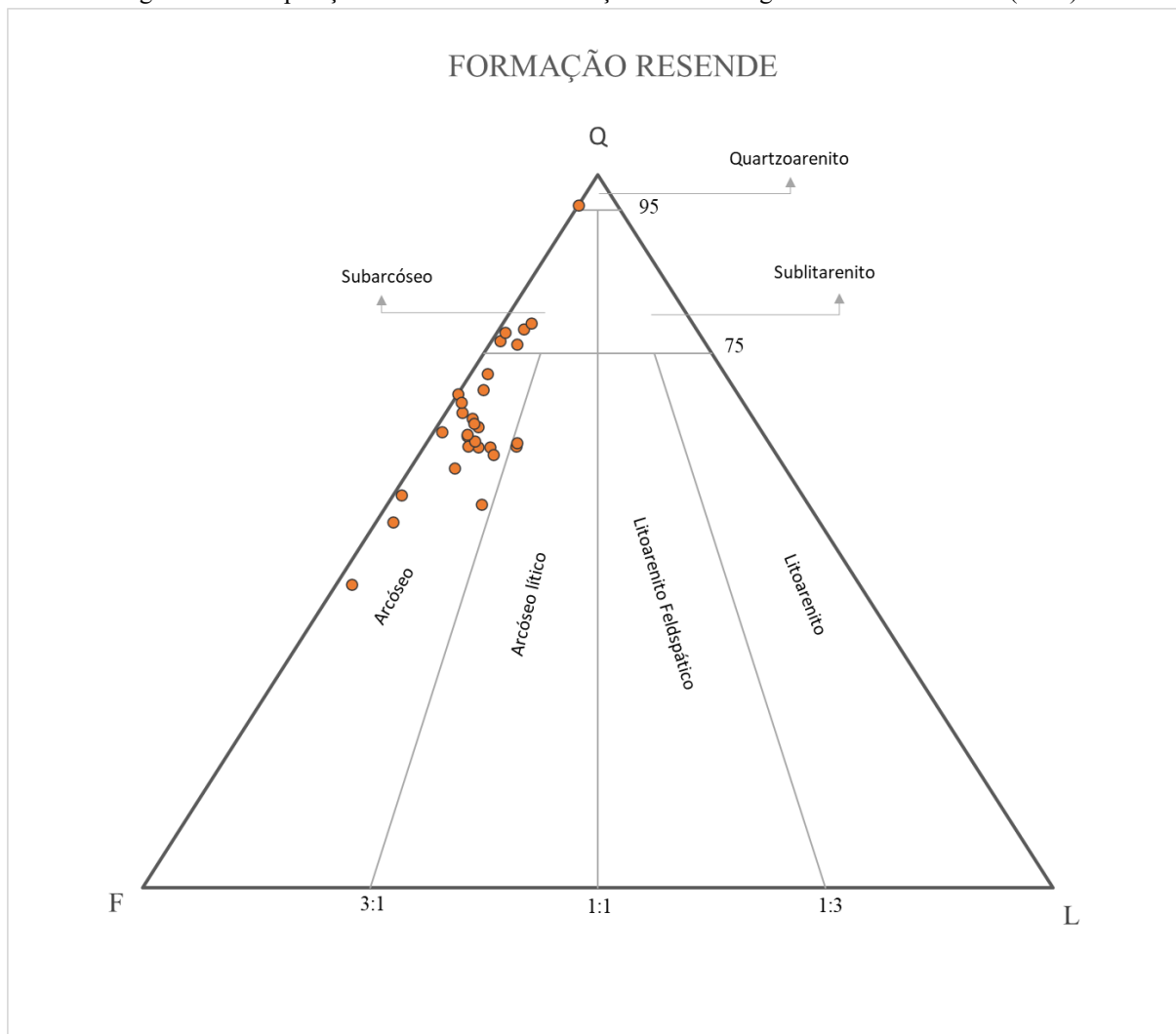


Tabela 7 - Composição percentual de Q, F e L das amostras da Formação Resende e respectiva nomenclatura segundo os critérios de Folk (1974).

Amostra	Litologia	Qz mono e policristalino (%)	Feldspatos (%)	Fragmentos Líticos (%)	Nome da Rocha
MT07-38	2Ar ₁	72.07207207	26.12612613	1.801801802	Arcóseo
MT13-38	2Ar ₁	65.85365854	30.89430894	3.25203252	Arcóseo
MT03-15	2Ar ₁	78.37837838	18.91891892	2.702702703	Subarcóseo
MT07-34	2Ar ₂	66.66666667	31.62393162	1.709401709	Arcóseo
MT13-21	2Ar ₂	76.72413793	22.4137931	0.862068966	Subarcóseo
MT07-17	2Ar ₂	69.23076923	30.76923077	0	Arcóseo
MT07-09	2Ar ₁	77.87610619	21.23893805	0.884955752	Subarcóseo
MT03-18	2Ar ₁	61.81818182	30.90909091	7.272727273	Arcóseo
MT03-26	2Ar ₁	76.23762376	20.79207921	2.97029703	Subarcóseo
MT03-44	2Ar ₃	61.86440678	32.20338983	5.93220339	Arcóseo

MT07-22	2Ar ₁	58.90410959	36.30136986	4.794520548	Arcóseo
MT07-60	2Ar ₃	63.39869281	32.67973856	3.921568627	Arcóseo
MT07-50	2Ar ₁	64.66165414	30.82706767	4.511278195	Arcóseo
MT13-47	2Ar ₁	61.9047619	33.33333333	4.761904762	Arcóseo
MT13-27	2Ar ₁	62.60869565	32.17391304	5.217391304	Arcóseo
MT05-20	2Ar ₃	63.63636364	32.57575758	3.787878788	Arcóseo
MT08-45	2Ar ₃	53.84615385	35.8974359	10.25641026	Arcóseo
MT05-52	2Ar ₁	79.23076923	17.69230769	3.076923077	Subarcóseo
MT05-19	2Ar ₁	95.74468085	4.255319149	0	Quartzoarenito
TB-06	2Ar ₁	60.74074074	31.11111111	8.148148148	Arcóseo
TB-12	2Ar ₁	62	28	10	Arcóseo Lítico
TB-14	2Ar ₂	51.37614679	46.78899083	1.834862385	Arcóseo
TB-08A	2Ar ₃	69.91869919	27.64227642	2.43902439	Arcóseo
TB08-B	2Ar ₃	68.14159292	30.97345133	0.884955752	Arcóseo
TB-09	2Ar ₃	55.04587156	44.03669725	0.917431193	Arcóseo
IT-02	2Ar ₃	62.37623762	27.72277228	9.900990099	Arcóseo Lítico
IT-03	2Ar ₃	65.15151515	31.06060606	3.787878788	Arcóseo
IT-04	2Ar ₃	63.96396396	35.13513514	0.900900901	Arcóseo
IT-05	2Ar ₃	42.62295082	55.73770492	1.639344262	Arcóseo

4.1.2 Arcabouço Mineralógico e Textura dos Arenitos

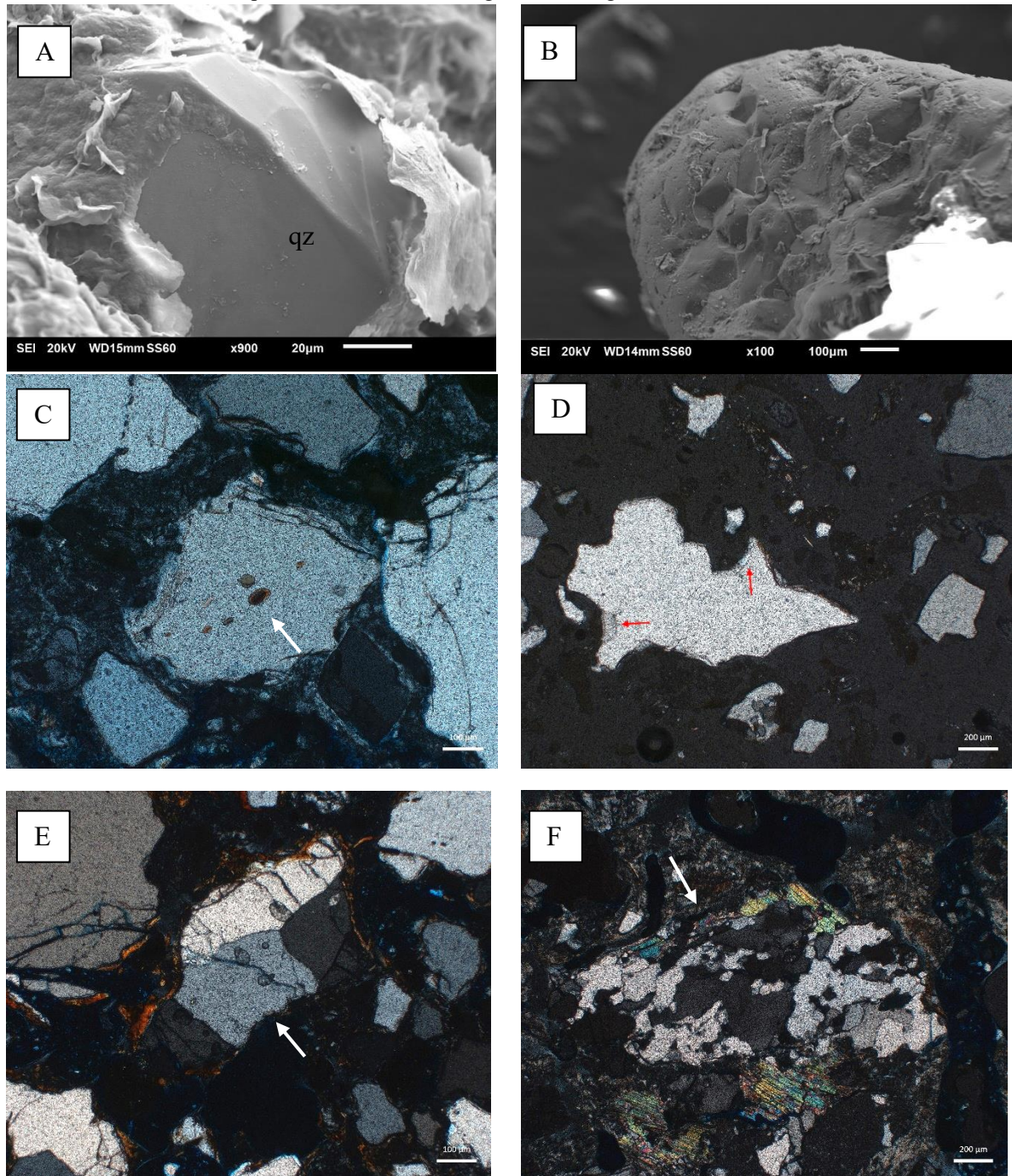
4.1.2.1 Quartzo

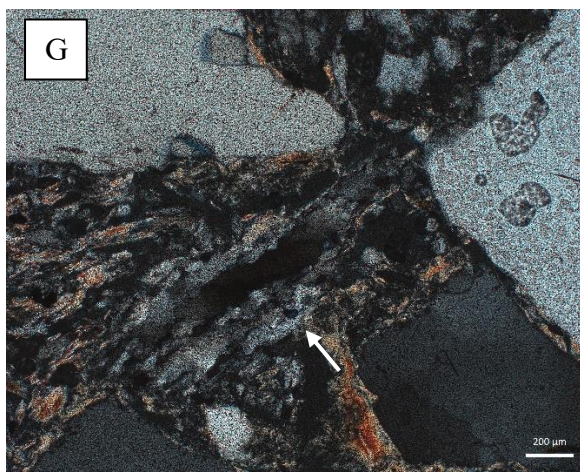
Os arenitos da Bacia de São Paulo apresentam composição mineralógica predominantemente de grãos de quartzo monocrystalinos, com média de 60,6% na Formação São Paulo e de 51,5% na Formação Resende. Em geral, os grãos monocrystalinos são angulosos a subarredondados, sendo que alguns apresentam golfos de corrosão ou inclusões (Figura 26 – A, B, C, D). Esses grãos de quartzo ocorrem em duas formas principais: a primeira, mais abundante, com extinção reta, pode indicar fragmentação de grãos de quartzo policristalino provenientes de uma área fonte composta por rochas ígneas plutônicas ou metamórficas de alto grau; a segunda, com extinção ondulante, tem origem normalmente atribuída a uma fonte metamórfica ou a granitos deformados.

Também ocorrem 3,4% de grãos de quartzo policristalinos, com três a quatro sub-grãos, na Formação São Paulo, e 5,5%, na Formação Resende (Figura 26 – E, F). Em geral estes grãos são angulosos com contatos irregulares e extinção reta, o que pode indicar uma fonte plutônica. Um quarto tipo de quartzo é encontrado, sendo policristalino com mais de quatro sub-grãos, ocorrendo em uma média de 6,6% na Formação São Paulo e 4,6% na Formação Resende. Esses

grãos apresentam extinção ondulante e forma equante, unidos por contatos côncavo-convexos e suturados, indicando proveniência de rochas de médio a alto grau metamórfico (Figura 26 – F, G).

Figura 26 – (A) Grão de quartzo monocristalino; (B) Grão de quartzo policristalino; (C) Grão de quartzo com inclusão de zircão (seta branca); (D) Grão de quartzo monocristalino apresentando golfo de corrosão (seta vermelha); (E) Grão de quartzo policristalino (seta branca); (F) Grão policristalino com > 4 subgrãos; (G) Grão policristalino com >4 subgrãos de alto grau metamórfico





4.1.2.2 Feldspatos

Os minerais do grupo de feldspatos ocorrem na maioria das amostras examinadas, podendo ser diferenciados feldspatos potássicos (ortoclásios e microclínios), e plagioclásios.

Os feldspatos potássicos representam a segunda classe de grãos mais abundante nas amostras analisadas, com uma média de 14,9% na Formação São Paulo e 20,5% na Formação Resende. Eles ocorrem comumente sem alteração ou em diferentes graus de alteração. Na Formação São Paulo, observou-se uma maior presença de feldspatos potássicos, tanto intactos quanto alterados, nas amostras das Extrações de Areia quando comparadas às amostras do Metrô, com médias de 26,2% e 7%, respectivamente. Também verificou-se que os feldspatos das Extrações de Areia estavam muito mais alterados em comparação às do Metrô, como pode ser observado na figura 27-A em comparação com a 27-B, refletindo uma porosidade intragranular que aumenta de uma média de 0,7% para 2,5%. Esse fato pode ser atribuído à exposição das amostras das Extrações de Areia à superfície, possibilitando uma ação mais efetiva da percolação de águas superficiais e do intemperismo. Além disso, pode-se evidenciar que a maior quantidade de feldspato da Formação São Paulo nas amostras das extrações de areia quando comparadas às amostras do Metrô indica uma variação de ambiente sedimentar dentro da formação. Regiões com maior quantidade de feldspato, menor grau de seleção e grãos mais angulosos podem estar associados a leques aluviais. Já as com menor quantidade de feldspato e melhor seleção podem corresponder a depósitos de barras de meandro e planície de inundação, o que pode ser o caso das amostras do Metrô.

O microclínio, que pode ser observado na figura 27-C, ocorre em diferentes estados de alteração, desde fresco a alterado, e é caracterizado pelas geminações do tipo *tartan* (geminção

albita-periclina xadrez), com uma média de 0,6% para a Formação São Paulo e 3,1% para a Formação Resende. Por outro lado, os plagioclásios apresentam geminações polissintéticas do tipo albita e ocorrem em uma média de 0,7% na Formação São Paulo e 3,4% na Formação Resende (Figura 27-D).

Os feldspatos em geral podem apresentar substituição parcial ou total por argilominerais, a partir de processos de alteração de feldspatos comuns em arenitos, como a caulinitização (BLATT, 1992), preservando a forma dos grãos, formando grãos alveolados, bordas corroídas ou moldes de dissolução (Figura 28). Normalmente ocorrem alterados, com evidência de dissolução gerando porosidade intragranular.

Figura 27 - (A) Feldspato potássico muito dissolvido da Formação São Paulo representativo das amostras das Extrações de Areia; (B) Feldspato potássico parcialmente dissolvido representativo das amostras do Metrô ; (C) Microclínio; (D) Feldspato Plagioclásio

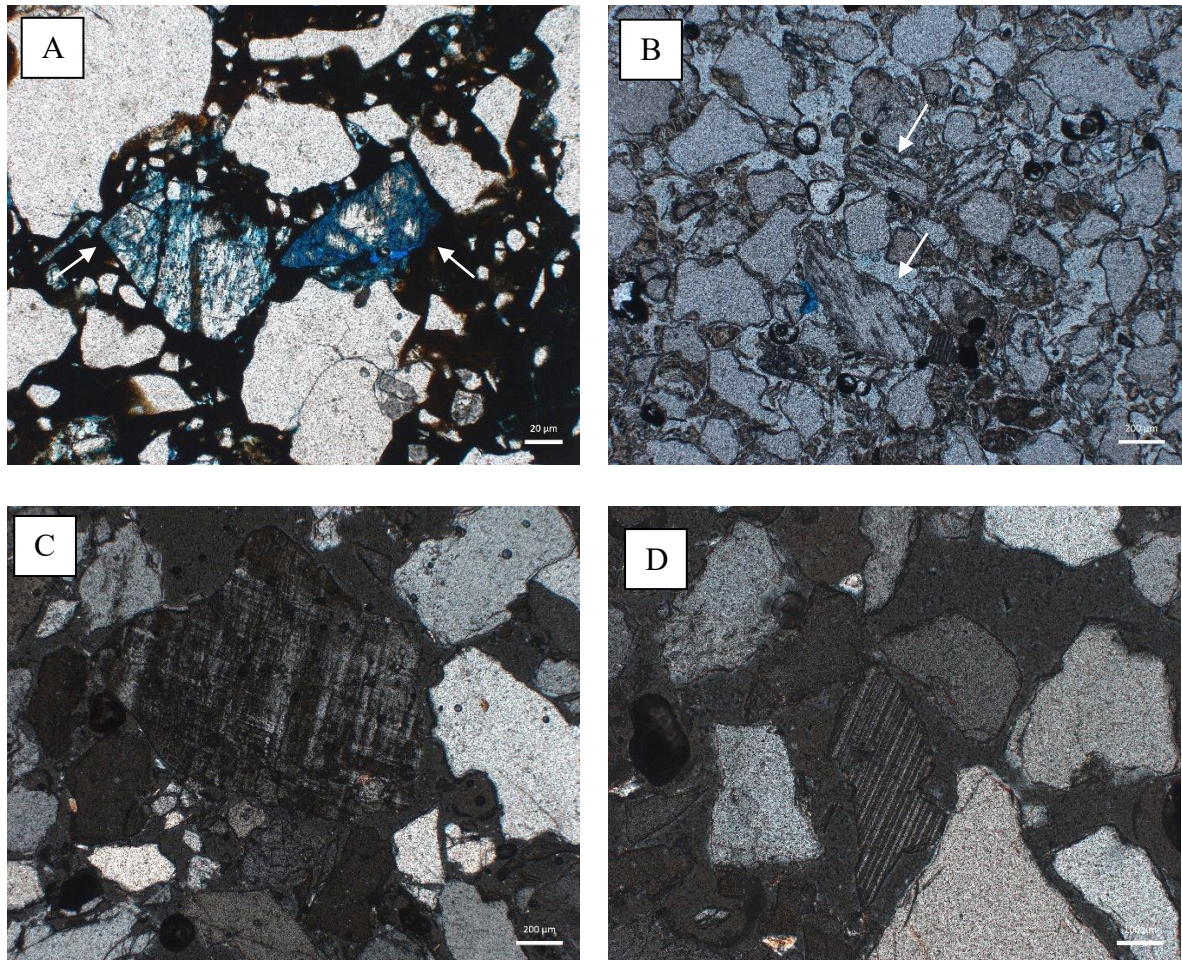
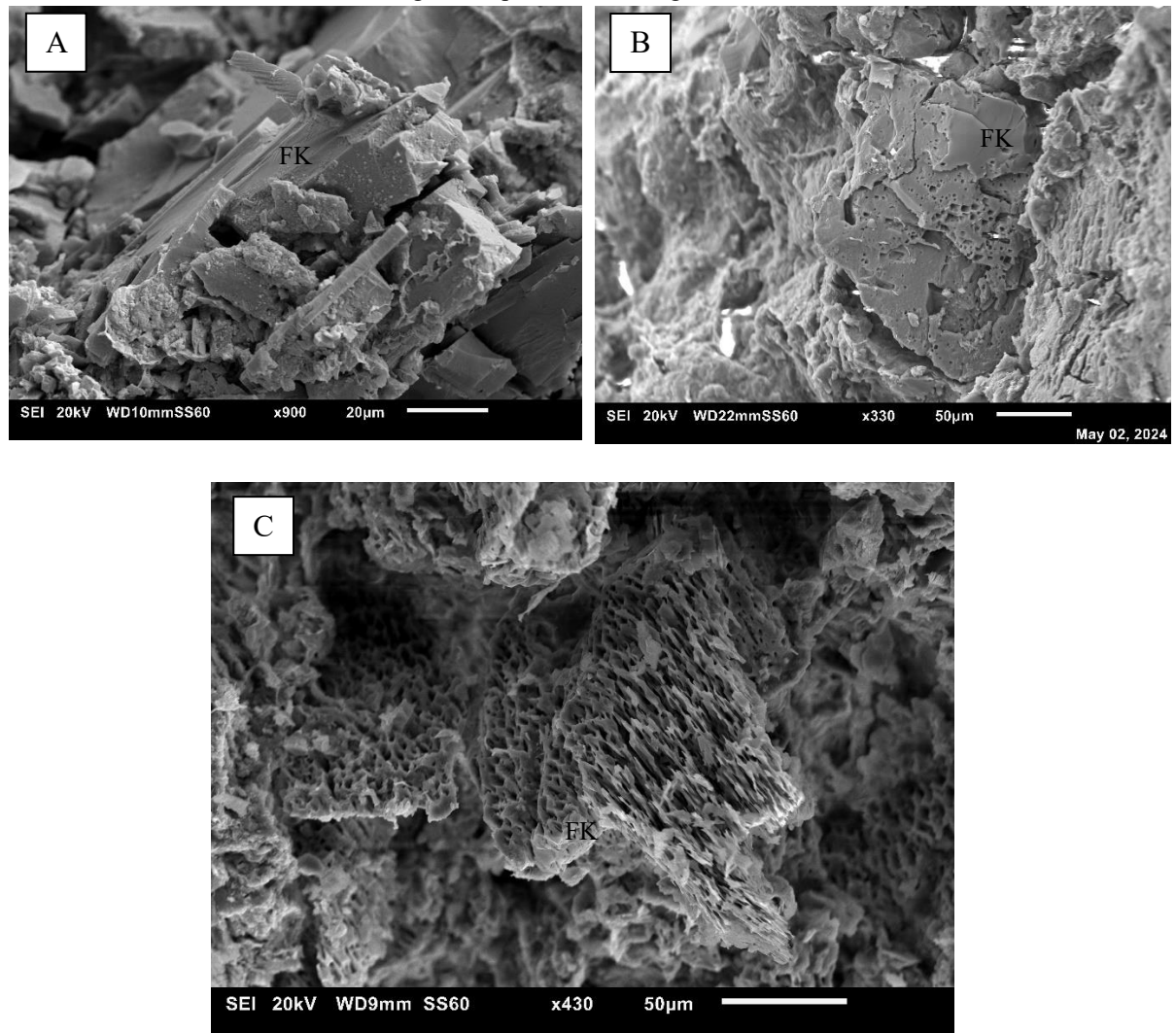


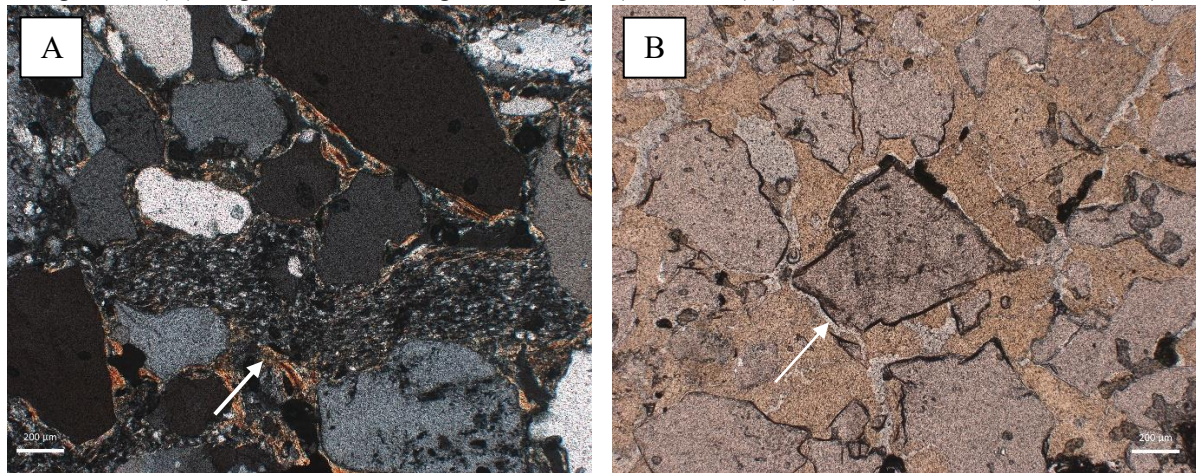
Figura 28 – Dissolução de Feldspato potássico em diferentes níveis observado em MEV: (A) Feldspato potássico_(FK) sem alteração, (B) Feldspato potássico parcialmente dissolvido _(FK); (C) Feldspato potássico _(FK) dissolvido, gerando porosidade intragranular secundária



4.1.2.3 Fragmentos Líticos

Os fragmentos líticos são pouco frequentes nos arenitos da Bacia de São Paulo. Foi encontrado uma média de 3,9% na Formação São Paulo e 3,4% na Formação Resende, sendo constituídos principalmente por clastos de argila, como pode ser observado na figura 29-A, e litoclastos vulcânicos, como pode ser observado na figura 29-B.

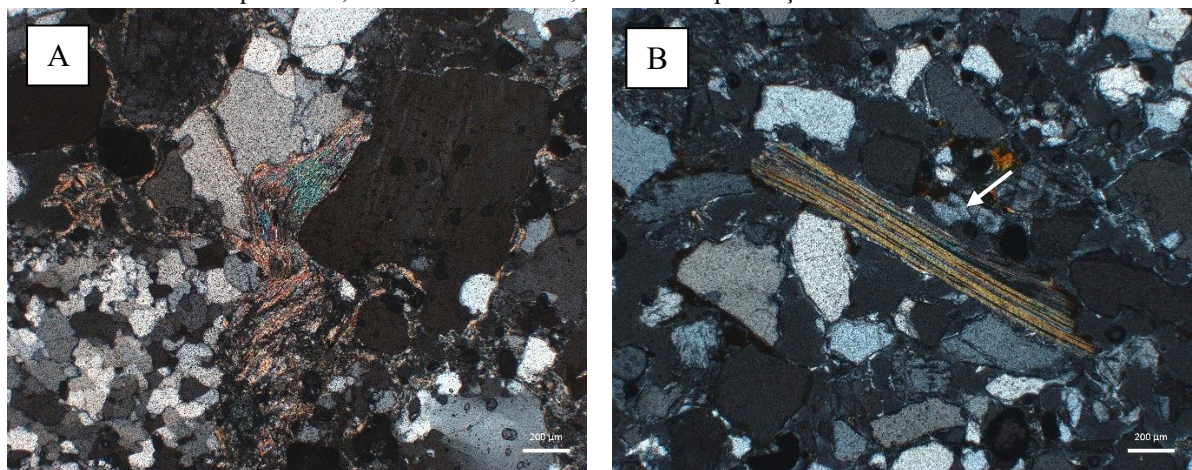
Figura 29 –(A) Fragmento lítico de argilito esmagado (seta branca), (B) Litoclasto vulcânico (seta branca)



4.1.2.4 Minerais Acessórios

Os minerais acessórios mais comuns são os filossilicatos muscovitas, que ocorrem em lamelas tabulares, por vezes dobradas ou fraturadas (Figura 30), em média de 5,27% na Formação São Paulo e 2,8% na Formação Resende. Também foram encontradas biotitas na microscopia eletrônica de varredura (Figura 31), por meio de análises de EDS, em menores proporções do que as muscovitas.

Figura 30- (A) Agregado de muscovita; (B) Grão de muscovita tabular (seta branca); (C) Fotomicrografia obtida por MEV, com análise de EDS, indicando a presença de muscovita



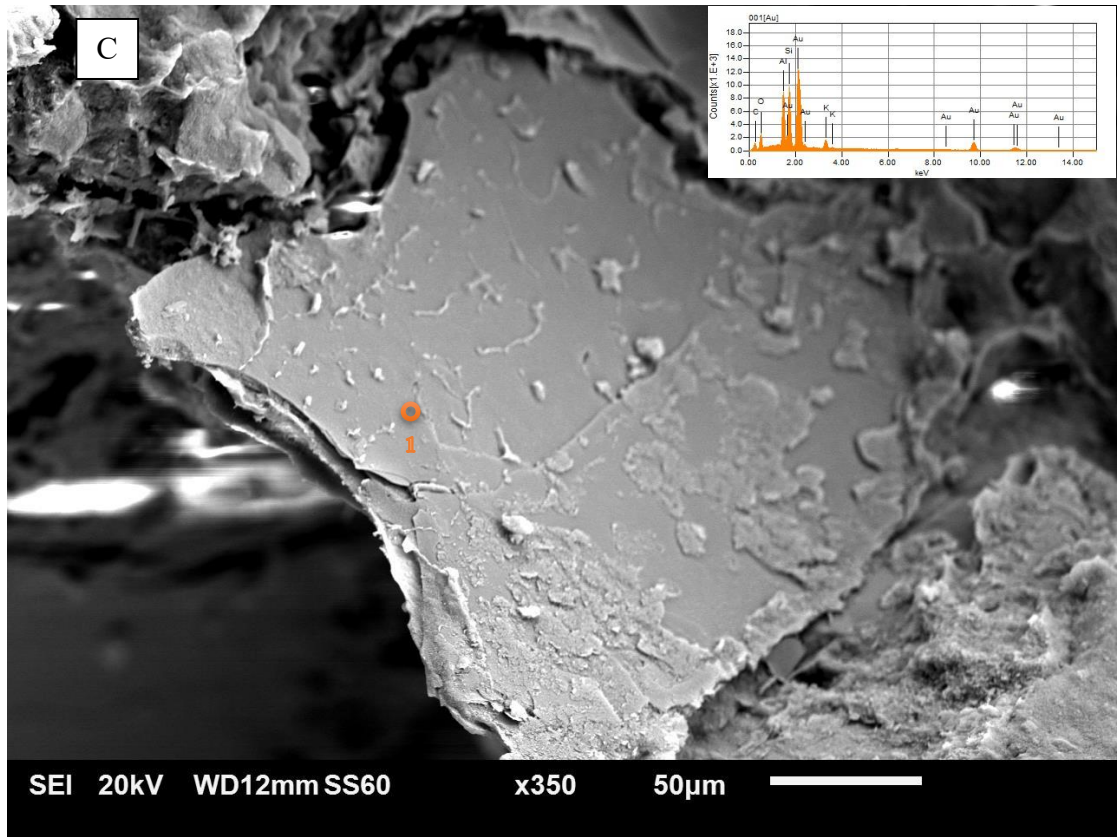
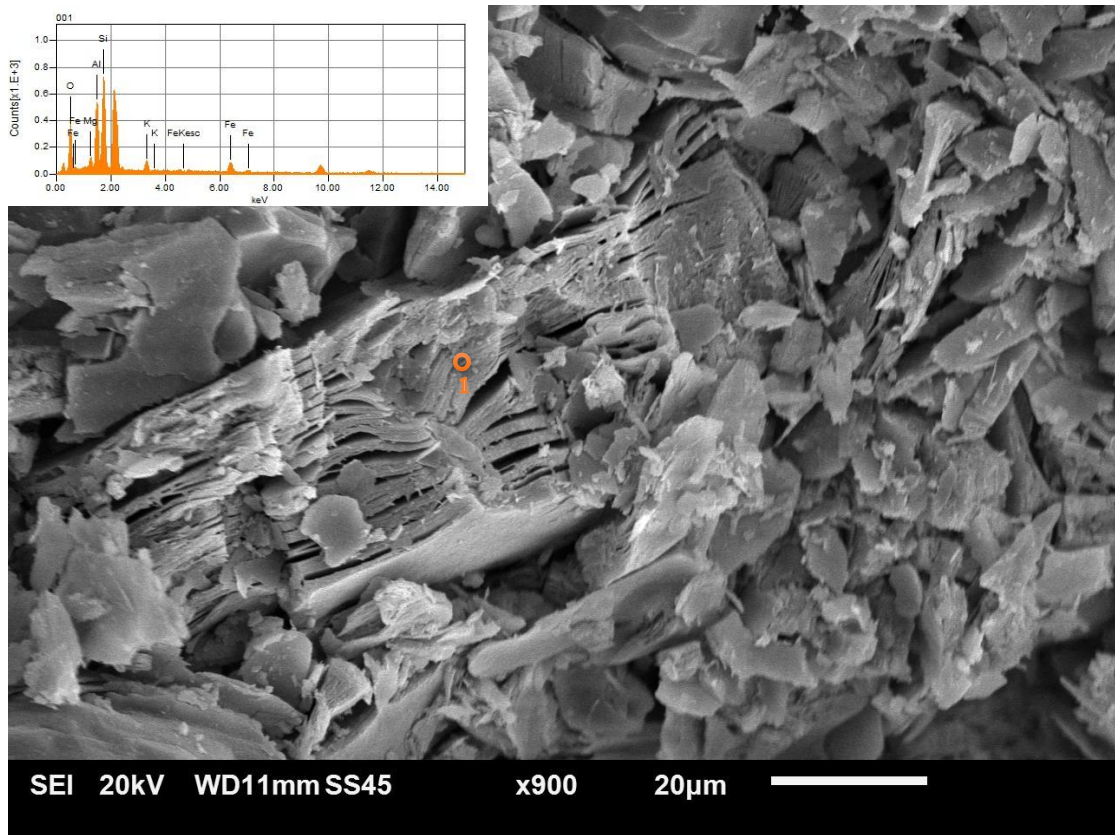
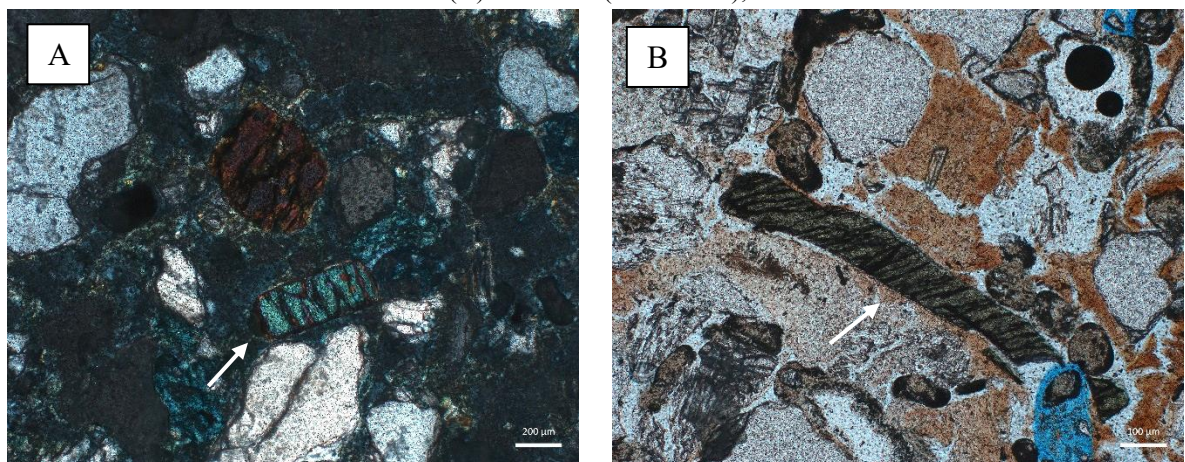


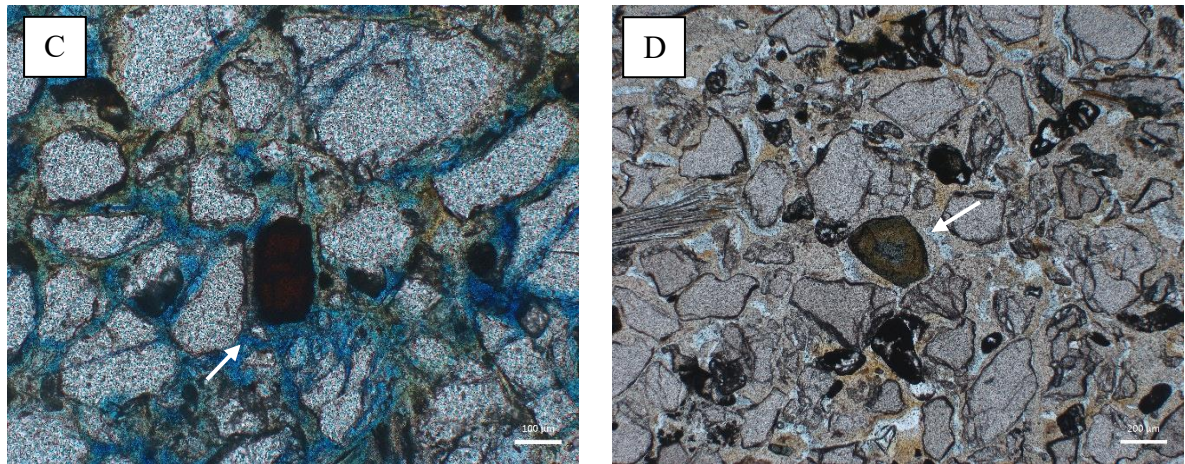
Figura 31-Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostrando biotita na amostra MT18-27



Outros minerais acessórios característicos que ocorrem em menor proporção são: augita, com dimensões pequenas e grãos arredondados (Figura 32-A); anfibólio, que mesmo instável apresenta-se bem preservado, com coloração característica verde (Figura 32-B); rutilo (Figura 32- C); turmalina (Figura 32- D).

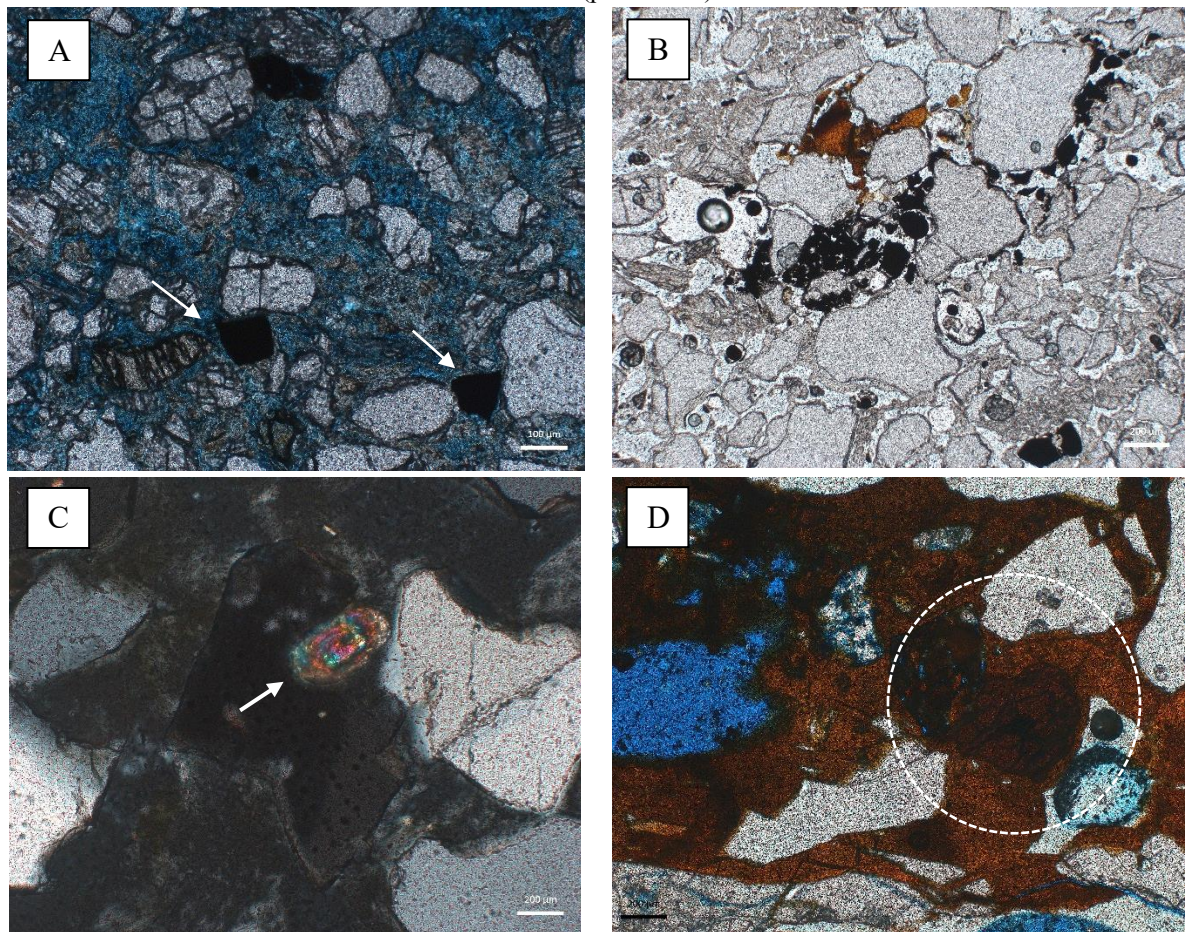
Figura 32 – (A) Augita arredondada (seta branca); (B) Anfibólio (seta branca); (C) Rutilo (seta branca); (D)Turmalina (seta branca);





Minerais opacos também são encontrados nos arenitos da Bacia de São Paulo com um percentual médio de 2,6% para as duas unidades analisadas. Os mais frequentes são os rutilos que ocorrem em forma prismática, isolados (Figura 33-C); hematita e pirita, que ocorrem em grãos isolados (Figura 33-A) ou em massa (Figura 33-B); gohetita (Figura 33-D).

Figura 33 – Minerais opacos: (A) Pirita em grão isolado; (B) Hematita em massa; (C) Zircão (seta branca) (D) Goethita (pontilhado)

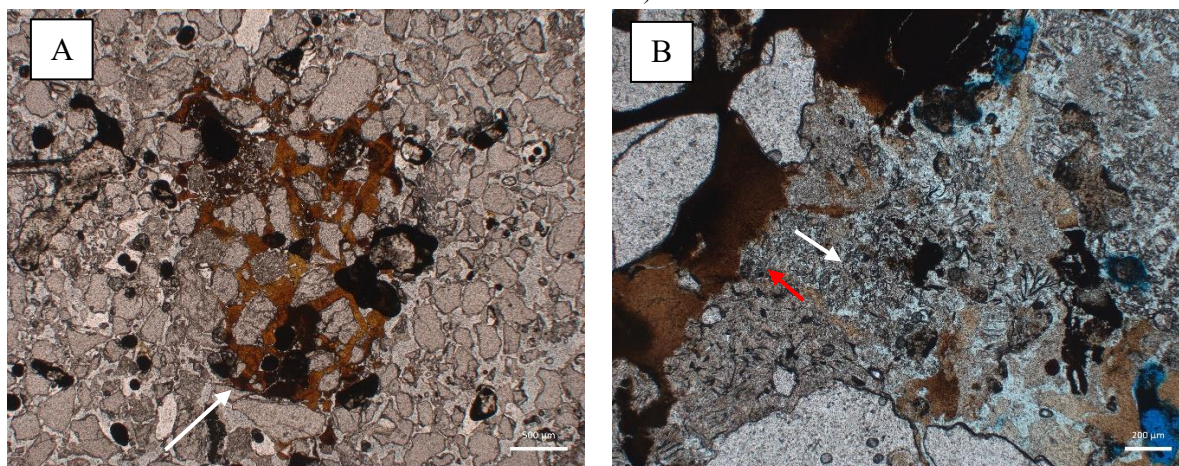


4.1.2.6 Argilominerais

A matriz é caracterizada por um material detrítico que, segundo McBride (1985), é constituído por grãos menores de 0,03 mm, depositados simultaneamente com a areia e cascalho. Esta pode ter origem diagenética, por meio de processos de fluidização, bioturbação, compactação, infiltração mecânica (De Ros e Cesero, 1986), caracterizando argilominerais infiltrados e pseudomatriz.

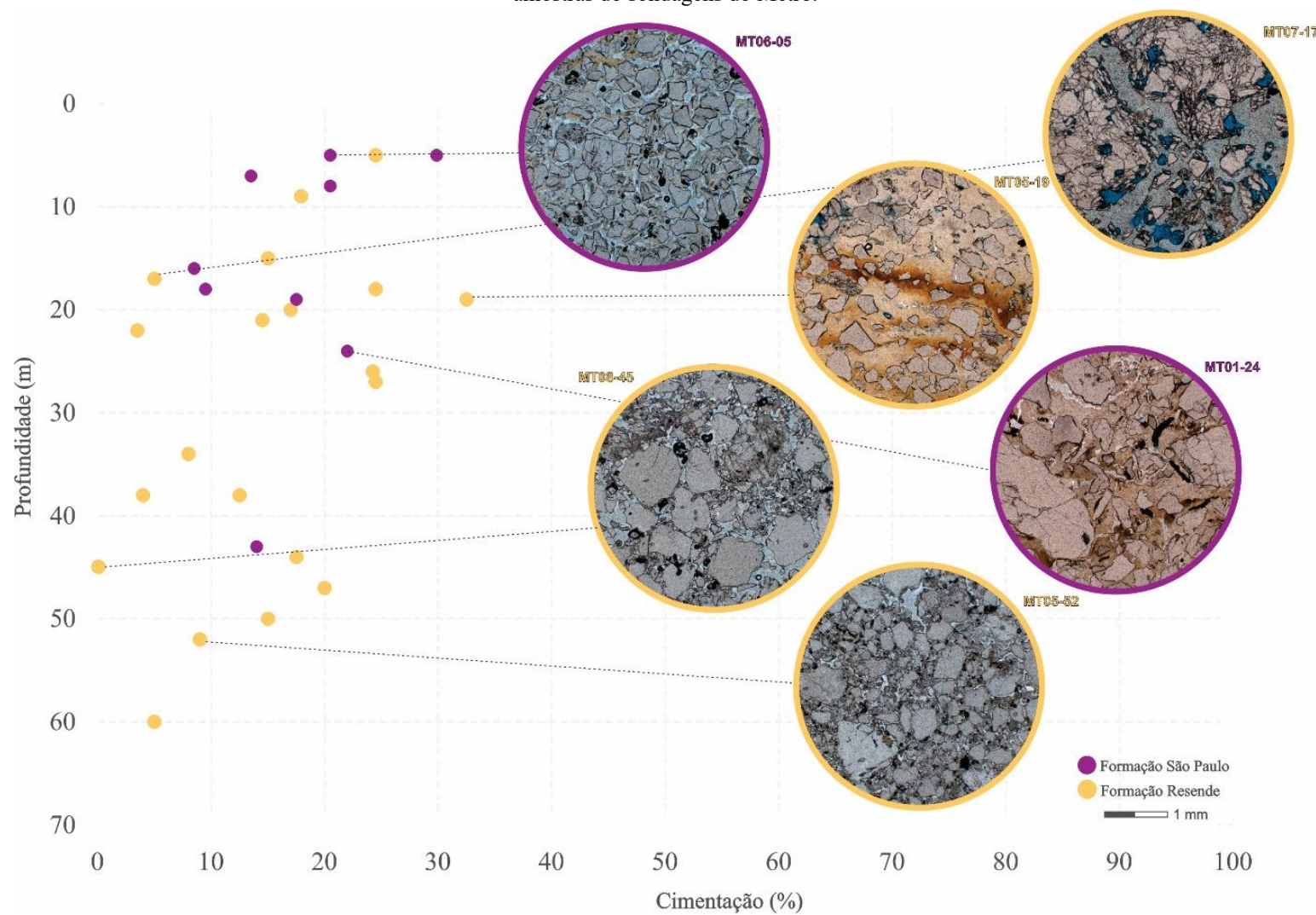
Nas amostras analisadas, o cimento ocorre de duas diferentes formas, sendo a primeira, e mais abundante, por argilominerais, essencialmente caulinitas e secundariamente esmectitas. Constitui em média 11,3% das amostras da Formação São Paulo e 9% das amostras da Formação Resende. Com igual importância ocorre o cimento de ferro, com média de 12,4% na Formação São Paulo e 7,5% na Formação Resende (Figura 34 -A). A ocorrência deste tipo de cimento é de difícil separação, uma vez que ocorre associado à matriz argilosa em diferentes proporções, como no exemplo apresentado na figura 34-B, em que há porções com maior concentração de ferro, com argilominerais e óxido de ferro ou apenas com caulinitas. O cimento de ferro por vezes aparece bandado.

Figura 34 –(A) Cimentação de ferro(seta branca); (B) Matriz caulinitica (seta branca) e cimentação de ferro (seta vermelha)



No gráfico abaixo (Figura 35 e anexo 5) é possível observar que a quantidade de cimento (argiloso e argilo-ferruginoso), apesar de variar, diminui com a profundidade nas amostras do Metrô, nas duas unidades litoestratigráficas estudadas.

Figura 35 - Gráfico cimentação *versus* profundidade com fotomicrografias de microscopia óptica evidenciando a diminuição da cimentação conforme a profundidade, em amostras do sondagens do Metrô.

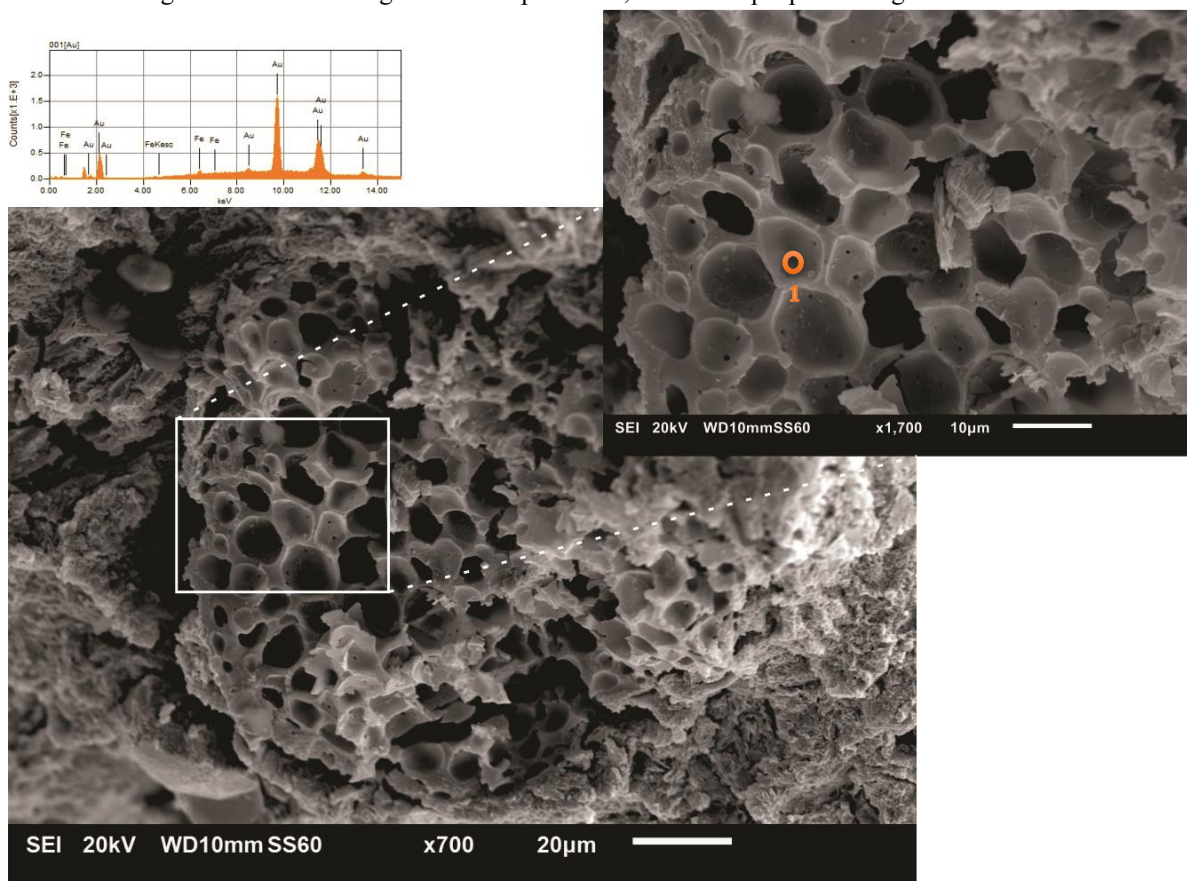


Fonte: Elaborado pela Autora

4.1.2.7 Fragmentos Orgânicos

Fragmentos de madeira foram identificados nas amostras da Extração de Areia de Itaquareia, como pode ser observado na figura 36, em uma amostra de arenito da Formação São Paulo (fácies 3Ar₁). O fragmento mostrado na figura ocupa espaço dentro de um poro intergranular e possui características morfológicas consistentes para a identificação da madeira. A análise de EDS não produziu picos importantes, exceto de ouro do revestimento metálico utilizado na preparação da amostra.

Figura 36 – Fotomicrografia obtida por MEV, com destaque para o fragmento de madeira



4.1.2.8 Porosidade

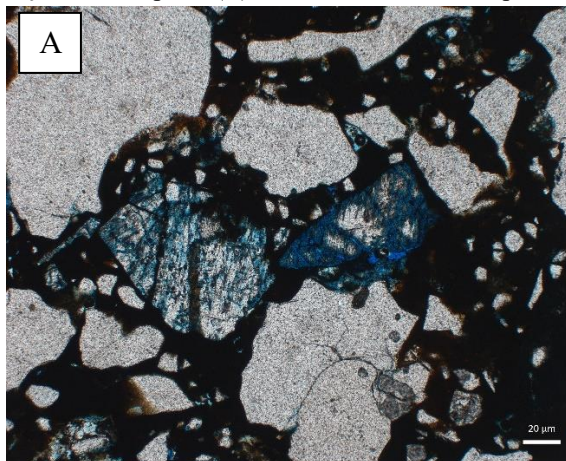
A porosidade do arcabouço dos arenitos é muito variável, sendo que para a Formação Resende a porosidade máxima encontrada é de 32,5%, e mínima é de 8%, com média de 18,7%; para a Formação São Paulo a porosidade máxima é de 25,5% e a mínima de 14%, com média de 21,6%. Nota-se que há uma tendência de diminuição da porosidade com a profundidade,

fator que pode refletir a ação diagenética da compactação e precipitação secundária de minerais (Figura 39 Anexo 6). As porosidades observadas podem ter influência de deformação pelo tipo de recuperação das amostras (SPT); apesar disso, as porcentagens encontradas são representativas do arcabouço. Outro fator a ser considerado para a análise em profundidade é a distância entre as amostragens que, apesar de existente, são passíveis de correlação.

Observa-se que as amostras das Extrações de Areia possuem uma maior porosidade, principalmente intergranular, atributo que reflete a ação da exposição das rochas à ação de percolação de águas superficiais e intempéricas, características não visualizadas nas amostras de testemunhos do Metrô, que são amostradas em profundidade.

Na maioria dos arenitos, a porosidade encontrada é intergranular, de origem primária, ou de origem secundária, devido à expansão e contração da epimatriz argilosa (Figura 37-A), ou móldica, com dissolução total de grãos (Figura 37-B e 38). A porosidade ocorre em média de 20,2% para a Formação São Paulo, e de 17,7% para a Formação Resende. Outro tipo de porosidade secundária é a formada por dissolução parcial de grãos, que caracteriza uma porosidade do tipo intragranular (Figura 37-C, D). Essa ocorre em média de 1,4% para a Formação São Paulo e de 1,3% para a Formação Resende.

Figura 37 – (A) Porosidade secundária intergranular de dissolução de feldspatos; (B) Porosidade secundária intergranular de dissolução de feldspato; (C) Porosidade secundária por dissolução de feldspatos.



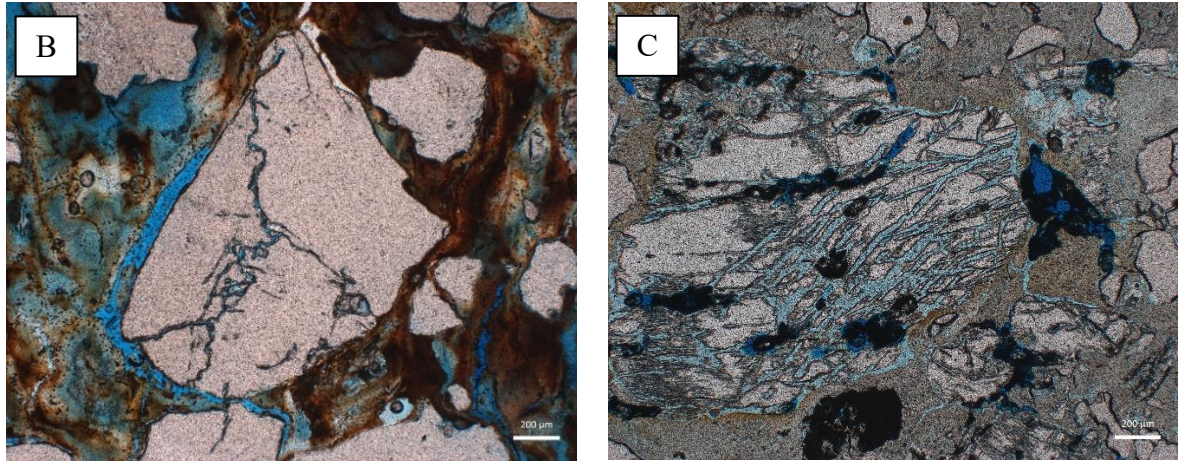


Figura 38 –Fotomicrografias obtidas por MEV, mostrando porosidade móldica.

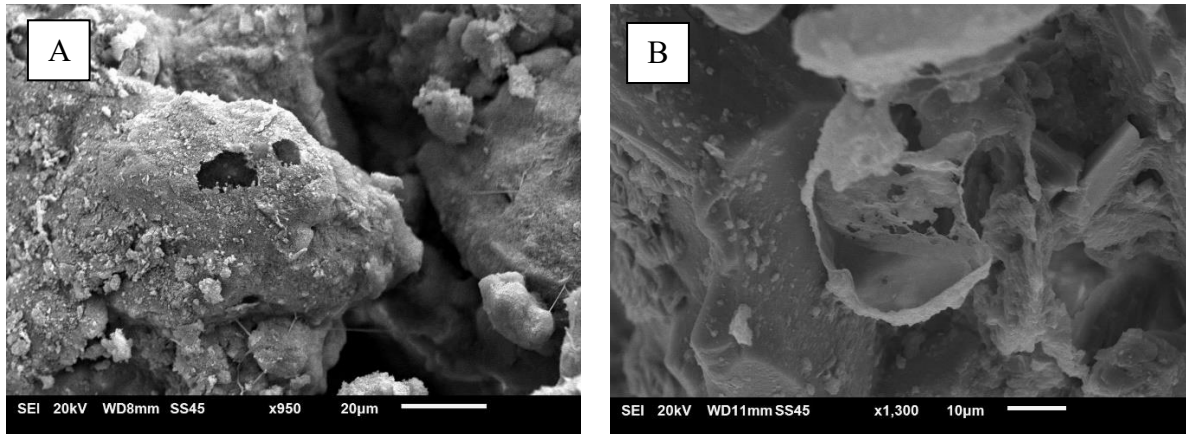
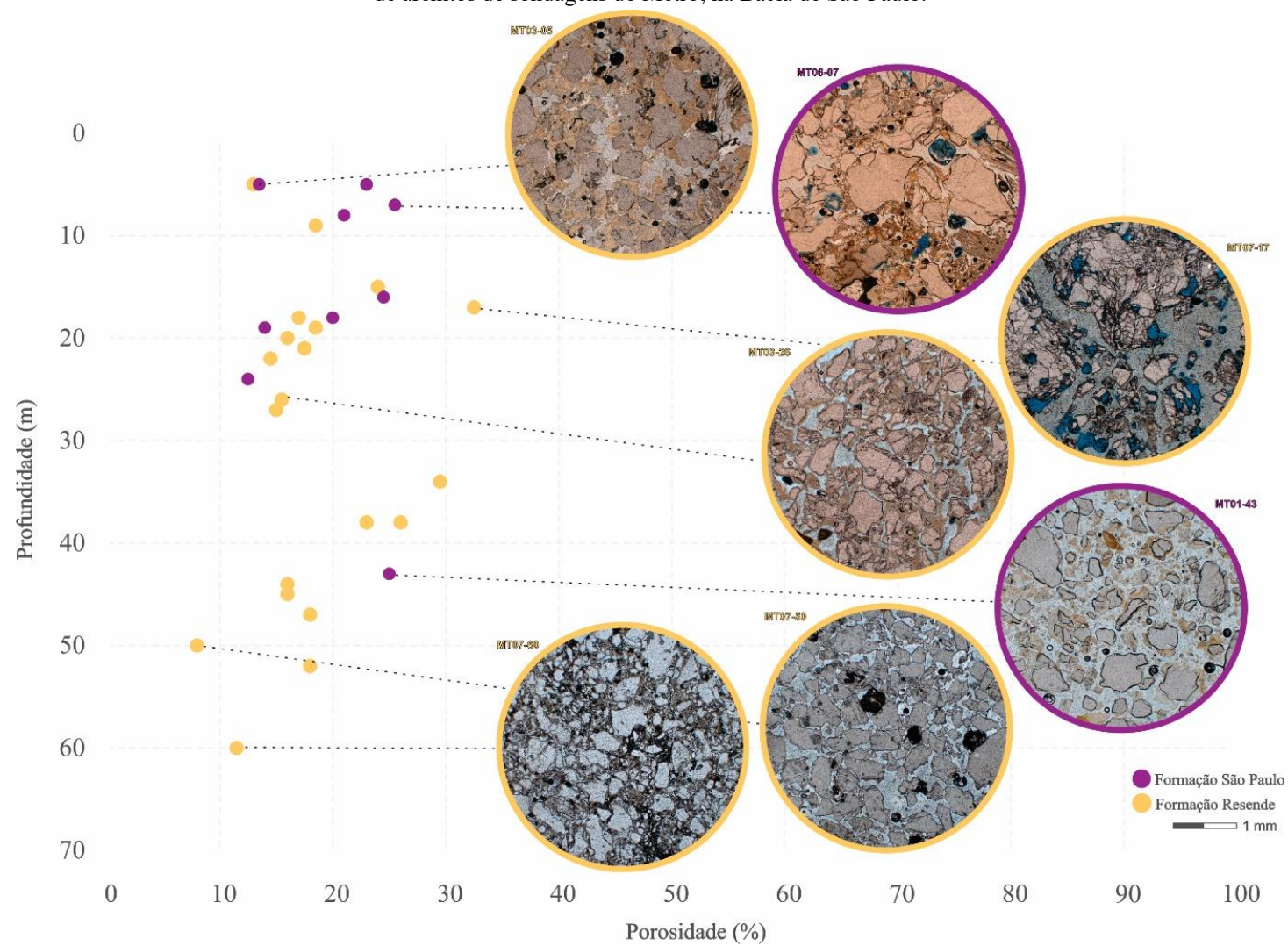


Figura 39- Gráfico porosidade *versus* profundidade com fotomicrografias de microscopia óptica, evidenciando a diminuição da porosidade com a profundidade em amostras de arenitos de sondagens do Metrô, na Bacia de São Paulo.



Fonte: Elaborado pela Autora

4.2 Análise Diagenética

A história diagenética do Paleógeno da Bacia de São Paulo pode ser caracterizada em diferentes fases, com base nos diferentes processos diagenéticos atuantes em estágios diagenéticos distintos, conforme definidos por Choquette e Pray, (1970): eodiagênese, mesodiagênese e telodidagenese. As fases são influenciadas por condições do ambiente deposicional, pelo soterramento efetivo e favorecidas pelo regime hidrogeológico.

De maneira geral, os arenitos estudados, provenientes das formações São Paulo e Resende da Bacia de São Paulo, foram afetados por 13 processos diagenéticos distintos. Dadas as particularidades composicionais intrínsecas à cada fácies das unidades estudadas, alguns processos apresentam intensidades diferentes. Os principais processos e produtos diagenéticos encontrados neste estudo foram: (1) Infiltração de argilas; (2) Compactação mecânica; (3) Dissolução de aluminossilicatos; (4) Dissolução de fragmentos líticos; (5) Porosidade secundária; (6) Precipitação de óxido-hidróxido de ferro; (7) Precipitação de óxido de manganês; (8) Crescimento secundário de quartzo; (9) Precipitação de feldspato; (10) Precipitação de óxido de titânio; (11) Precipitação de sulfato; (12) Precipitação de gibbsita; (13) Argilas autigênicas.

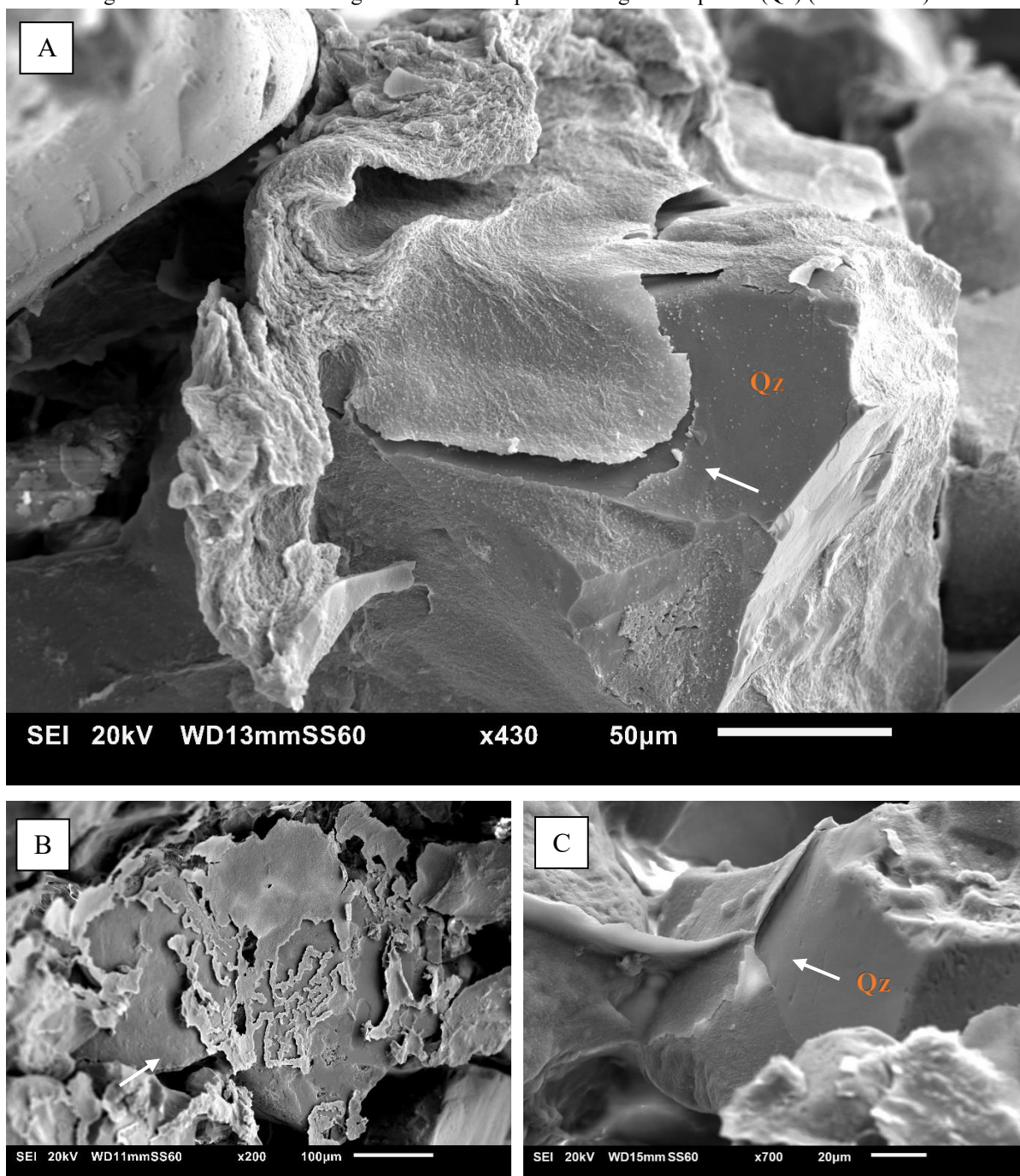
4.2.1 Infiltração de Argilas

O processo de infiltração mecânica de argilas consiste na entrada de sedimentos finos em espaços intergranulares por infiltração de água episódica (Walker; Waugh e Grone, 1978). Para que ocorra esse processo é necessário um ambiente com alta disponibilidade de partículas finas e um regime de fluxo de fluido que favoreça variações de nível de água e baixo retrabalhamento de sedimento. Crone (1976) caracterizou este processo em sistemas aluviais com alta energia, sob clima seco, em níveis freáticos profundos. Esse processo pode ocorrer segundo Walker, Waugh e Grone (1978) por rebaixamento do nível freático e concentração na zona vadosa, concentração no nível freático e concentrações sobre barreiras impermeáveis.

Com base em estudos anteriores de Crone (1976), Kessler (1978), De Ros (1985), Walker; Waugh e Grone (1978), as argilas mecanicamente infiltradas podem ser preservadas sob a forma de cristais ou meniscos orientados perpendicularmente à superfície dos grãos, fábricas geopedais, agregados frouxos e caoticamente acumulados, cutículas (*coatings*)

envolvendo os grãos (lamelas orientadas tangencialmente à superfície), além de agregados compactos que ocupam totalmente os poros por espessamento de cutículas (Figura 40- A, B, C).

Figura 40 – (A) Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a presença de cutícula de argila (seta branca) envolvendo grão de quartzo (Qz); (B) Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a presença de cutícula de argilominerais envolvendo grão; (C) Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a presença de lamelas de argilominerais orientadas tangencialmente à superfície do grão de quartzo(Qz) (seta branca).



Segundo Goenopawiro (1997), a concentração de argilas pode inibir a evolução diagenética de reservatórios. A presença de argilas envolvendo os grãos pode isolá-los das reações com os fluidos intersticiais, diminuindo a permeabilidade e, conseqüentemente, a taxa de vazão de fluidos e a capacidade de transporte de substâncias dissolvidas. Além disso, a infiltração de argila pode ter um impacto significativo na porosidade e permeabilidade dos arenitos, impactando a produtividade de um aquífero.

Os arenitos estudados apresentam evidências de infiltração mecânica de argila em todos os níveis, porém em maior frequência em menores profundidades; ocorrem principalmente como cutículas anisotrópicas, orientadas tangencialmente à superfície de grãos de quartzo e feldspato, podendo ocorrer também em minerais acessórios do arcabouço, sendo elas contínuas ou descontínuas.

Observa-se a presença de cutículas argilo-ferruginosas, de coloração alaranjada, envolvendo grãos nos arenitos da Formação São Paulo, característica esta comum em arenitos com empacotamento frouxo e ocorrência próxima à superfície. Também podem ser observadas cutículas mais espessas, com coloração avermelhada, indicando a presença de óxido-hidróxido de ferro, característico de condições oxidantes de deposição.

As análises qualitativas das argilas por EDS revelaram a presença de Al, Si, Fe, Ca e K, em interestratificados de clorita/esmectita na composição dos *coatings* de argila.

4.2.2 Compactação

A compactação dos sedimentos ocorre em duas fases sequenciais: mecânica e química. Os processos mecânicos podem ser identificados em quatro parâmetros definidos por Goenopawiro (1997) e Jonas e McBride (1977), como anteriormente mencionado.

Nas rochas analisadas, a compactação mecânica é bem representada pelo rearranjo textural de grãos rígidos e dúcteis, evidenciado pela deformação de muscovitas que ocorre predominantemente entre grãos de quartzo. As muscovitas se comportam de três maneiras distintas: atingindo seu ponto máximo de elasticidade e fraturando (Figura 41- A, B), apresentando terminações em leque (Figura 41- C, D), ou alterando-se para argilominerais. Outra evidência da compactação mecânica é a presença de litoclastos esmagados, que por vezes podem gerar pseudo-matriz (Figura 42).

As evidências compactacionais mecânicas apresentadas podem ter influência de deformações pelo tipo de recuperação das amostras (SPT); apesar disso, a observações diagenéticas compactacionais não são inviabilizadas.

Figura 41 – (A) Muscovita mecanicamente fraturada e deformada entre grãos de quartzo (nicois descruzados); (B) Muscovita mecanicamente fraturada e deformada entre grãos de quartzo (nicois cruzados); (C) Muscovita com terminação em leque (circulo branco;); (D) Fotomicrografia obtida por MEV de muscovita com terminação em leque

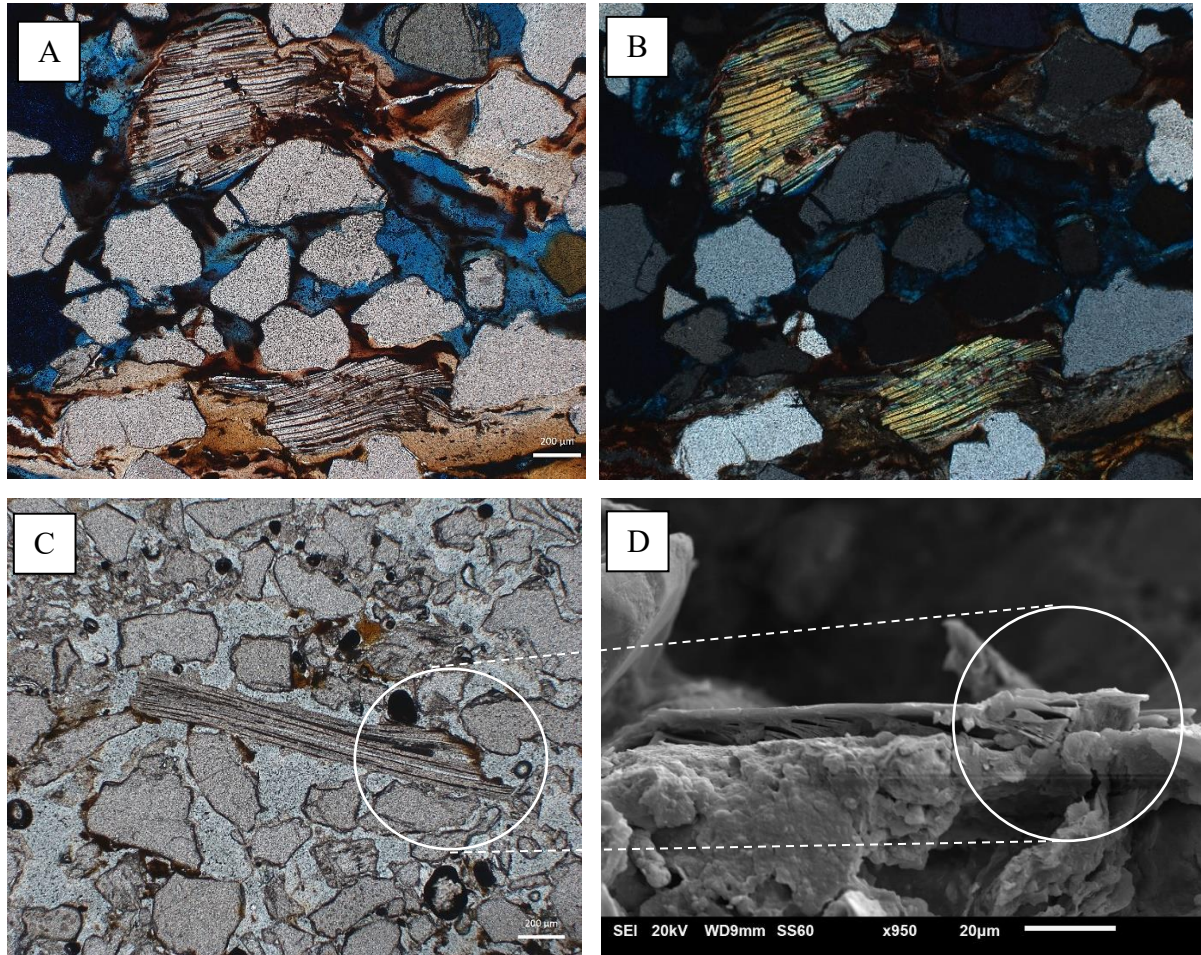
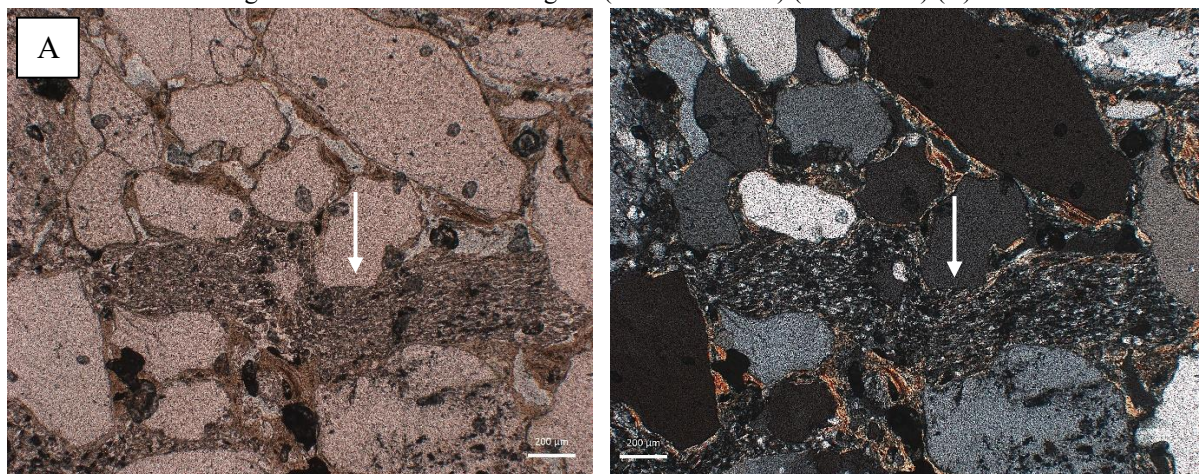
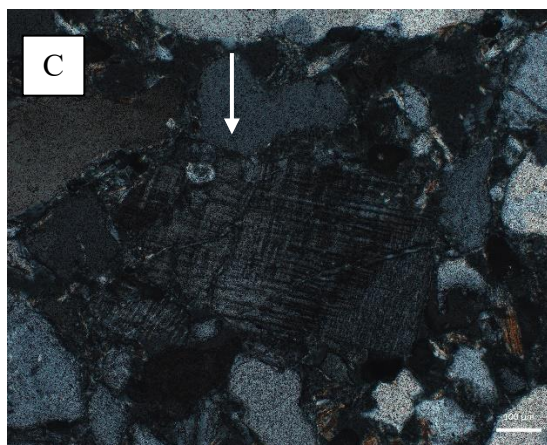


Figura 42 – (A) Litoclasto argiloso mecanicamente esmagado (nicois descruzados) (seta branca); (B) Litoclasto argiloso mecanicamente esmagado (nicois cruzados) (seta branca) (C)





O empacotamento é frouxo em 65% dos arenitos analisados, moderado em 20% e compacto em 15%, progredindo com a profundidade. A predominância do empacotamento frouxo evidência que os sedimentos não foram significativamente afetados pela compactação mecânica. Nas rochas situadas em maior profundidade, observa-se um soterramento com maior pressão de sobrecarga; no entanto, a bacia em geral permeia o campo brando da compactação, uma vez que não atinge grande profundidade.

A compactação química, por sua vez, não é evidente na maioria dos arenitos estudados, uma vez que os grãos apresentam contato predominantemente flutuante e pontual, não ocorrendo contatos interpenetrativos suturados, de forma que a compactação química não constitui um processo de relevância na história diagenética da bacia.

No entanto, amostras mais profundas (47 m a 60 m) da Formação Resende apresentam contatos retos, evidenciando a atuação da sobrecarga em profundidade. Fatores como a presença de argila infiltrada e sobrecrecimentos de quartzo e feldspatos podem conferir resistência à rocha, influenciando na intensidade da atuação da compactação química. As argilas que envelopam os grãos ou preenchem os espaços intersticiais impedem o contato grão a grão, dificultando a dissolução por pressão, característica da compactação química.

4.2.3 Dissolução e Geração de Porosidade Secundária

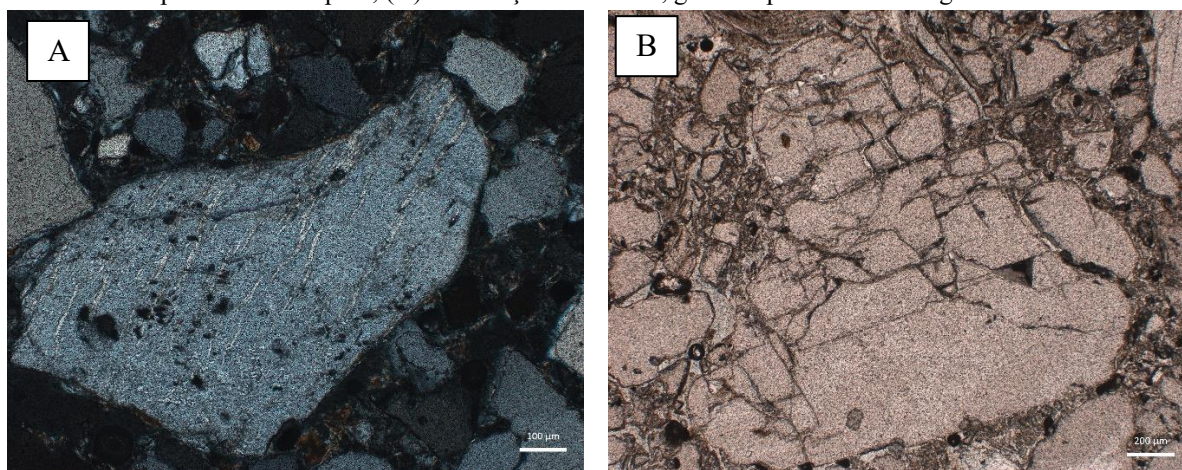
O processo químico de dissolução mineral acontece devido à instabilidade dos minerais detríticos em condições diagenéticas, que são diferentes das condições físico-químicas de sua formação. Essas condições novas condições de temperatura e pressão promovem a dissolução,

substituição e precipitação de minerais mais estáveis. Esse processo tem origem na infiltração de água meteórica (água de circulação atmosférica) nas porções superficiais e intermediárias de uma bacia, e por água conata (água de poro retida durante a deposição do sedimento) nas partes profundas (McBride, 1989b), ocorrendo já nos primeiros estágios da diagênese. Segundo Morad (1991), a caracterização deste processo é de grande importância para a avaliação da porosidade secundária e da evolução diagenética de arenitos, uma vez que essa porosidade pode ser preservada mesmo sob condições de soterramento.

O principal tipo de dissolução observada nas amostras estudadas é a dissolução de grãos de feldspatos ao longo dos planos de clivagem, maclas, pertitas ou inclusões (Figura 43), gerando porosidade intergranular, quando não móldica, sendo uma porção substancial da porosidade total das unidades estratigráficas estudadas. A dissolução ocorre em todo o grupo dos feldspatos, contemplando os feldspatos potássicos (microclínio e sanidina) (Figura 44) e plagioclásios (Figura 45).

Nas amostras analisadas, a corrosão da superfície dos feldspatos resulta desde cavidades lineares de corrosão, paralelas umas às outras, até a formação de bastonetes finos, com terminações espinhosas, dispostas em planos paralelos. Essas texturas podem ser relacionadas com o hábito e as geminações características destes minerais (Morad, 1991).

Figura 43 – (A) Dissolução inicial em pertitas; (B) Dissolução ao longo de planos de clivagem; (C) Dissolução parcial do feldspato; (D) Dissolução acentuada, gerando porosidade intergranular.



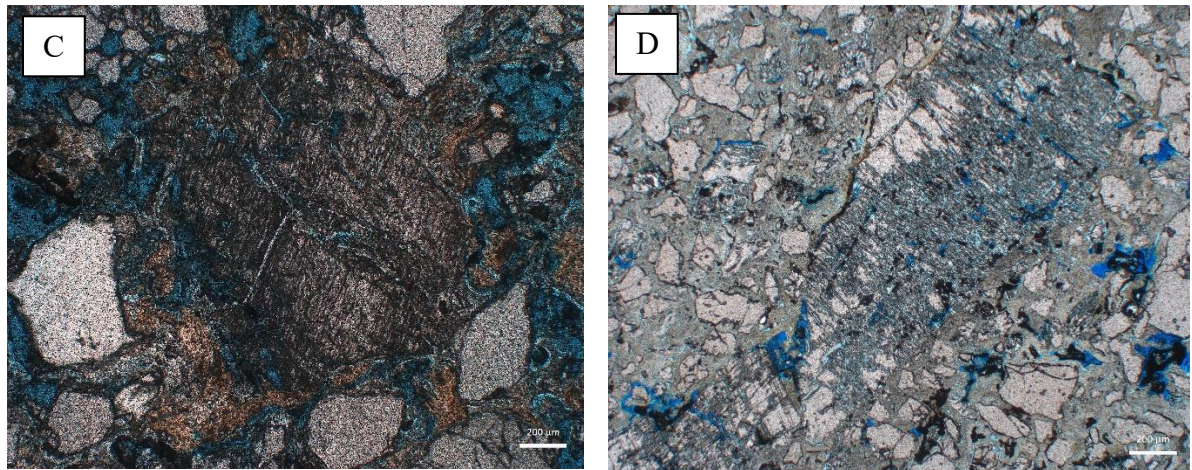


Figura 44 – Fotomicrografia obtida por MEV de feldspato potássico (K- Felds) parcialmente dissolvido, gerando porosidade secundária

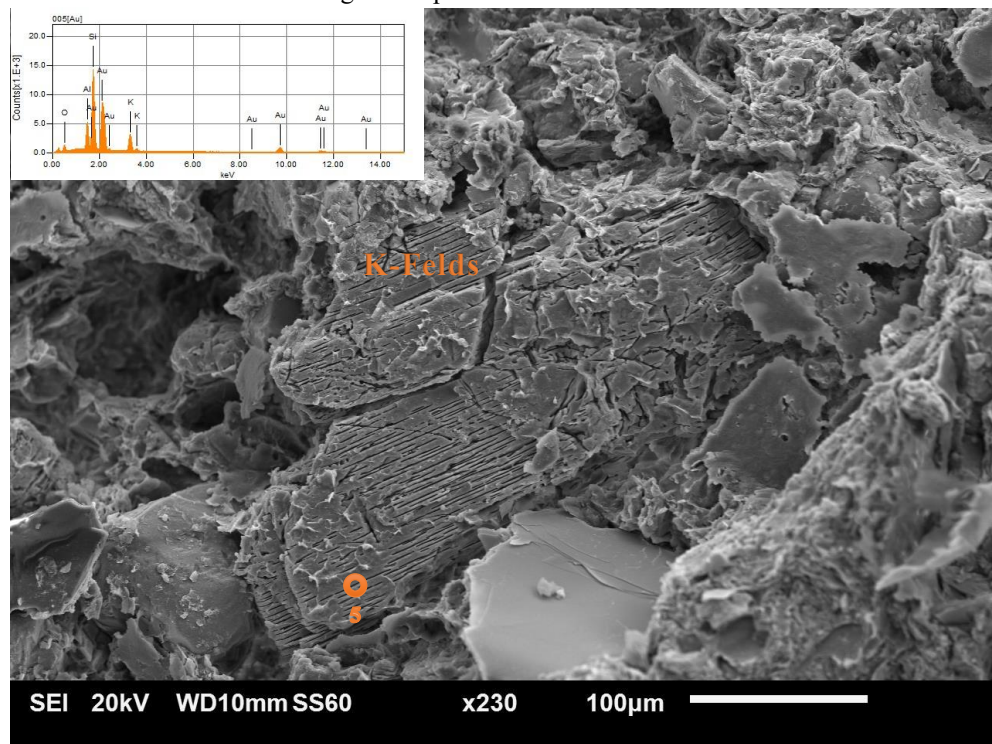
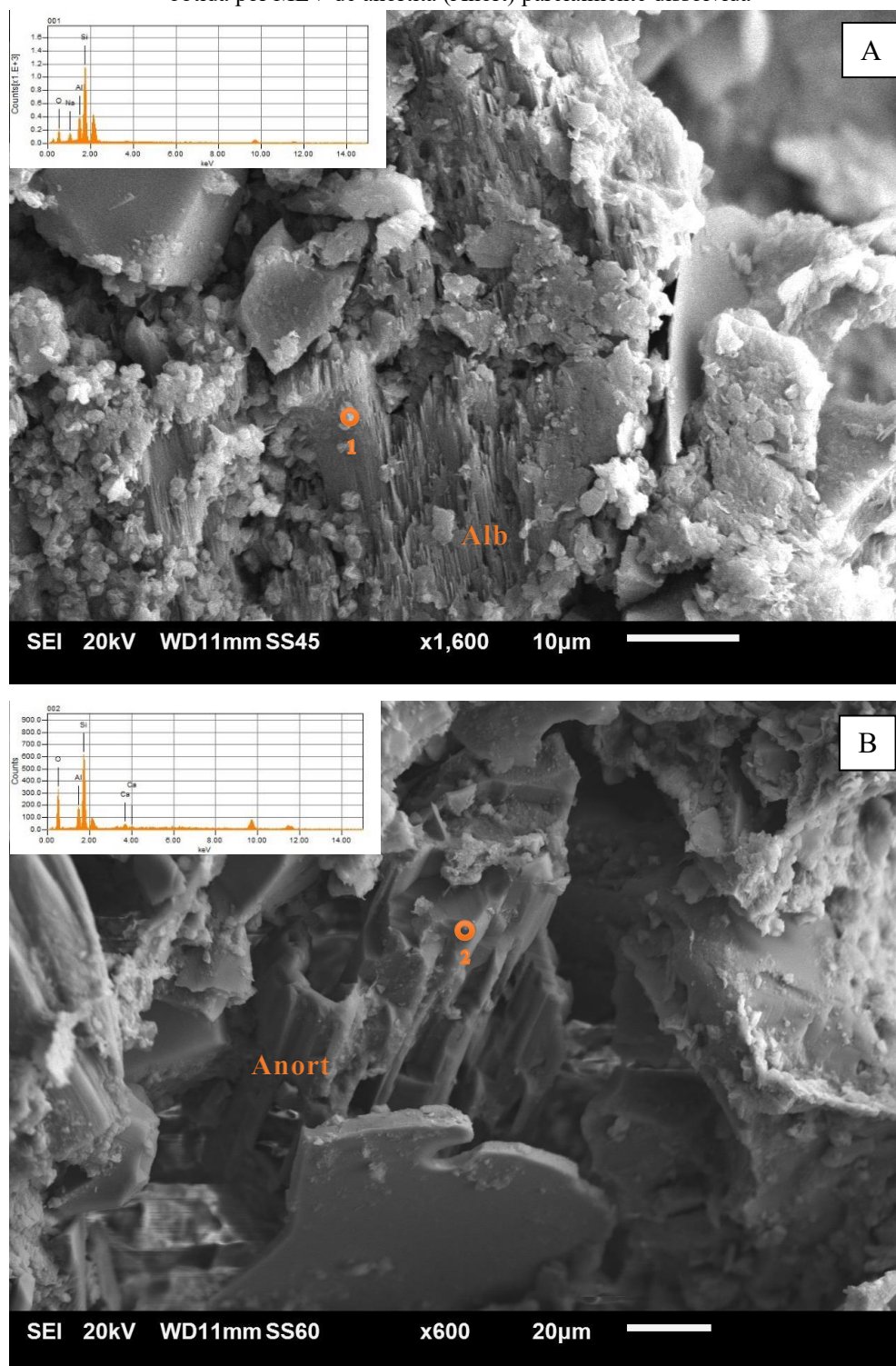


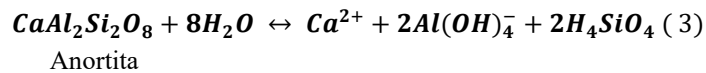
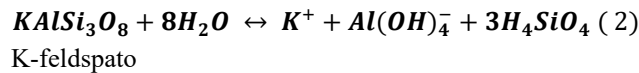
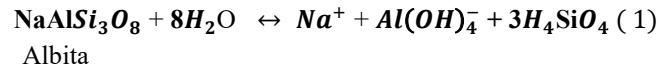
Figura 45 – (A) Fotomicrografia obtida por MEV de albita (Alb) parcialmente dissolvida; (B) Fotomicrografia obtida por MEV de anortita (Anort) parcialmente dissolvida



Nos arenitos das Extrações de Areia Taboão e Itaquareia, a dissolução é mais efetiva que nas amostras do Metrô, com poros intergranulares maiores e de maior ocorrência. Nas

análises conjuntas de MEV e EDS foi possível notar que a dissolução ocorre em maior proporção nos feldspatos potássicos.

O processo de dissolução de feldspatos pode levar à liberação de quantidades significativas dos íons Si^{4+} , Al^{3+} , K^+ , Na^+ e Ca^{2+} nos fluidos dos poros, conforme as equações (1), (2) e (3), permitindo sua migração.



A liberação de íons em solução possibilita a precipitação de minerais autigênicos nos arenitos. Um exemplo clássico mencionado na literatura por Bjorlykke e Egeberg (1993) e Morad e Aldahan (1987) é a dissolução de feldspato potássico detrítico e subsequente precipitação de caulinita autigênica. A formação desse argilomineral autigênico será mais bem abordado no item 5.4.8 (Argilas Autigênicas).

Outro tipo de dissolução que ocorre de forma significativa nos arenitos estudados afeta os minerais acessórios pesados, como a augita (Figura 46). O processo de dissolução deste mineral ocorre de forma precoce no sedimento. A dissolução da augita pode proporcionar a liberação dos íons Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ti^{2+} , Al^{3+} e Si^{4+} . Um exemplo de equação de dissolução deste mineral é sintetizado na equação (4):

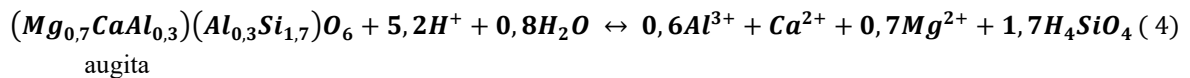
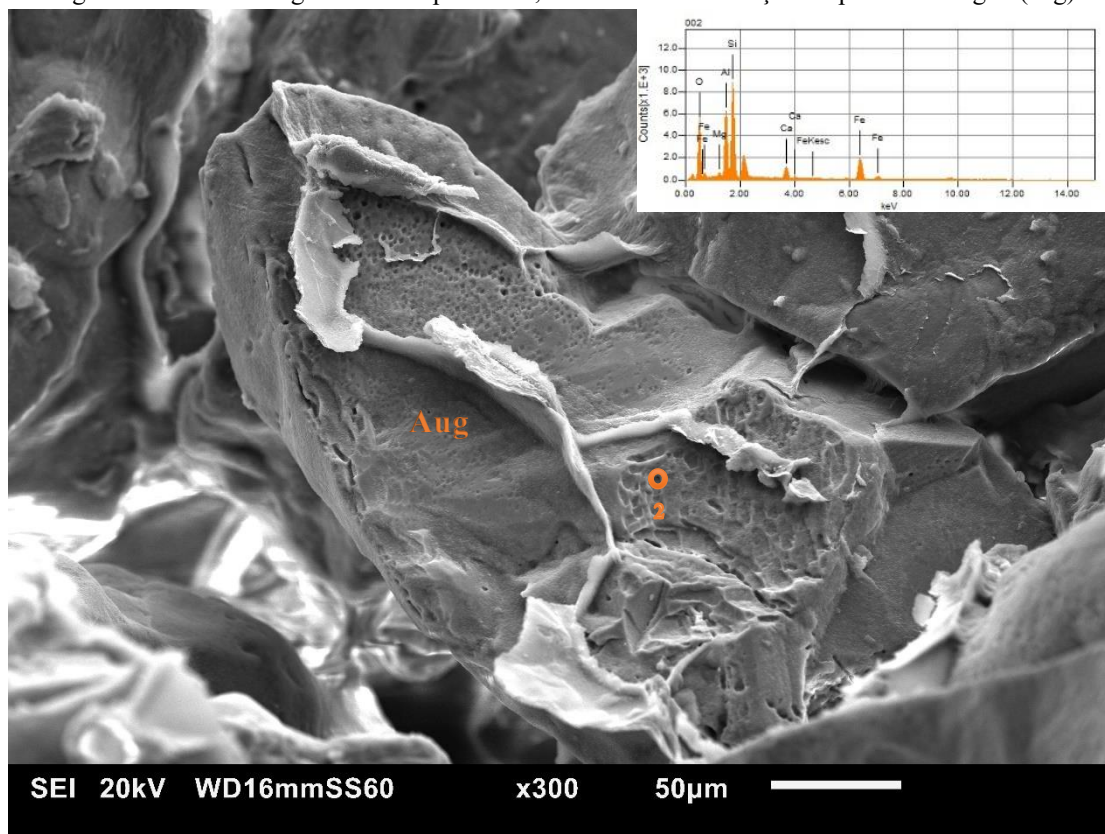


Figura 46 – Fotomicrografia obtida por MEV, mostrando a dissolução do piroxênio augita (aug)



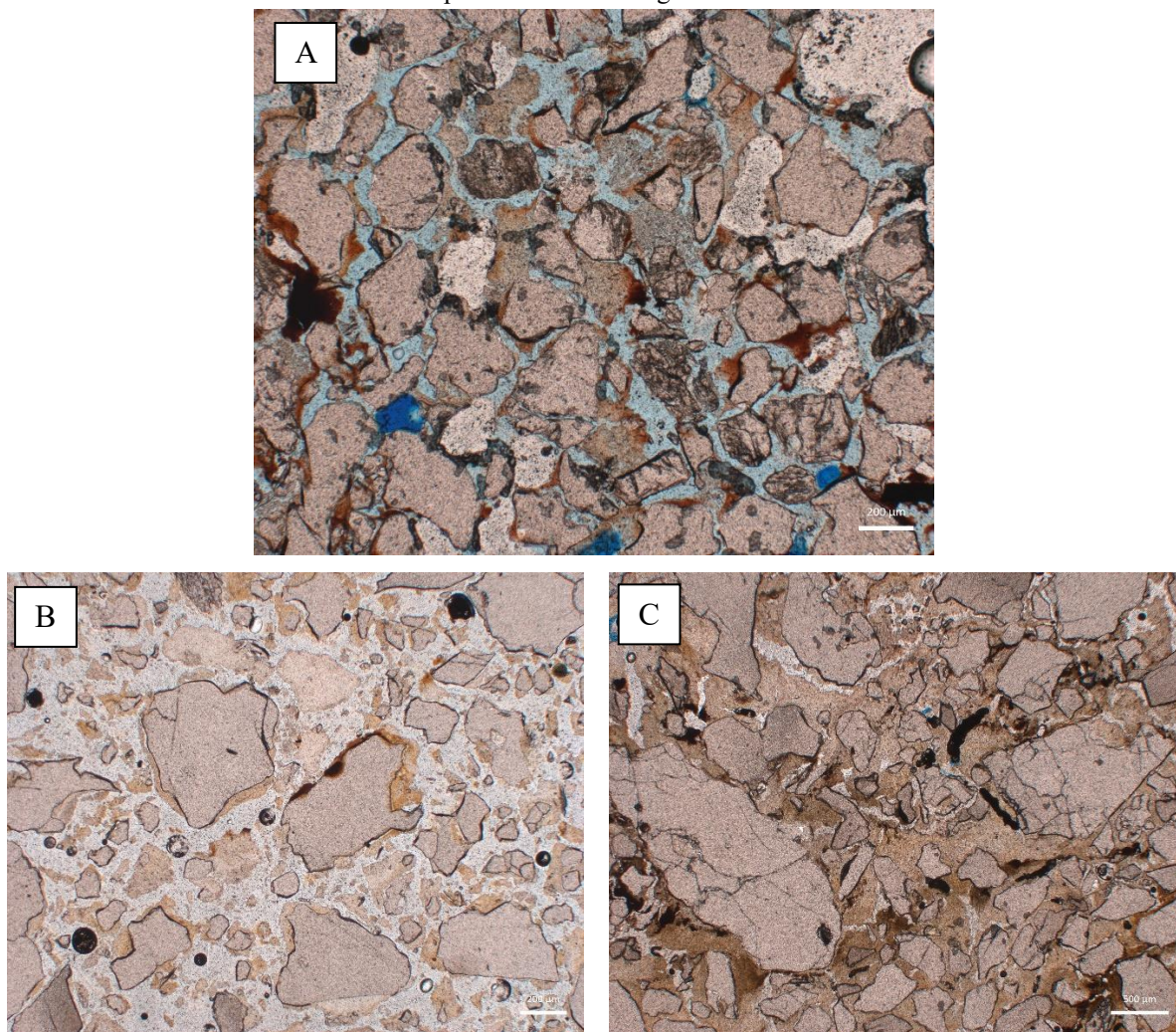
A dissolução também afeta os fragmentos líticos nos arenitos estudados. Embora a ocorrência não seja significativa, a dissolução dos líticos proporciona a liberação de íons em solução, principalmente dos fragmentos de origem vulcânica que disponibilizam íons de ferro, magnésio, sódio e cálcio.

4.2.4 Cimentação

4.2.4.1 Precipitação de Óxido/Hidróxidos de Ferro

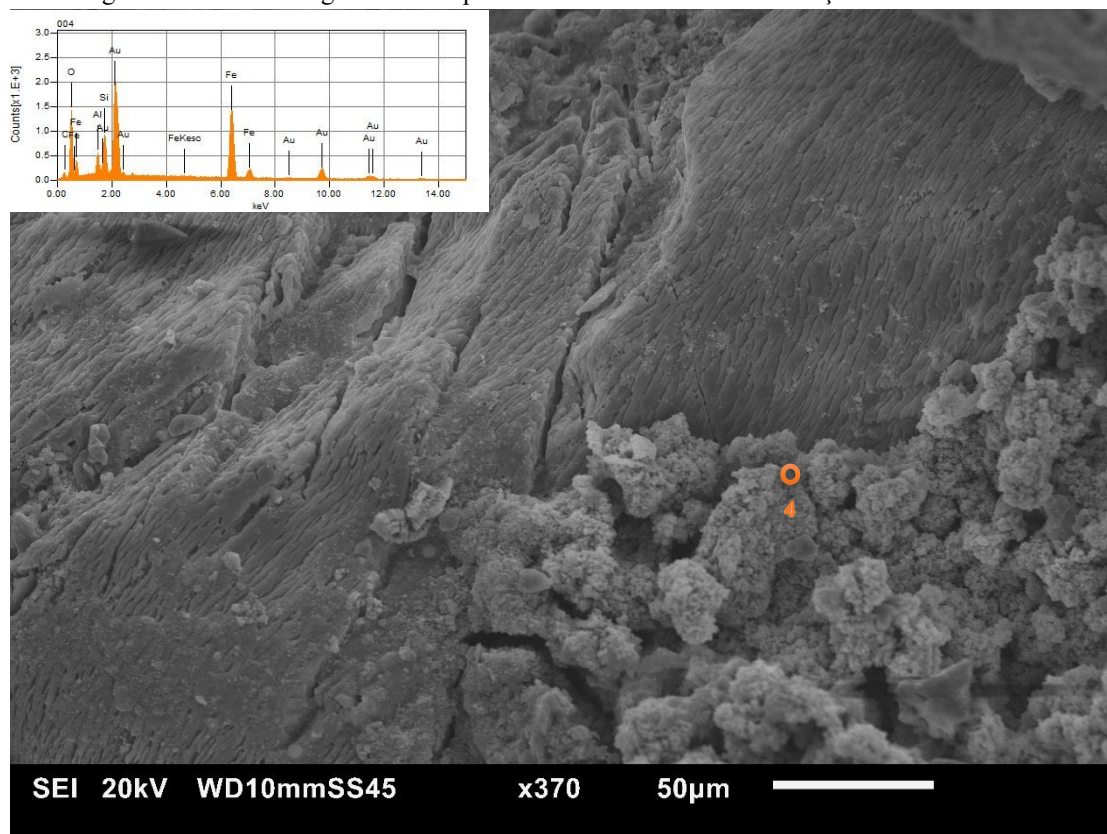
A cimentação por óxidos/hidróxidos de ferro, segundo Walker (1976), resulta da alteração diagenética de minerais detríticos ferromagnesianos como biotita, piroxênio, anfibólios, magnetita e óxido de ferro-titânio. Tucker (1991) sugere a participação de outros minerais, como hornblenda, augita e olivina. Segundo Morad (1991), a dissolução desses minerais pode proporcionar a cimentação por goethita, limonita, lepidocrocita e hematita, ocorrendo como finas películas precipitadas sobre a superfície dos grãos detríticos ou como preenchimento maciço de poros intergranulares (Figura 47).

Figura 47 – (A) Cimentação por óxido de ferro como película na superfície dos grãos e preenchendo poros; (B) Cimentação de óxido de ferro como película na superfície dos grãos; (C) Cimentação de óxido de ferro como preenchimento intergranular



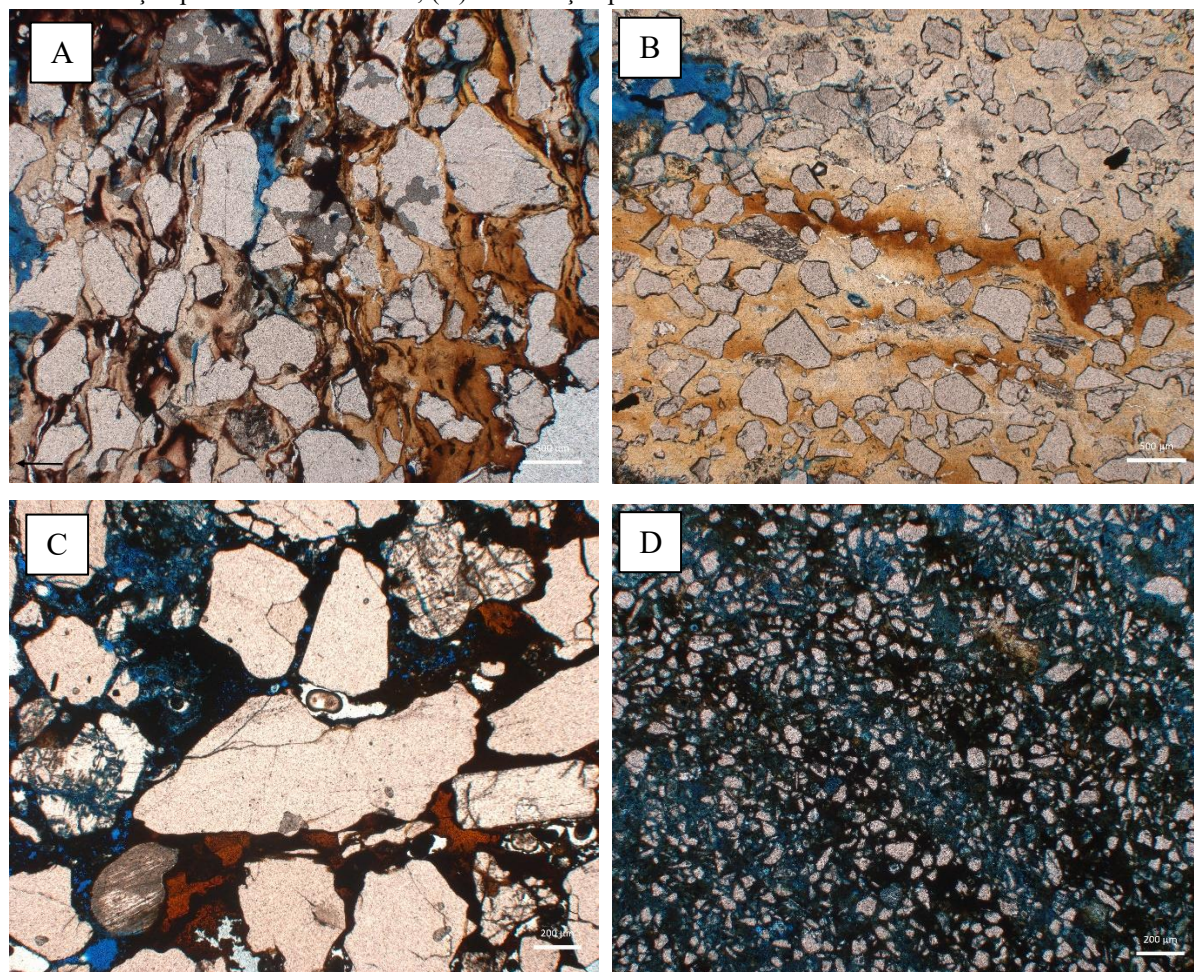
A cimentação ferruginosa foi encontrada em 69,5% dos arenitos estudados, observadas como finas películas de óxido-hidróxidos de ferro (Figura 48), de coloração alaranjada a avermelhada, que envolvem os grãos, ou associada à matriz argilosa, como descrito no item 5.1. Esse tipo de cimento pode se formar sob condições oxidantes, no estágio inicial da eodiagênese, ou quando o material é reexposto à superfície. Esta situação é evidenciada pela presença de maiores concentrações de ferro nas amostras das Extrações de Areia, em comparação com as do Metrô.

Figura 48 – Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a cimentação de óxido de ferro



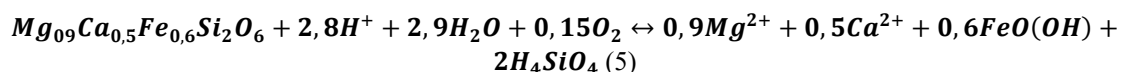
A cimentação por óxidos-hidróxidos de ferro também ocorre sustentando o empacotamento dos grãos e, por vezes, assinalada pela percolação, que gera aparente bandamento na rocha (Figura 49).

Figura 49 – (A) Cimentação por hidróxido de ferro preenchendo espaços intergranulares; (B e C) Bandamento de cimentação por hidróxido de ferro; (D) Cimentação por hidróxido de ferro com diferentes intensidades



A cimentação ferruginosa ocorre nas duas formações estudadas: em mais de 50% das amostras de arenitos do Metrô e em uma porcentagem ainda maior nas amostras obtidas das Extrações de Areia. Como cimento dominante, apresenta um valor médio de 12,4% na Formação São Paulo e 7,5% na Formação Resende. As análises de DRX disponibilizadas pelo Metrô revelaram a presença em índices semiquantitativos de 1% a 4% de precipitações de hematita e goethita em ambas as formações.

A dissolução de minerais pesados, verificada nas amostras analisadas, pode desempenhar um papel importante na precipitação de óxidos e hidróxidos de ferro, uma vez que aumenta a concentração de íons de ferro e magnésio em solução. A augita, identificada como um dos principais acessórios das amostras estudadas, encontra-se tanto em sua forma estável como dissolvida. A dissolução da augita pode ser a principal fonte de ferro na solução, conforme a equação (5):



Augita

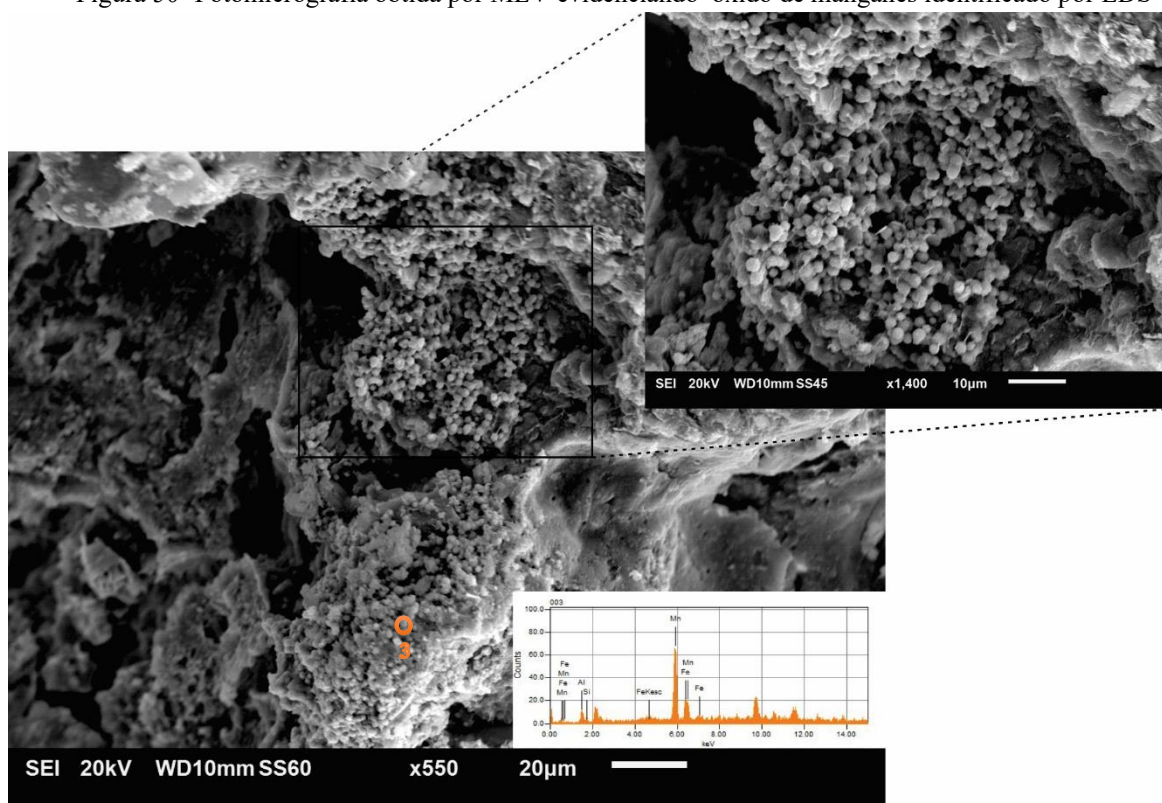
Goethita

4.2.4.2 Precipitação de Óxido de Manganês

Embora rara, foi observada precipitação de óxido de manganês preenchendo poros de amostras do poço MT07 do Metrô, a uma profundidade de aproximadamente 38 m, em arenitos da Formação Resende (Figura 50). O óxido ocorre como agregado de hábito granular; a análise de EDS acusa também a presença de ferro e alumínio na composição, o que pode indicar a ocorrência de íons provenientes de substituição ou presença de impureza.

O processo de precipitação de manganês envolve a concentração de íons oxidados para que se formem óxido-hidróxidos nos sedimentos (Calvert e Pedersen, 1996), refletindo o histórico de oxidação do manganês. A precipitação de manganês durante o soterramento inicial é impulsionada em grande parte por mudanças químicas associadas à degradação da matéria orgânica, em um ambiente óxico manganífero ferruginoso (Roberts, 2015).

Figura 50- Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando óxido de manganês identificado por EDS



4.2.4.3 Crescimento Secundário de Quartzo

A cimentação por sílica é caracterizada pelo crescimento secundário de quartzo em superfícies preexistentes, de maneira localizada e não uniforme, causando diminuição da porosidade. Segundo Morad (1991), o crescimento dos cristais é representado por fases retilíneas, contínuas à cristalografia do núcleo do quartzo detrítico. O crescimento secundário de quartzo é limitado pela presença de argilas, uma vez que estas impedem o contato entre os fluidos intersticiais e a superfície do grão, inibindo a nucleação e crescimento.

Segundo McBride (1989b), as fontes potenciais para a cimentação por quartzo são numerosas, podendo ser resultado da: (1) dissolução por pressão, (2) dissolução de sílica amorfa, (3) transformação de esmectita em illita ou clorita, (4) alteração de feldspatos detríticos e substituição pseudomórfica por caulinita, illita e albita, (5) substituição de minerais silicáticos.

Não foi encontrado crescimento secundário de quartzo nas amostras da Formação São Paulo. Quanto à Formação Resende, o sobrecrecimento ocorre de forma pouco expressiva. A Figura 51 exibe grão de quartzo com *overgrowth* visualizado ao microscópio óptico; fotomicrografias de MEV mostram sobrecrecimento com faces bem desenvolvidas (Figura 52) ou em degraus em um mesmo grão (Figura 53).

A baixa ocorrência do crescimento secundário de quartzo pode estar relacionada à baixa disponibilidade de sílica dissolvida ou à presença significativa de infiltração de argilas, que ocorre em todas as amostras estudadas, limitando as superfícies de nucleação. A presença massiva de sobrecrecimentos de quartzo está relacionada a fases mesodiagenéticas mais desenvolvidas (Morad, 1991), situação não encontrada na Bacia de São Paulo, uma vez que esta apresenta condições de soterramento raso das unidades. A ocorrência verificada pode ter como fonte a alteração de feldspatos e substituição por caulinita, situação largamente observada nas amostras estudadas.

Figura 51 – Fotomicrografia evidenciando o crescimento secundário de quartzo (setas brancas)

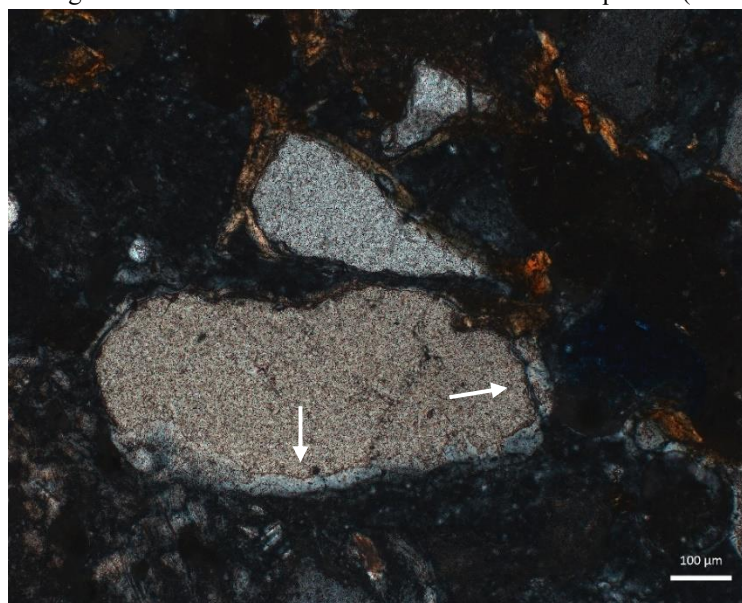


Figura 52 -Fotomicrografia obtida ao MEV, mostrando o crescimento secundário de quartzo com fâces bem desenvolvidas. EDS indica presença de argilominerais com composição esmectítica

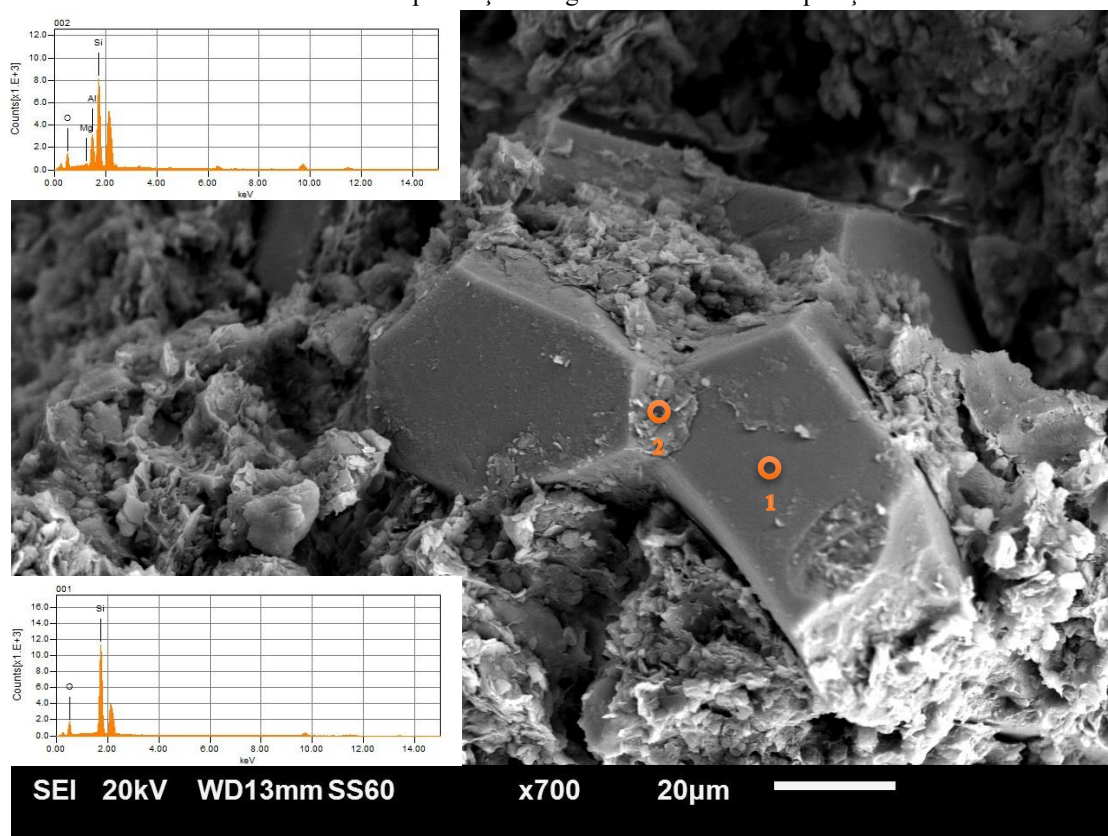
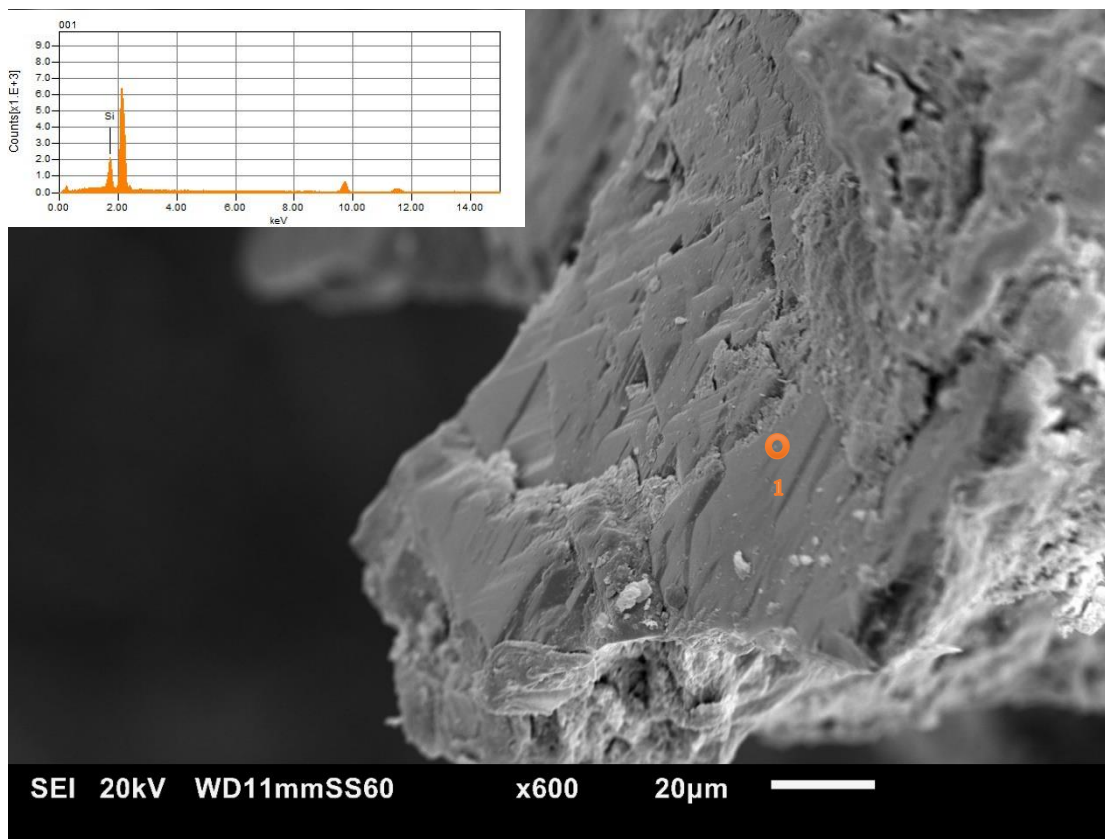


Figura 53-Fotomicrografia obtida ao MEV de sobrecrecimento de quartzo em degrais, em um mesmo grão, com faces bem desenvolvidas

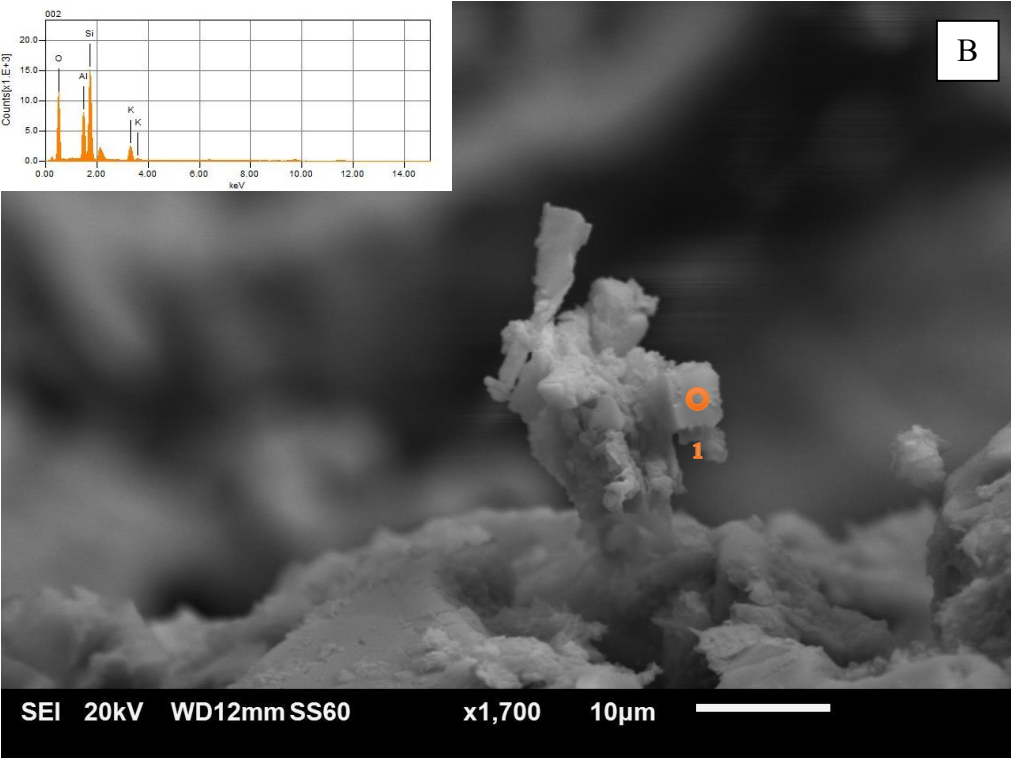
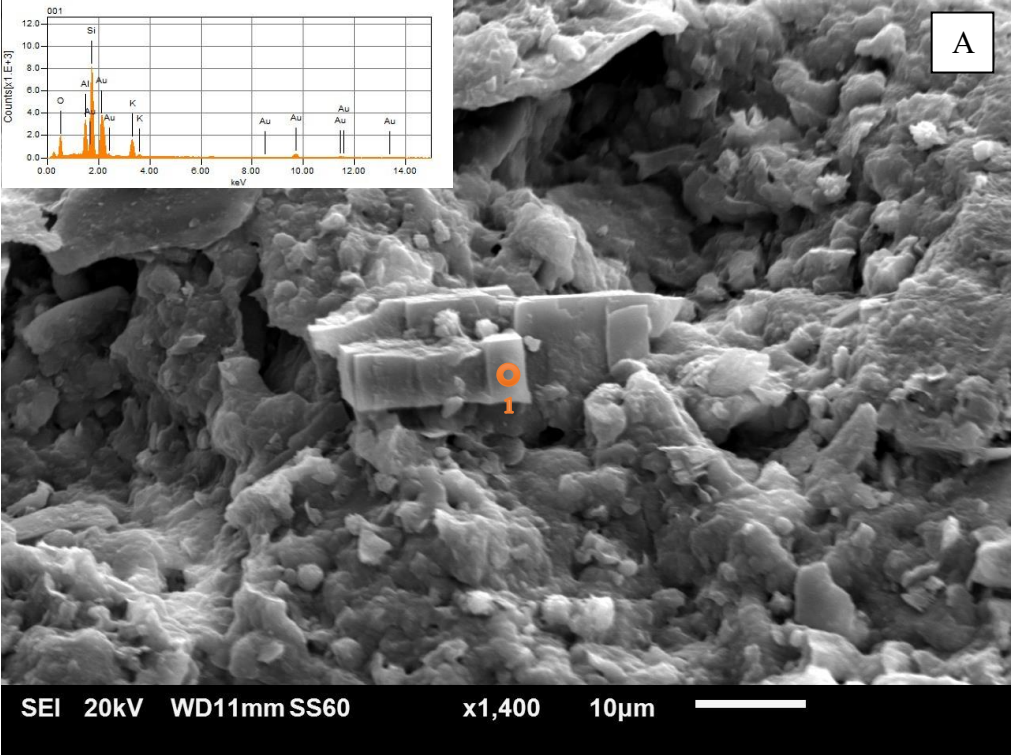


4.2.4.4 Precipitação de Feldspato

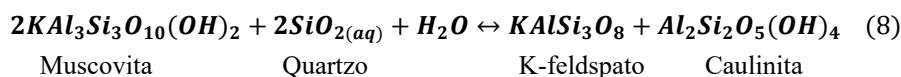
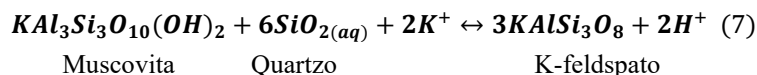
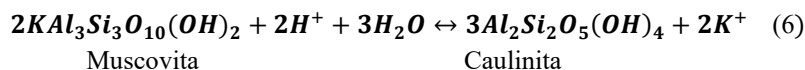
A precipitação autigênica de feldspatos durante o processo diagenético manifesta-se de forma mais pronunciada como feldspatos potássicos que como plagioclásios. A precipitação de feldspatos potássicos autigênicos tem sido atribuída à fase eodiagênética, podendo se tornar instáveis e parcialmente dissolvidos ou substituídos por outros minerais diagenéticos durante a mesodiagênese, a partir da alteração química promovida pelo fluido dos poros (Morad, 1991). O sobrecrecimento de grãos detríticos é a textura mais comum deste tipo de cimento, que também pode ocorrer formando grãos individuais.

Apesar de não ser muito comum nas rochas sedimentares analisadas, foram observados cristais prismáticos discretos de feldspato potássico, com faces bem desenvolvidas, em poros intergranulares, ou mesmo como sobrecrecimento de feldspato (Figura 54 A e B).

Figura 54 -Fotomicrografias obtidas ao MEV de precipitação autigênica de feldspato potássico



A precipitação do feldspato potássico pode ter gênese na derivação de pares coexistentes da degradação da muscovita, mineral acessório encontrado nas amostras estudadas, pelas equações (6) e (7) que culminam na equação (8):



4.2.4.5 Precipitação de Óxido de Titânio

Segundo De Ros (1985), a ocorrência de óxidos de titânio autigênicos raramente é descrita em arenitos, sendo mais conhecido em concentrações superficiais de bauxitas e silcretes. A fonte de cimentação de titânio é a dissolução de silicatos ferromagnesianos, em ambientes oxidantes, que possuem esse elemento em teores subordinados em sua estrutura, como esfero, biotita, piroxênios e anfibólios e minerais titaníferos detríticos como a ilmenita e a magnetita titanífera.

Verificou-se a ocorrência de precipitados de óxido de titânio preenchendo poros nas amostras do poço MT07 do Metrô (Figura 55), a profundidades de 17 m e 49 m, em arenitos da Formação Resende. Também foi identificada a presença de titanita em lâmina delgada e de anatásio nas análises de DRX; o anatásio ocorre em 8% das amostras com uma porcentagem semiquantitativa de 1%. A fonte provável do íon de titânio nas amostras estudadas pode ser atribuída à dissolução do piroxênio, encontrado como augita nos arenitos da Formação Resende (equação 9), bem como de anfibólios que foram encontrados dissolvidos e, em menor quantidade, de biotita.

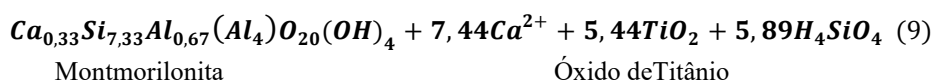
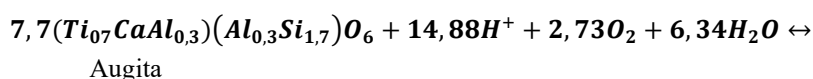
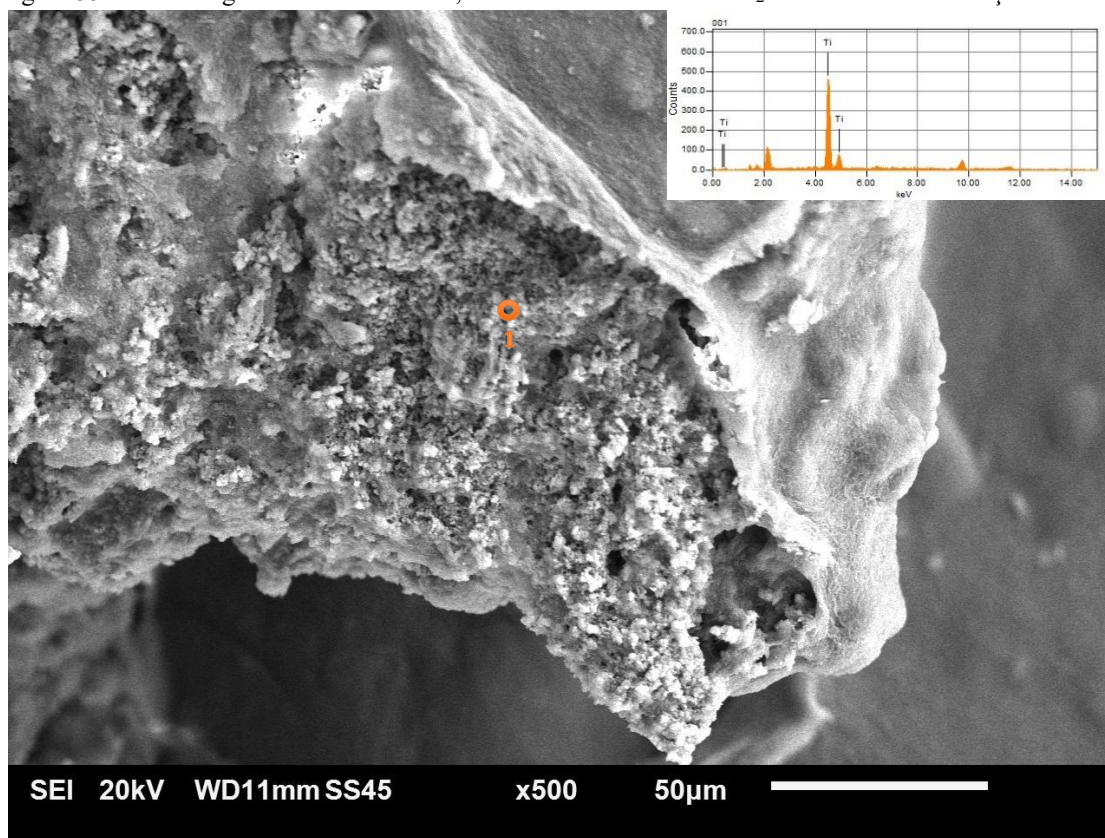


Figura 55-Fotomicrografia obtida ao MEV, mostrando cimento de TiO_2 em arenito da Formação Resende



4.2.4.6 Precipitação de Sulfato

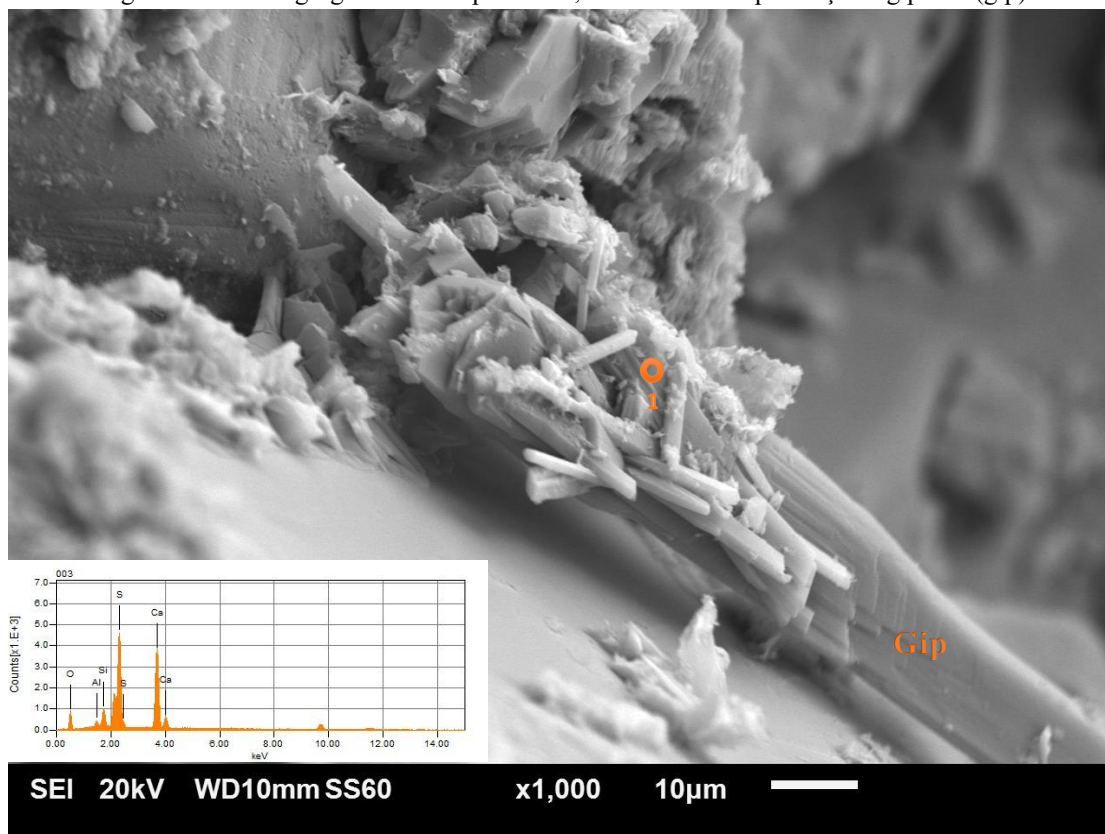
A cimentação por sulfatos pode ocorrer com a precipitação de anidrita, barita e gipsita. Segundo Murray (1964), a anidrita é comumente encontrada em arenitos profundos, influenciada por altas temperaturas, pressões e salinidades, enquanto a gipsita é encontrada em afloramentos rasos, sob condições superficiais em bacias rasas.

Strong e Milowdowski (1987) afirmam que a gipsita pode ser atribuída à diagênese inicial (eodiagênese), ocorrendo como ripas (subparalelas ou radiais) ou como nódulos irregulares, à diagênese tardia (mesodiagênese). Sua precipitação é proveniente da retenção de sais resultantes de decomposição química em regiões de pequena precipitação pluviométrica (Caetano-Chang e Wu, 2003).

Verificou-se a presença de gipsita preenchendo poros nas amostras no poço MT07 do Metrô (Figura 56), a profundidades de 22 m, 34 m e 50 m, em arenitos da Formação Resende. A gipsita ocorre como cristais prismáticos curtos, podendo estar disseminados ou agrupados

em rosetas. Apesar de não ser identificada microscopicamente em amostras de outros poços, foi observada a presença semiquantitativa de até 11% nas amostras analisadas por DRX, ocorrendo em 29% dessas amostras em uma quantidade média de 4%.

Figura 56 -Fotomicrografia obtida por MEV, evidenciando a presença de gipssita (gip)



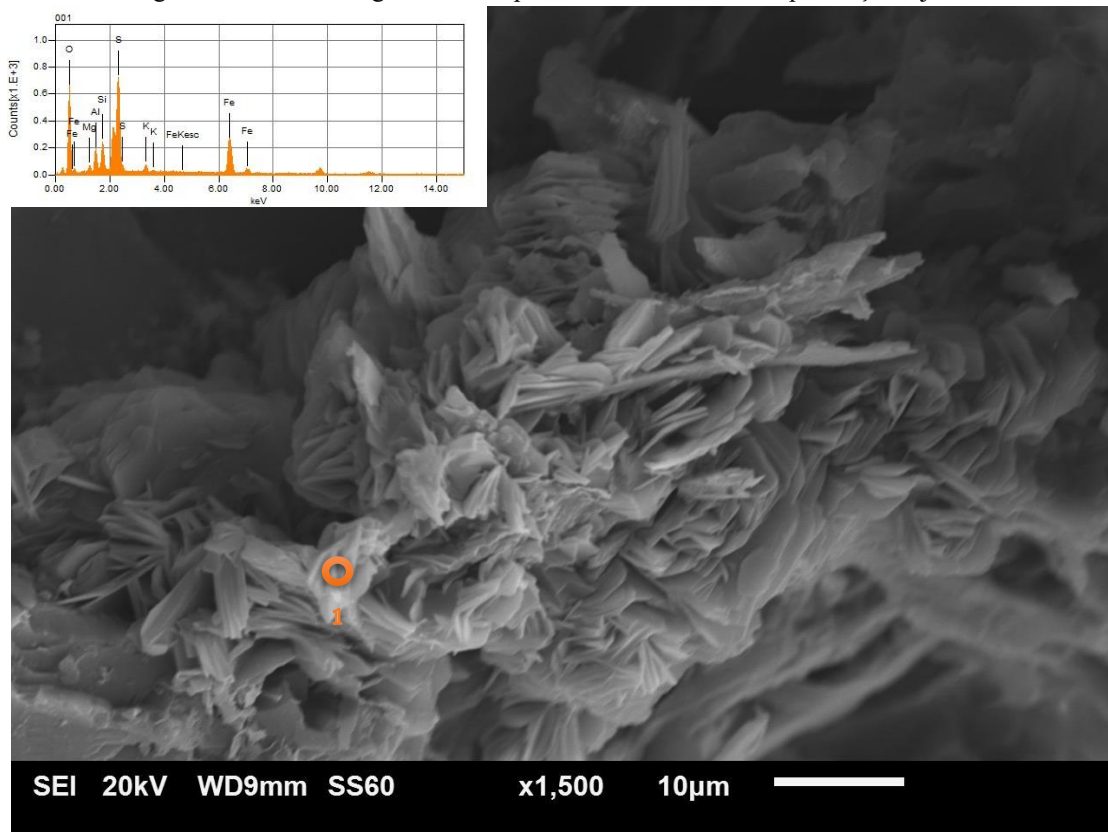
Destoando dos sulfatos mais comuns, foi encontrada jarosita ($\text{KFe}^{3+}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$) em amostras do testemunho MT07, nas profundidades de 22 m e 50 m, como cimento preenchendo poros e, por vezes, na forma de agregados laminares (Figura 57) substituindo muscovitas.

As análises de EDS indicaram a presença de alumínio na composição química da jarosita, fato explicado pela série de solução sólida entre a jarosita e a alunita, com fórmula geral $\text{KX}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$; no subgrupo da alunita, X é representado pelo íon Al^{3+} , e no subgrupo da jarosita, X é representado pelo íon Fe^{3+} . A disponibilidade de alumínio em fluidos diagenéticos pode ser fonte para a solução sólida jarosita-alunite.

Outra substituição isomórfica encontrada na solução sólida de jarosita-alunite é o Mg^{2+} , incorporado na fórmula no mesmo sítio do Al^{3+} e do Fe^{3+} : $\text{K}(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, como pode ser visto na amostra MT07, à profundidade de 50 m (Figura 57). A disponibilidade de

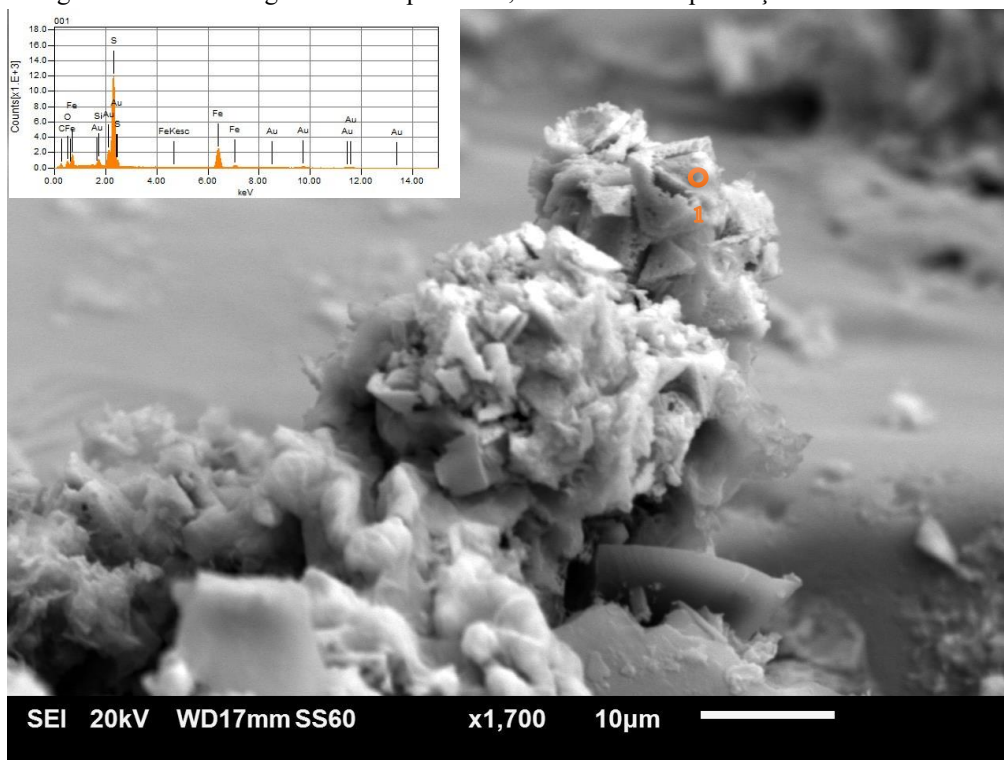
Mg^{2+} pode estar relacionada a processos de dissolução de filossilicatos ferromagnesianos, como a biotita presente no arcabouço detrítico.

Figura 57 – Fotomicrografia obtida por MEV evidenciando a presença de jarosita



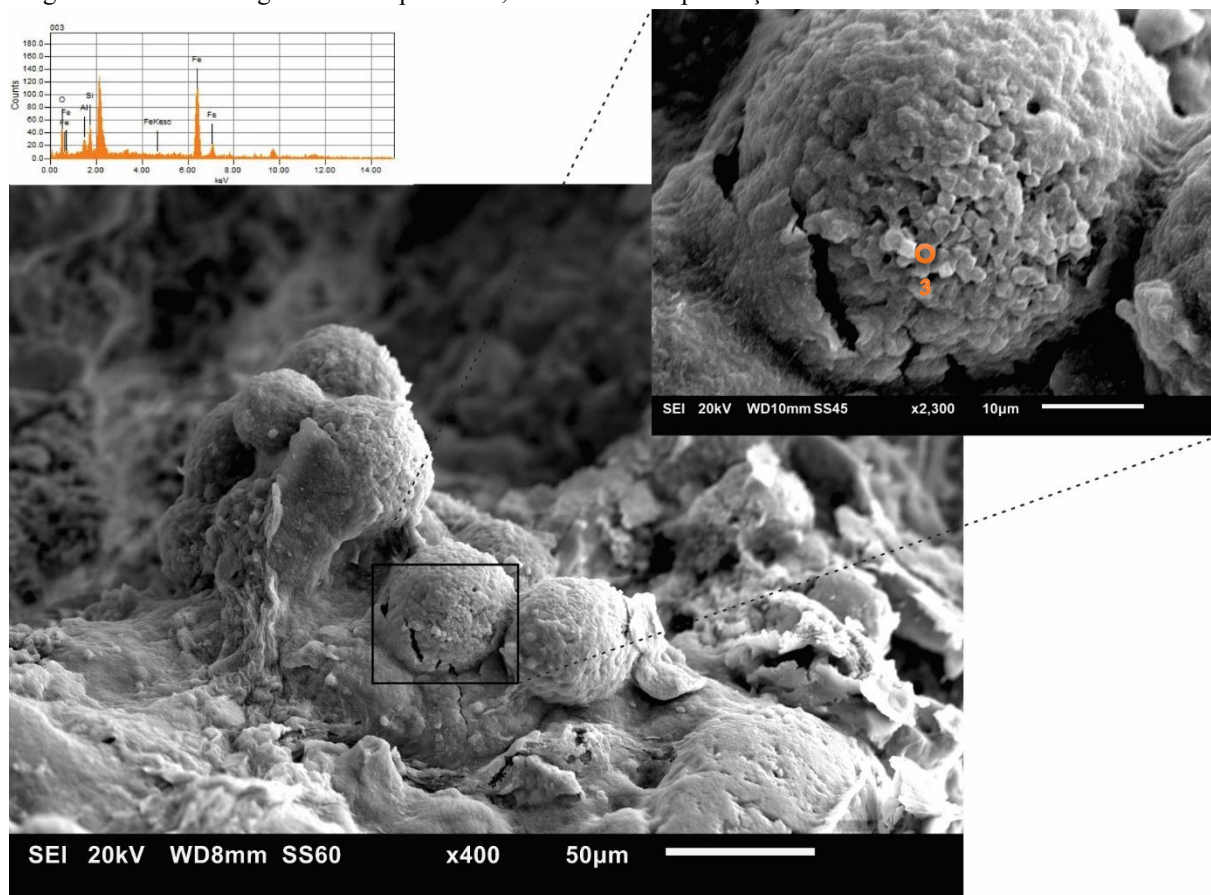
A presença de jarosita pode ser atribuída a ambientes altamente oxidantes e ácidos, onde ocorre a oxidação de sulfetos de ferro (Berner, 1981), como o encontrado em agregados às profundidades de 34 m e 50 m da amostra MT07 (Figura 58). A alunita, por sua vez, pode ser atribuída à oxidação e lixiviação de rochas vulcânicas (Rye e Alpers, 1997), fragmentos líticos presentes nas rochas estudadas. A principal fonte de K^+ pode estar relacionada à dissolução de feldspatos potássicos, comum nas amostras analisadas.

Figura 58- Fotomicrografia obtida por MEV, evidenciando a presença de sulfetos de ferro.



A degradação pós-deposicional da vegetação em lagos pode ser uma das fontes do enxofre para as gipsitas, alunitas e jarositas. Outra fonte possível é de minerais presentes no embasamento cristalino, visto que gipsita foi encontrada na amostra MT07, nas profundidades de 22 m, 34 m e 50 m, próxima ao embasamento na região. Fontes potenciais de sulfato podem estar associadas a sais cíclicos das chuvas advindas da costa durante a deposição do sedimento; por degradação pós-deposicional da biomassa incorporada aos sedimentos; por oxidação de piritas e de minerais acessórios de sulfetos provenientes do embasamento cristalino.

Figura 59 - Fotomicrografia obtida por MEV, evidenciando a presença de mineral framboidal



Embora rara, foi observada a presença de agregados framboidais de microcristais octaédricos (Figura 59), que exibem picos consideráveis de ferro e oxigênio. A morfologia e composição deste mineral podem sugerir a presença de pirita (FeS_2), cuja textura framboidal é uma das formas mais comuns de ocorrência em sedimentos (Wilkin et al., 1996). Apesar da morfologia característica, a falta do enxofre (S) na análise de EDS pode indicar um processo de oxidação da pirita, uma vez que a literatura mostra que framboides de pirita contendo enxofre podem ser oxidados e levados a perca completa do enxofre, mantendo a estrutura framboide original (Suk, D., Peacor, D. & der Voo, R, 1990). O processo de oxidação corrobora com a hipótese de um ambiente oxidante e ácido, que favorece a formação de jatorita a partir de compostos sulfatados gerados pela oxidação da pirita (Berner, 1981).

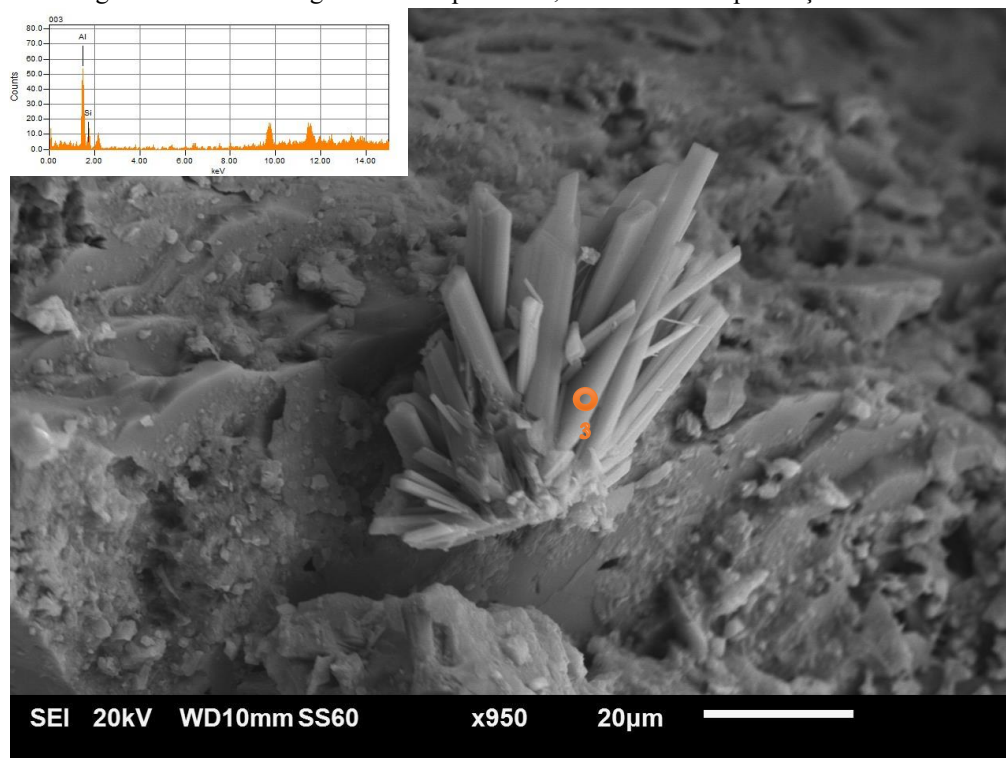
Neste contexto, a formação pretérita da pirita pode estar associada à atividade bacteriana de microrganismos redutores de sulfato (SRB- *Sulfate Reducing Bacteria*), responsáveis pela decomposição da matéria orgânica. No registro geológico, esse processo indica condições euxínicas em colunas de água (Wilkin et al., 1996) típica de ambientes anóxicos e redutores, normalmente associada a ambientes marinhos. Neste caso tal ambiente pode ter sido

proporcionado nas planícies de inundação, margens ou barras de canais dos rios entrelaçados da Formação Resende.

4.2.4.7 Precipitação de Gibbsita

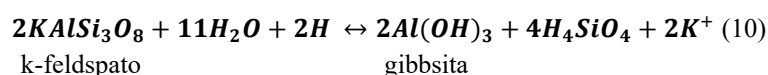
Embora rara, foi observada presença de gibbsita nas formações estudadas, preenchendo espaços intergranulares. O mineral ocorre como pequenos cristais com hábito tabular, formando agregados fibro-radiais em espaços intergranulares (Figura 60). As análises de DRX disponibilizadas pelo Metrô revelaram a presença em índices semiquantitativos de possível presença (pp), com teor inferior a 1% até 5%, de gibbsita na Formação São Paulo; a presença de gibbsita foi também identificada em análises de MEV para a Formação Resende, à profundidade de 50 m.

Figura 60 - Fotomicrografia obtida por MEV, evidenciando a presença de Gibbsita

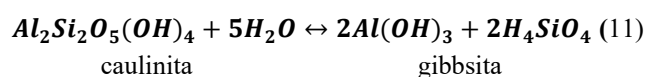


A gênese da gibbsita está associada ao intemperismo em ambientes tropicais úmidos (elevada pluviosidade e alta temperatura) (Karamalidis e Dzombak, 2010), ocorrendo em zonas de meteorização laterítica com intensa lixiviação. Segundo Bhattacharyya, Pal e Srivasta (2000), a formação da gibbsita pode ter duas origens distintas:

- (1) Transformação de minerais primários aluminosos, como a hidrólise de feldspatos, pode levar à precipitação de gibbsita ou caulinita sob condições de moderada lixiviação de sílica, em ambiente neutro a alcalino, em estágio inicial de intemperismo (equação 11). A liberação do K^+ em solução pode propiciar a precipitação autigênica de feldspato potássico ou de jarosita, como descrito anteriormente.



- (2) Transformação de argilominerais em condições alcalinas, como a hidrólise da caulinita, que proporciona a precipitação de gibbsita em condições de alta lixiviação de sílica, em um ambiente ácido (equação 12).

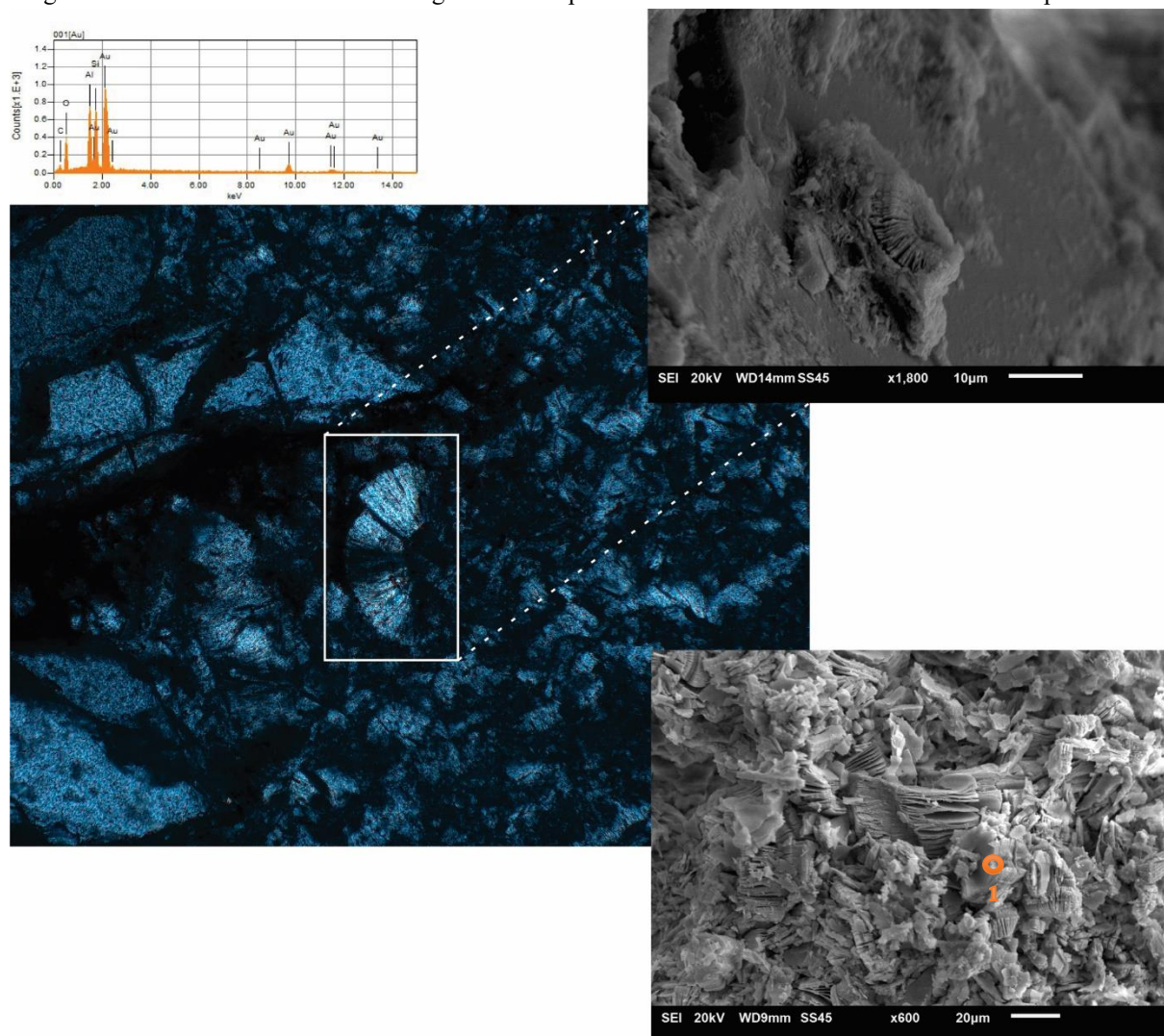


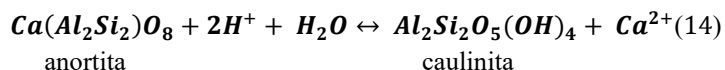
4.2.4.8 Argilas Autigênicas

Argilominerais são filossilicatos que ocorrem normalmente em tamanho argila, com estrutura cristalina complexa e grande variação composicional devido à possibilidade de interestratificações e substituições isomórficas na rede. Fatores como composição química das águas dos poros, mineralogia detrítica e clima podem influenciar a precipitação autigênica de uma grande variedade de argilominerais como cimento, durante todas as fases diagenéticas (Morad, 1991). Os argilominerais autigênicos mais comuns descritos na literatura são caulinita, illita, clorita, esmectita, glauconita, charmosita e berthierina.

Nas formações estudadas, as argilas autigênicas são abundantes e presentes em todas as profundidades. Caulinitas são os argilominerais mais encontrados, evidentes tanto na microscopia óptica como na eletrônica de varredura (Figura 61). São encontradas em espaços intergranulares, com hábito microcristalino vermicular e *booklets*, que desenvolve cristais em formato de placas. Essas placas, quando sobrepostas, podem apresentar-se na forma de pilhas, livros, leques, agregados esféricos, entre outras (Figura 62). Os *booklets* formam-se pela união de uma camada tetraédrica de sílica associada a uma camada octaédrica de alumina, unidas por um oxigênio apical 1:1.

Figura 61 – Foto de lâmina e Fotomicrografia obtida por MEV de massas de caulinitas e caulinita tipo *booklets*





Nas amostras analisadas também foi observada a presença de argilominerais do grupo da esmectita, cujo mineral dominante é a montmorilonita. São encontradas como *pore-lining* revestindo a superfície de grãos detríticos, ocorrendo com textura larval ou favo de mel (Figura 63), situação já aventada por Sant'Anna (1999) para a Formação Resende da Bacia de São Paulo. Sua presença ocorre semiquantitativamente com média de 13,36% na Formação São Paulo e 7,42% na Formação Resende. A formação da esmectita pode ter origem atribuída a geração de paleossolos, a partir da alteração das rochas pré-cambrianas do embasamento, durante o Eoceno Inferior a Médio, sob condições climáticas áridas, como sugerido por Sant'Anna (1999), ou por processos de dissolução de minerais como feldspatos, que disponibilizam íons de cálcio, sódio e alumínio em solução (Equações 16 a 18):

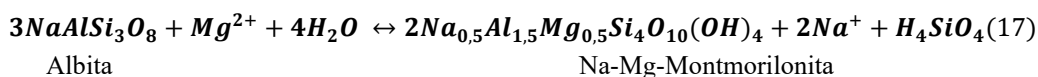
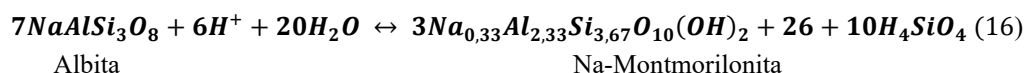
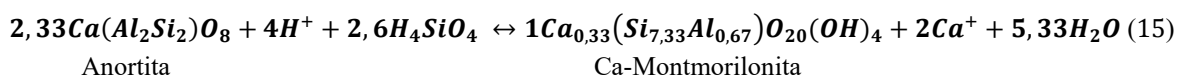
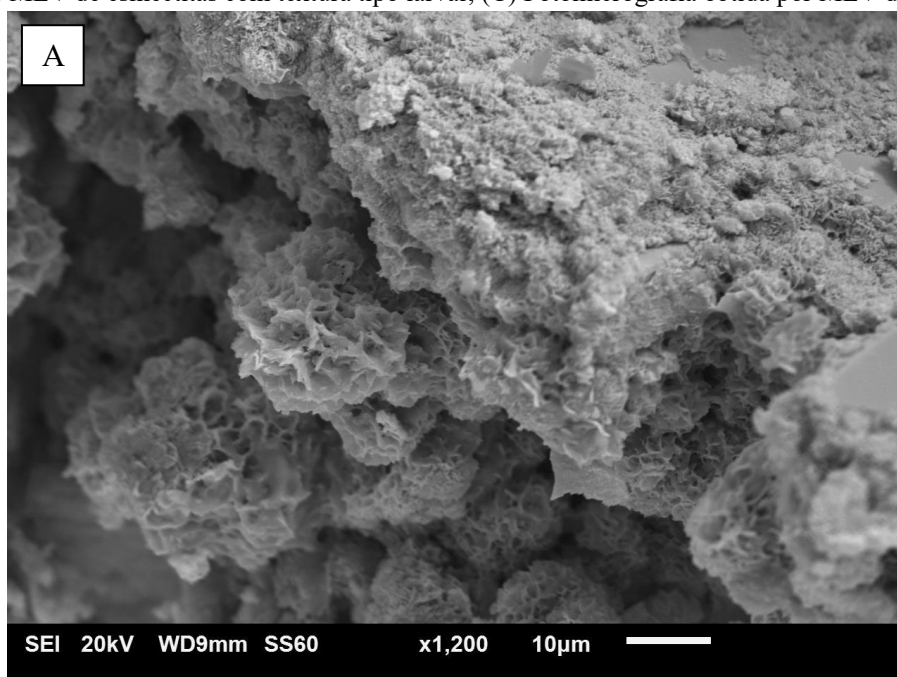
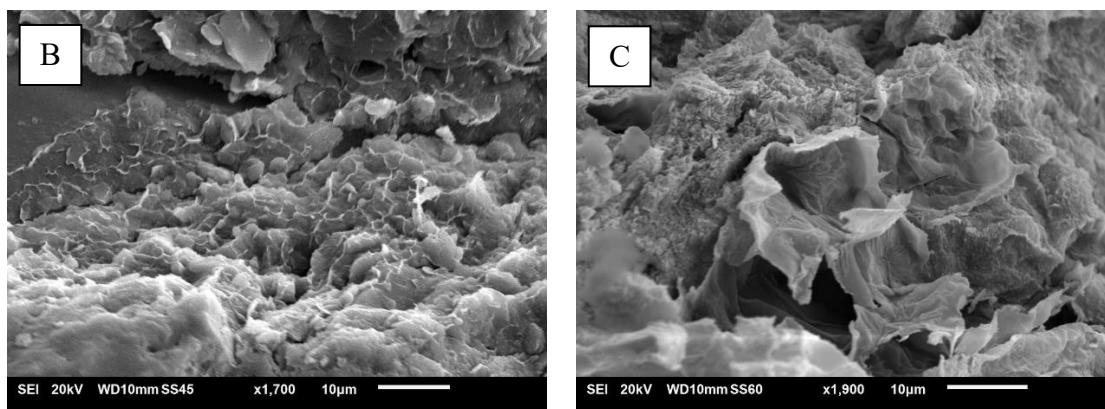


Figura 63 – (A) Fotomicrografia obtida por MEV de esmectitas com textura favo de mel; (B) Fotomicrografia obtida por MEV de esmectitas com textura tipo larval; (C) Fotomicrografia obtida por MEV de esmectita.



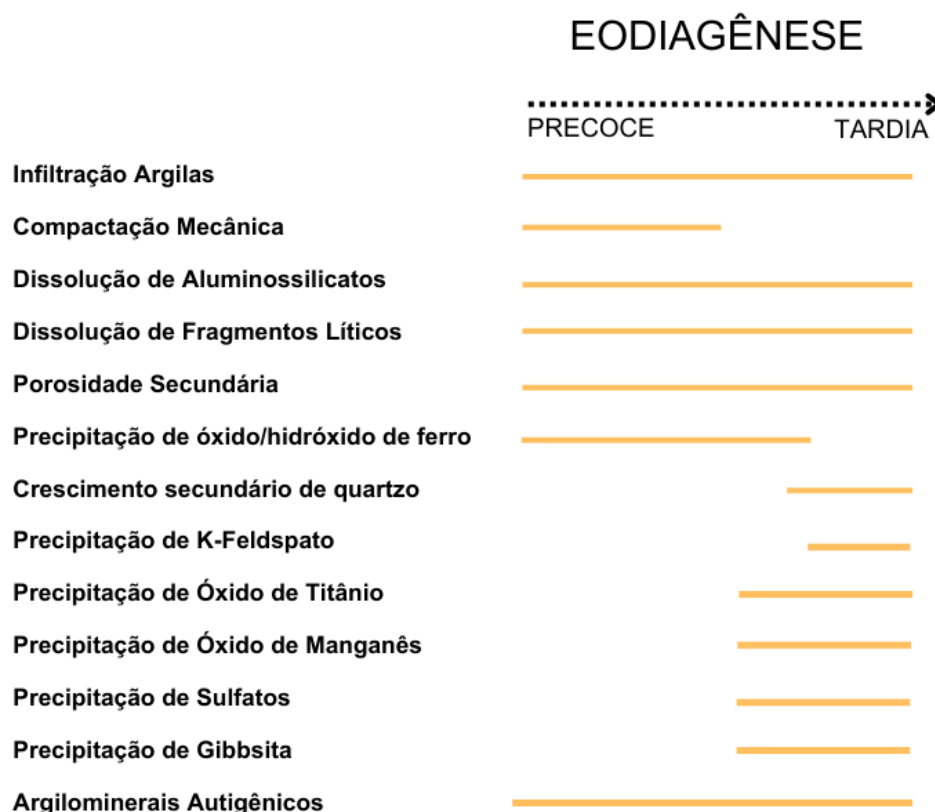


4.3 Sequência Diagenética

A tabela 8 sintetiza as fases diagenéticas a que foram submetidos os arenitos da Bacia de São Paulo com base na ocorrência de minerais autigênicos, deformação/compactação de grãos e em relações texturais encontradas nas lâminas estudadas, incluindo contato e sobreposições de constituintes diagenéticos principais como a precipitação de feldspatos autigênicos e gibbsita em grãos previamente dissolvidos. Cabe ressaltar que nem todos os eventos diagenéticos descritos ocorrem em todas as fácies das formações Resende e São Paulo, por vezes se restringindo a uma única fácies ou unidade em profundidade, como descrito no capítulo 4.2 (Análise Diagenética).

Os arenitos da Bacia de São Paulo foram submetidos a diagênese rasa e de baixa intensidade, caracterizada por processos que permeiam o campo da eodiagênese, imediatamente abaixo ou na superfície de deposição. Com base nas pequenas espessuras das unidades sedimentares e nas profundidades atingidas, não se conclui a presença de fases mesodiagenéticas. A bacia passou por processo de denudação e intemperismo, não sendo submetida a soerguimento ou exumação rápida caracterizada pela telodiagênese.

Tabela 8 – Fases diagenéticas identificadas nos arenitos das Extrações de Areia Itaquareia e Taboão e dos testemunhos do Metrô da Linha 19-Celeste



4.4 Considerações Diagenéticas sobre a Evolução dos Aquíferos da Bacia de São Paulo

O estudo petrográfico, em conjunto com a delimitação de um quadro de evolução diagenética, fornece subsídios para o entendimento de características texturais, mineralógicas e composicionais dos aquíferos que compõem uma bacia.

Processos diagenéticos iniciais, como a infiltração de argilas, permitem a diminuição da porosidade do aquífero ao proporcionar a entrada de sedimentos finos nos espaços intergranulares. A presença de cutículas aderidas no processo precoce de infiltração, por outro lado, também reduz a formação posterior de sobrecrescimentos minerais, contribuindo para a manutenção da porosidade ao longo da evolução diagenética dos sedimentos. A diminuição de espaços entre os grãos também ocorre por processos de compactação mecânica dos sedimentos, que reduz a porosidade e permeabilidade do reservatório a depender de sua intensidade. Também a precipitação de argilas autigênicas proporciona a diminuição dos espaços

intergranulares. Em contrapartida, processos de dissolução de aluminossilicatos e de fragmentos líticos aumentam a porosidade e permeabilidade dos sedimentos, a partir da geração de porosidade secundária em espaços intergranulares e intragranulares.

Assim, a somatória de condições iniciais de sedimentação e os processos diagenéticos subsequentes, que diminuem ou aumentam a porosidade, definem a porosidade e permeabilidade final do aquífero. Cabe então analisar se as transformações diagenéticas foram significativas a ponto de modificar as características permo-porosas dos sedimentos originais, com vistas a avaliar a qualidade do reservatório.

Os processos de cimentação por óxido hidróxido de ferro, precipitação de óxido de manganês, feldspato, óxido de titânio, gipsita, jarosita, crescimento secundário de quartzo, gibbsita e argilas autigênicas, além de alterarem a porosidade dos sedimentos ao preencherem espaços originalmente vazios, alteram a composição mineral inicial, influenciando na composição química das águas do aquífero devido à interação água-rocha. Assim, as características hidroquímicas, as relações de estabilidade dos minerais e a evolução química das águas subterrâneas refletem essa interação, influenciada por eventos diagenéticos a que foram submetidas as rochas-reservatório.

Os processos diagenéticos, como os descritos neste trabalho para as formações Resende e São Paulo, podem balizar impactos na hidroquímica e capacidade desses aquíferos, uma vez que influenciam no armazenamento, transmissão e composição das águas subterrâneas.

6. CONCLUSÃO

As formações São Paulo e Resende, da Bacia de São Paulo, foram estudadas por meio de análises petrográficas, qualitativas e quantitativas, de amostras provenientes das Extrações de Areia Taboão e Itaquareia, bem como de testemunhos das perfurações realizadas para a construção da Linha 19-Celeste do Metrô. O uso de técnicas consolidadas, como petrografia óptica, microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X, EDS, permitiu caracterizar os diferentes aspectos texturais e a composição mineralógica das unidades estudadas, possibilitando a classificação textural e mineralógica dos diferentes litotipos presentes, bem como o estabelecimento da sequência diagenética a que essas rochas foram submetidas.

As amostras analisadas indicam que os arenitos da Formação São Paulo são, em sua maioria, subarcóseos e arcóseos. Nesses arenitos, os minerais acessórios mais comuns são muscovita, zircão e augita, enquanto os argilominerais são, em sua maioria, caulinitas; em menor quantidade ocorrem também esmectitas, além de oxi-hidróxidos de ferro. O empacotamento de grãos é frouxo e o arcabouço é sustentado pelos grãos; a porosidade é predominantemente intergranular, ocorrendo também intragranular pelo processo de dissolução de grãos de feldspatos.

Os arenitos da Formação Resende, majoritariamente arcóseos, contêm maior quantidade de feldspato em comparação com a Formação São Paulo. Os minerais acessórios mais comuns são muscovitas, em geral mecanicamente deformadas, anfibólio, anatásio, rutilo e augita; os argilominerais são, em sua maioria, caulinitas; e em menor quantidade aparecem também esmectitas, além de oxi-hidróxidos de ferro. Esses arenitos apresentam empacotamento dos grãos que varia de frouxo a normal, aumentando com a profundidade, e arcabouço sustentado pelos grãos; a porosidade, predominantemente intergranular, diminui com a profundidade.

Os feldspatos potássicos detríticos ocorrem em maior quantidade nas amostras das Extrações de Areia quando comparadas ao Metrô, o que sugere variação nas condições do ambiente deposicional dessas rochas. Arenitos com maior quantidade de feldspatos, grãos angulosos e menor seleção estão normalmente associados a leques aluviais, enquanto aqueles com menor quantidade de feldspatos e melhor seleção granulométrica estão ligados a depósitos de barras de meandro e planície de inundação. As amostras da Extração de Areia também apresentam maior grau de alteração, reflexo da maior exposição desta área à percolação de águas superficiais e à ação do intemperismo.

A análise da evolução diagenética revelou uma história pós-deposicional marcada pela diversidade e complexidade dos processos diagenéticos. Dentre esses, destaca-se a presença de esmectitas autigênicas, descrita por Sant'Anna em (1999). Foram também identificados minerais diagenéticos até então não descritos na literatura acerca da Bacia de São Paulo, como gipsita, jarosita e gibbsita, além de piratas oxidadas.

Os resultados indicam que os arenitos da bacia foram submetidos a diagênese rasa e de baixa intensidade, caracterizada por processos que se desenvolveram no campo da eodiagênese, imediatamente abaixo ou na superfície de deposição. Além disso é possível inferir um clima úmido, caracterizado pela dissolução de feldspatos, precipitação de caulinitas diagenéticas e gibbsitas.

A interação entre os minerais dos sedimentos, fluidos intersticiais e embasamento foi responsável pelos processos químicos envolvidos nas reações diagenéticas da bacia. Processos como infiltração de argilas; compactação; dissolução e cimentação, resultaram na modificação da textura e mineralogia dos sedimentos, além de alterar propriedades permoporosas dos aquíferos e hidroquímicas de suas águas.

Ressalta-se que, embora este estudo tenha contribuído para a compreensão das características petrográficas dos sedimentos, uma análise integrada de hidroquímica e de relações de estabilidade mineral é recomendada para a adequada compreensão da relação água-rocha e detalhamento do impacto dos processos diagenéticos na química das águas subterrâneas da RMSP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. DE. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. **An. Acad. Bras. Cienc.**, v. 48, p. 15–26, 1976.
- ALMEIDA, F. F. M. Vale do Paraíba Departamento Nacional da Produção Mineral, **Divisão de Geologia e Mineralogia**, Rio de Janeiro, Relatório Anual do Diretor, , 1958.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. DAL RÉ. ORIGEM E EVOLUÇÃO DA SERRA DO MAR. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 135–150, 1998.
- ALMEIDA, V. V. DE; LORETI JR, R. **Projeto Materiais de Construção na Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2019. v. 24
- AMADOR, E. DA S. Estratigrafia e sedimentação na Bacia de Resende-RJ. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 47, p. 181–223, 1975.
- AMADOR, E. S.; CASTRO, M. I. B. Depósitos neoceno-zóicos da bacia de Volta Redonda, RJ, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. **Anais[...]**. Rio de Janeiro, 1976
- ARAI, M.; YAMAMOTO, I. T. Novos dados sobre a idade da Formação Itaquaquacetuba: uma contribuição palinológica, In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, **Anais[...]**, 1995.
- BEDANI, E. DE F.; SAAD, A. R. PAISAGEM NATURAL PALEÓGENA DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO NO MUNICÍPIO DE GUARULHOS, ESTADO DE SÃO PAULO. **Geosciences = Geociências**, v. 28, n. 4, p. 363–376, 2009.
- BERNER, R. A. A new geochemical classification of sedimentary environments. **Journal of Sedimentary Research**, v. 51, n. 2, p. 359–365, 1 jun. 1981.
- T. BHATTACHARYYA, D. K. PAL, P. SRIVASTAVA; Formation of gibbsite in the presence of 2:1 minerals: an example from Ultisols of northeast India. In: **Clay Minerals** 2000; 35 (5): 827–840.
- BIAGOLINI, C. H.; BERNARDES-DE-OLIVEIRA, M. E. C.; CARAMÊS, A. G. Itaquaquacetuba Formation, São Paulo basin, Brazil: New angiosperm components of Paleogene Taphoflora. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 4, p. 639–652, 2013.
- BJORLYKKE, K.; EGEBERG, P. K. Quartz Cementation in Sedimentary Basins. **AAPG Bulletin**, v. 77, n. 9, p. 1538–1548, 1 set. 1993.
- BLATT, H. **Sedimentary petrology**. San Francisco: W.H. Freeman, 1992.
- BLOCH, S. Secondary Porosity in Sandstones: Significance, Origin, Relationship to Subaerial Unconformities, and Effect on Pre-drill Reservoir Quality Prediction. **Reservoir Quality Assessment and Prediction in Clastic Rocks**, p. 137–159, 1994.
- BLOSS, F. D. **Introducción a los métodos de cristalografía óptica**. Ediciones Omega SA.

BOLES, J. R. Six million year diagenetic history, North Coles Levee, San Joaquin Basin, California. **Geological Society Special Publication**, v. 36, p. 191–200, 1987.

BOZZOLA, J. J.; RUSSELL, L. D. **Electron Microscopy: Principles and Techniques for Biologists**. Jones & Bartlett Learning, 1999.

BRINDLEY, G. W. Quantitative X-ray Mineral Analysis of Clays. **Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification**, p. 411–438, 5 abr. 1980.

BRUHN, C. H. L.; ROS, L. F. DE. Formação Sergi: evolução dos conceitos e tendências na geologia dos reservatórios. **Boletim Geociências PETROBRÁS**, v. 1, n. 1, p. 25–40, maio 1987.

BURLEY, S. D.; KANTOROWICZ, J. D.; WAUGH, B. **Clastic diagenesis Geological Society, London, Special Publications**, v. 18, n. 1, p. 189–226, 1985.

BURLEY, S.; WONDER, R. **Sandstone diagenesis: recent and ancient**. [s.l.] Blackwell Publishing, 2009. v. 4

CAETANO-CHANG, Maria Rita; WU, F. T. Diagênese de arenitos da Formação Pirambóia no centro-leste paulista. **Geociências**, v. 22, n. especial, p. 33–39, 2003.

CALVERT, S. E.; PEDERSEN, T. F. Sedimentary geochemistry of manganese; implications for the environment of formation of mangiferous black shales. **Economic Geology**, v. 91, n. 1, p. 36–47, 1 fev. 1996.

CAMPOS, J. E. *et al.* SÍNTESE DO CONHECIMENTO HIDROGEOLÓGICO DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO. **Águas Subterrâneas**, 2002.

CESERO, Pedro de; MAURO, Luiz M.; DE ROS, Luiz F. Techniques of petrographic thin section and pore cast preparation at PETROBRAS. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 3, 1989.

CHOQUETTE, Philip W.; PRAY, Lloyd C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG bulletin**, v. 54, n. 2, p. 207–250, 1970.

COIMBRA, Armando Márcio; RICCOMINI, Claudio; MELO, Mario Sergio de. A Formação Itaquaquetuba: evidências de tectonismo no quaternário paulista. **Atas do 4º Simpósio Regional de Geologia**, p. 253–266, 1983.

COUTINHO, José Moacyr Vianna. Relações litológicas e estruturais da Bacia de São Paulo com pré-cambriano circunvizinho. 1980.

COUTINHO, José Moacyr Vianna. Alguns aspectos sedimentológicos e tectônicos na área da Bacia de São Paulo. **Coletanea das Comunicacoes**, 1989.

CRONE, Anthony Joseph. LABORATORY AND FIELD STUDIES OF MECHANICALLY INFILTRATED MATRIX CLAY IN ARID FLUVIAL SEDIMENTS. 1975.

CURTIS, C. D. Geochemistry: Sedimentary geochemistry: environments and processes dominated by involvement of an aqueous phase. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 286, n. 1336, p. 353–372, 12 set. 1977.

EMERY, D.; MYERS, K. J.; YOUNG, R. Ancient subaerial exposure and freshwater leaching in sandstones | Geology. **Geo Science World**, v. 18, p. 1178–1181, dez. 1990.

FITTIPALDI, F. C. *et al.* Fossil plants from the itatquauecetuba formation (cenozoic of the são paulo basin) and their possible paleoclimatic significance. **Boletim IG-USP. Publicação Especial**, v. 7, p. 183–203, 1989.

FITTIPALDI, Fernando Cilento. Vegetais fósseis da Formação Itaquauecetuba (Cenozóico, bacia de São Paulo). 1990.

FOLK, R. L. **Petrology of Sedimentary Rocks**. 1. ed. Austin, Texas: Hemphill publishing company, 1974.

FUCHTBAUER, Hans. Influence of different types of diagenesis on sandstone porosity. In: **World Petroleum Congress**. WPC, 1967. p. WPC-12130.

GALLOWAY, W. E. Hydrogeologic Regimes of Sandstone Diagenesis: Part 1. Concepts and Principles. v. 59, p. 3–13, 1984.

GOENOPAWIRO, K. **Diagênese dos arenitos terciários da Bacia de Taubaté - SP**. Rio Claro, Tese de Doutorado, 1997.

GOLDSTEIN, J. I. *et al.* **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. 2. ed. Boston, MA: Springer US, 1992.

GÜMBEL, C. W. VON. **Geognostische Beschreibung des ostbayerischen Grenzgebirges**. Justus Perthes, 1868.

GURGUEIRA, Magali Dubas. Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo. 2013.

HASUI, Y. Sobre as bacias tafrogênicas continentais do Sudeste Brasileiro. In: Congresso Brasileiro de Geologia. **Anais[...]** Recife: 1978

HUTCHEON, I. Diagenesis 3. Aspects of the diagenesis of coarse-grained siliciclastic rocks. **Geoscience Canada**, Volume 10, Issue 1, Pages 4 - 14, v. 10, n. 1, p. 4–14, 1983.

JONAS, E. C.; MCBRIDE, E. F. **Diagenesis of sandstone and shale: application on exploration for hydrocarbons**. Austin, Texas: The University of Texas at Austin, 1977.

JUNQUEIRA, B. Camadas cruzadas de areias, gravas e cascalhos fluviais do Vale do Rio Pinheiros (“Campus” da Cidade Universitária, SP). **Geomorfologia. Notas Prévias. Instituto de Geografia–USP, São Paulo**, n.10, p. 7–9, 1969.

KARAMALIDIS, A. K.; DZOMBAK, D. A. **Surface complexation modeling: gibbsite**. John Wiley & Sons, 2010.

KESSLER, L. G. Diagenetic sequence in ancient sandstones deposited under desert climatic conditions. **Journal of the Geological Society**, v. 135, n. 1, p. 41–49, 1978.

KNOLL, M. Aufladepotential und sekundäremission elektronenbestrahlter körper. **Zeitschrift für technische Physik**, v. 16, p. 467–475, 1935.

KUTNER, A. S.; BJORNBERG, A. J. S. Contribuição para o conhecimento geológico-geotécnico da bacia de São Paulo: litotipos, notação estratigráfica e feições estruturais relevantes. **Revista de Engenharia**, v. 97, p. 65–73, 1997.

LIMA, M. R.; AMADOR, E. DA S. Análise palinológica de sedimentos da Formação Resende, Terciário do estado do Rio de Janeiro. Coletânea de trabalhos paleontológicos. **Anais[...]** n. 27, p. 371-8, 1985.

LIMA, M. R. DE; MELO, M. S. DE. Palinologia de Depósitos Rudáceos da Região de Itatiaia, Bacia de Resende - RJ. **GEONOMOS**, v. 2, n. 1, p. 12–21, 1994.

LOUGHEED, M. S.; MANCUSO, J. J. Hematite Framboids in the Negaunee Iron Formation, Michigan; evidence for Their Biogenic Origin. **Economic Geology**, v. 68, n. 2, p. 202–209, 1 abr. 1973.

MALISKA, A. M. Microscopia eletrônica de varredura e microanálise. **UFSC, Santa Catarina**, 2004.

MANCINI, F.; RICCOMINI, C. Estratigrafia e ambientes de sedimentação da Formação Pindamonhangaba, Bacia de Taubaté, Sp. *In*: XXXIX Congresso brasileiro de Geologia. **Anais[...]**, 1995.

MATTER, A.; RAMSEYERL, K. Cathodoluminescence Microscopy as a Tool for Provenance Studies of Sandstones. **Provenance of Arenites**, p. 191–211, 1985.

MAWE, JOHN. **Travels in the interior of Brazil: particularly in the gold and diamond districts of that country, by authority of the prince regent of Portugal: including a voyage to the Rio de le Plata and an historical sketch of the revolution of Buenos Ayres.** Longman, Hurst, Rees, Orme, and Brown, 1812.

MCBRIDE, E. F. Diagenetic Processes That Affect Provenance Determinations in Sandstone. **Provenance of arenites. Proc. Cetraro, Cosenza**, 1984, p. 95–113, 1985.

MCBRIDE, E. F. Quartz cement in sandstones: a review. **Earth-Science Reviews**, v. 26, n. 1–3, p. 69–112, 1 jan. 1989.

MELO, M. *et al.* Datações C14 em sedimentos quaternários da Grande São Paulo. *In*: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, ABEQU. **Anais[...]**. 1987

MELO, M. DE; PONÇANO, W. L. Gênese, distribuição e estratigrafia dos depósitos cenozóicos no Estado de São Paulo. 1983.

MELO, M. S. DE; COIMBRA, A. M.; RICCOMINI, C. **Evolução dos conhecimentos sobre a geologia da Bacia de São Paulo na década de oitenta.** *In*: Workshop Geologia da Bacia de São Paulo. **Anais[...]**. 1989

MEZZALIRA, S. Novas ocorrências de vegetais fósseis cenozóicos no Estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geográfico e Geológico**, v. 1962, n. 15, p. 73–91, 1961.

MILLIKEN, K. L. Late Diagenesis and Mass Transfer in Sandstone-Shale Sequences. *In*: **Treatise on Geochemistry: Second Edition**. 2013. v. 9p. 181–206.

MIRANDA, Angélica Oliveira; ROCHA, Marcelo Monteiro da. **Geoestatística aplicada a dados geológicos e geotécnicos da Bacia de São Paulo**. 2021. Tese de Doutorado-Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. J. **X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. Oxford: Oxford University Press (OUP), 1989.

MORAD, S. **Diagenesis of clastic sedimentary rocks**. Uppsala, Sweden: Departament of Mineralogy and Petrology, Institute of Geology, Uppsala University, 1991.

MORAD, S. *et al.* Diagenesis of quartz in the Upper Proterozoic Kaimur Sandstones, Son Valley, central India. **Sedimentary Geology**, v. 73, n. 3–4, p. 209–225, 1 out. 1991.

MORAD, S.; ALDAHAN, A. A. Diagenetic “replacement” of feldspars by titanium oxides in sandstones. **Sedimentary Geology**, v. 51, n. 3–4, p. 147–153, 1 fev. 1987.

MORAD, S.; KETZER, J. M.; ROS, L. R. DE. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: Implications for mass transfer in sedimentary basins. **Sedimentology**, v. 47, p. 95-120, 2000.

NAGATANI, T. *et al.* Development of an Ultra High Resolution Scanning Electron Microscope by Means of a Field Emission Source and In-Lens System. **Scanning Microscopy**, v. 1, n. 3, p. 901–909, 1987.

NICOL, W. On a method of so far increasing the divergency of the two rays in calcareous-spar, that only one image may be seen at a time. **Edinburgh new philosophical journal**, v. 6, p. 83–84, 1829.

REGO, L. F. M. As formações cenozóicas de São Paulo. **Anuário da Escola Politécnica de São Paulo**, Ano II, 2ª série, p. 231-267, 1933.

RICCOMINI, C. *et al.* TECTÔNICA E SEDIMENTAÇÃO NO SISTEMA DE RIFTS CONTINENTAIS DA SERRA DO MAR (BACIAS DE VOLTA REDONDA, RESENDE, TAUBATÉ E SÃO PAULO). **Anais do 1º Simpósio de Geologia**, 1987.

RICCOMINI, C. *et al.* **Rift continental do sudoeste do Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1989.

RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M.; TAKIYA, H. Tectônica e Sedimentação na Bacia de São Paulo. **Problemas Geológicos e Geotécnicos na RMSP**, 1992.

RICCOMINI, C.; SANT’ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. *Em: Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca ed. São Paulo: p. 383–405, 2004.

ROBERTS, A. P. Magnetic mineral diagenesis. **Earth-Science Reviews**, v. 151, p. 1–47, 1 dez. 2015.

RODRIGUES, S. K. **Geologia Urbana da região metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998.

RÖNTGEN, W. C.. **Ueber eine neue Art von Strahlen**. BoD–Books on Demand, 1895.

- ROS, L. F. DE. **Petrologia e características de reservatório da Formação Sergi (Jurássico) no Campo de Sesmaria, Bacia do Recôncavo, Brasil.** Ouro Preto: UFOP, 1985.
- ROS, L. F. DE; CESERO, P. Argilas em arenitos-Bases para a interpretação petrogenética. *In: XXXIV Cong. Brasileiro de Geologia. Anais[...]*. Goiás: 1986.
- ROS, L. F. DE; MORAES, M. A. S. Sequência diagenética em arenitos: uma discussão inicial. *In: Congresso Brasileiro de Geologia. Anais[...]*. 1984.
- RYE, R. O.; ALPERS, C. N. The stable isotope geochemistry of jarosite. **US Geological Survey**, p. 97–88, 1997.
- SANT'ANNA, L. G. **Geologia, mineralogia e gênese das esmectitas dos depósitos paleogênicos do Rift continental do sudeste do Brasil.** Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, 1999.
- SANTOS, D. B. Palinologia de amostras da seção tipo da Formação Itaquaquecetuba, Bacia de São Paulo, na Mineradora Itaquaréia. **Course Completion Assignment, Graduação em Ciências Biológicas**, 2005.
- SCHMIDT, V.; MCDONALD, D. A. **The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis**, 1979.
- SORBY, H. C. On the Microscopical, Structure of Crystals, indicating the Origin of Minerals and Rocks. **Quarterly Journal of the Geological Society of London**, v. 14, n. 1–2, p. 453–500, 1858.
- SUGUIO, K. **Geologia sedimentar.** Editora Blucher. 2003
- SUGUIO, K.; BARBOUR, A. P. Morfologia e gênese das estruturas limoníticas dos sedimentos da Bacia de São Paul. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 41, n. 2, p. 161–180, 1969.
- SUGUIO, K.; TAKAHASHI, L. I. Estudos dos Aluviões Antigos dos Rios Pinheiros e Tietê, São Paulo, SP. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 42, n. 3, p. 550–570, 1970.
- SUK, D.; PEACOR, D. R.; VOO, R. VAN DER. Replacement of pyrite framboids by magnetite in limestone and implications for palaeomagnetism. **Nature**, v. 345, n. 6276, p. 611–613, 1990.
- TAKIYA, H. **A DADOS GEOLÓGICOS QUANTITATIVOS ESPACIAIS DA BACIA DE SÃO PAULO.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1991.
- TAKIYA, H; LANDIM, P. M. B. **Estudo da sedimentação Neogênico-Quaternário no município de São Paulo: caracterização dos depósitos e suas implicações na geologia urbana.** Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, 1997.
- THOMSON, A. Pressure Solution and Porosity. 1959.
- TOLENTINO, M. **Algumas considerações sobre um carvão da bacia de São Paulo**, 1965.
- TUCKER, M. E. **SEDIMENTARY PETROLOGY An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks.** 3. ed. Oxford: Blackwell, 1991.

VARGAS, M. Evolução dos Conhecimentos. **Solos da Cidade de São Paulo**, 1992.

VESPUCCI, J. B. DE O. **Sistemas deposicionais e evolução tectono-sedimentar da Bacia de Taubate**, SP. 1984. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984

WALDERHAUG, O. Precipitation rates for quartz cement in sandstones determined by fluid-inclusion microthermometry and temperature-history modeling. **Journal of Sedimentary Research**, v. 64, n. 2a, p. 324–333, 1 abr. 1994.

WALKER, T. R. Diagenetic Origin of Continental Red Beds. **The Continental Permian in Central, West, and South Europe**, p. 240–282, 1976.

WALKER, T. R.; WAUGH, B.; GRONE, A. J. Diagenesis in first-cycle desert alluvium of Cenozoic age, southwestern United States and northwestern Mexico. **Geological Society of America Bulletin**, v. 89, p. 19–32, jan. 1978.

WALTHER, JOHANNES. **Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft: Beobachtungen über die Bildung der Gesteine und ihrer organischen Einschlüsse**. G. Fischer v.3, 1894.

WENTWORTH, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **The Journal of geology** v. 30, n. 5, p. 377–392, jul. 1922.

WILKIN, R. T.; BARNES, H. L.; BRANTLEY, S. L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 60, n. 20, p. 3897–3912, 1 out. 1996.

WILSON, M. D.; PITTMAN, E. D. Authigenic clays in sandstones; recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis. **Journal of Sedimentary Research**, v. 47, n. 1, p. 3–31, 1 mar. 1977.

WORDEN, Richard H.; BURLEY, S. D. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. **Sandstone diagenesis: Recent and ancient**, p. 1-44, 2003.

YAMAMOTO, I. T. **Palinologia das bacias tafrogênicas do sudeste (bacias de Taubaté, São Paulo e Resende): análise bioestratigráfica integrada e interpretação paleoambiental**. Tese de Doutorado, 1995.

ANEXO 1

**SONDAGENS DISPONIBILIZADAS PELA
COMPANHIA DO METROPOLITANO DE
SÃO PAULO**

Sondagem	X	Y	Cota	Profundidade	Sondagem	X	Y	Cota	Profundidade
SP9469	332566	7394109	760.00	54.45	SP9166	336745	7397110	722.73	47.39
SP9465	332550	7394214	758.10	54.45	SP9567	336838	7397180	722.63	49.27
SP9614	332542	7394299	756.54	52.45	SP9228	336837	7397173	722.63	49.45
SP9461	332537	7394375	754.28	52.45	SP9163	336902	7397262	722.72	44.24
SP9611	332552	7394433	752.13	50.45	SP9160	337032	7397356	723.69	41.27
SP9459	332560	7394449	751.50	50.45	SP9157	337121	7397425	724.29	38.27
SP9454	332648	7394630	739.19	36.45	SP9154	337226	7397541	722.29	31.30
SP9467	332612	7394638	737.47	36.45	SP9153	337262	7397592	722.48	32.05
SP9452	332696	7394734	734.52	36.45	SP9151	337316	7397628	722.64	30.00
SP9417	332665	7394784	734.10	36.45	SP9148	337342	7397664	723.06	60.36
SP9449	332708	7394896	736.07	38.45	SP9145	337418	7397773	722.91	30.43
SP9445	332764	7394939	737.02	41.45	SP9570	337417	7397812	723.04	30.45
SP9432	333009	7395367	732.01	42.28	SP9142	337510	7397903	723.02	31.45
SP9430	333033	7395413	730.94	42.39	SP9139	337588	7398014	722.84	35.30
SP9426	333105	7395451	729.15	42.45	SP9136	337668	7398165	722.80	31.45
SP9477	333068	7395464	729.42	42.16	SP9135	337700	7398175	722.99	31.45
SP9423	333179	7395530	728.38	41.45	SP9133	337756	7398253	722.63	29.45
SP9557	333214	7395592	727.99	43.45	SP9131	337822	7398347	722.97	29.45
SP9420	333259	7395626	727.46	44.18	SP9573	337822	7398383	722.84	30.34
SP9415	333299	7395654	726.70	46.15	SP9130	337884	7398400	722.95	29.45
SP9413	333375	7395680	726.25	46.38	SP9127	337911	7398531	723.56	30.45
SP9550	333430	7395681	725.24	46.45	SP9124	337998	7398578	723.66	30.45
SP9548	333500	7395705	724.43	46.15	SP9279	342228	7401723	729.55	32.18
SP9409	333524	7395699	724.22	47.3	SP9281	342315	7401826	731.67	35.45
SP9407	333606	7395713	723.90	46.45	SP9283	342307	7401931	746.53	49.27
SP9542	333680	7395721	724.03	43.45	SP9287	342431	7402078	750.24	60.1
SP9405	333691	7395732	723.87	40.45	SP9293	342552	7402259	749.27	56.1
SP9402	333747	7395740	723.78	41.45	SP9295	342678	7402305	743.97	55.13
SP9540	333751	7395741	724.01	45.45	SP9600	342707	7402312	742.67	47.23
SP9538	333790	7395748	724.12	41.45	SP9301	342917	7402464	741.84	43.45
SP9400	333851	7395683	724.31	36.45	SP9307	343108	7402640	733.85	33.3
SP9536	333864	7395704	724.30	34.37	SP9311	343156	7402693	731.04	30.1
SP9474	333878	7395718	724.42	34.45	SP9313	343201	7402751	730.67	30.45
SP9533	333896	7395716	724.21	33.45	SP9315	343228	7402799	729.5	30.13
SP9398	333973	7395712	724.54	32.45	SP9317	343246	7402828	729.28	30.12
SP9486	334055	7395727	724.90	29	SP9321	343333	7402961	728.91	29.18
SP9237	334069	7395787	724.81	60.36	SP9325	343479	7403043	728.76	31.28
SP9230	334103	7395799	724.72	60.42	SP9598	343555	7403125	730.37	34.4
SP9632	334202	7395788	725.29	50.03	SP9328	343584	7403105	729.65	34.45
SP9225	334231	7395802	725.16	31.45	SP9331	343688	7403164	729.71	29.4
SP9222	334364	7395854	726.22	31.3	SP9335	343781	7403311	732.8	26.3
SP9221	334408	7395880	725.67	35.3	SP9337	343774	7403403	738.76	34.3
SP9232	334499	7395890	726.53	40.24	SP9339	343792	7403468	744.87	20.45
SP9219	334618	7395884	726.54	44.3	SP9341	343794	7403487	746.63	40.26
SP9236	334875	7395915	727.59	43.02	SP9596	343787	7403540	754.24	45.15
SP9212	334950	7395926	727.79	49.02	SP9343	343782	7403563	754.24	45.45
SP9208	335096	7396031	728.12	28.45	SP9347	343756	7403660	758.99	26.15
SP9206	335220	7396180	723.52	24.19	SP9353	343759	7403890	770.9	32.45

Sondagem	X	Y	Cota	Profun- didade	Sondagem	X	Y	Cota	Profun- didade
SP9205	335244	7396222	728.36	21.63	SP9358	343728	7404100	767.11	39.06
SP9202	335328	7396348	728.57	18.1	SP9362	343811	7404243	749.74	50.45
SP9199	335404	7396453	728.74	28.92	SP9365	343837	7404287	742.83	50.4
SP9479	335491	7396427	729.68	29.25	SP9371	344030	7404425	736.56	31.45
SP9196	335430	7396521	728.88	30.3	SP9373	344060	7404447	737.71	33.15
SP9193	335500	7396599	728.29	29	SP9619	344098	7404392	738.26	33.45
SP9192	335520	7396630	727.52	29.25	SP9375	344106	7404470	743.23	37.3
SP9190	335602	7396675	725.76	29.45	SP9377	344169	7404502	752.78	54.3
SP9235	335640	7396751	724.12	31.45	SP9379	344255	7404512	760.68	53.05
SP9189	335751	7396740	723.40	31.25	SP9381	344311	7404556	766.52	63.15
SP9186	335824	7396742	724.10	31.45	SP9383	344366	7404609	767.69	60.17
SP9180	336064	7396776	723.92	31.43	SP9386	344477	7404694	760.44	60.07
SP9177	336152	7396791	722.67	30.15	SP9389	344537	7404779	751.19	48.11
SP9173	336394	7396905	723.37	31.13	SP9391	344565	7404855	743.42	40.1
SP9169	336652	7397019	722.62	41.25	SP9394	344634	7404886	738.18	37.15
SP9168	336675	7397076	722.71	42.15	SP9396	344636	7404943	737.54	37.15

ANEXO 2

**BANCO DE DADOS ANÁLISES DE
DIFRAÇÃO DE RAIO X
DISPONIBILIZADAS PELA COMPANHIA
DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO**

Nº da Sonda-gem	X	Y	Profundidade (m)	Intervalo de análise	Descrição da amostra	Fases minerais identificadas													
						Qz	Micr	Alb	Kao	Musc	Hem	Goet	Esmec	Nont	Ana	Gibb	Gips	Total	
9124	-46.586.725	-23.514.870	30.45	21-24	Areia fina a média argilosa medianamente compacta a compacta	51%	10%	pp	32%	7%			pp				pp	100%	
9127	-46.587.578	-23.515.279	30.45	19-20	Argila arenosa (fina a média) rija	56%	11%	pp	24%	9%			pp				pp	100%	
9130	-46.587.865	-23.516.467	29.45	14-20	Areia fina a média pouco argilosa, medianamente compacta a compacta	22%	15%		45%	14%	4%		pp					100%	
9131	-46.588.477	-23.516.938	29.45	15-19	Areia fina a grossa compacta a muito compacta	57%	11%	pp	24%	8%			pp				pp	100%	
9133	-46.589.133	-23.517.780	29.45	13-22	Areia fina a grossa pouco argilosa, medianamente compacta a muito compacta	25%	15%		36%	8%			15%		1%			100%	
9135	-46.589.682	-23.518.477	31.45	14-20	Areia média à grossa medianamente compacta a compacta	25%	21%	pp	42%	12%			pp					100%	
9136	-46.590.004	-23.518.560	31.45	17-20	Areia fina à média pouco argilosa, compacta	25%	21%		37%	9%								92%	
9139	-46.590.797	-23.519.917	35.3	19-22	Areia média a grossa pouco argilosa, com pedregulho fino a médio (quartzo) compacta a muito compacta	28%	10%		25%	6%		1%	30%		1%			101%	
9140	-46.591.075	-23.520.245	32	12 x 19	Areia média a grossa, c/ pedregulho fino,	40%	15%		30%	15%								100%	

[illegible]

[illegible]

9208	-46.615.423	-23.537.572	43.55	25-26	Argila arenosa (fina), dura	35%	5%		20%	5%		30%		5%	95%
9212	-46.616.864	-23.538.510	49.02	21-30	Areia fina a média pouco argilosa, muito compacta	28%	13%		30%	7%		20%	1%	1%	100%
9215	-46.618.426	-23.537.954	46.3	26-38	Areia fina a grossa, muito compacta	45%	11%	pp	37%	7%		pp		pp	100%
9219	-46.620.119	-23.538.848	44.3	32-33	Areia fina a grossa pouco argilosa, compacta a muito compacta	62%	9%	pp	21%	8%		pp		pp	100%
9221	-46.622.176	-23.538.866	35.3	23-34	Areia fina a média, c/ argila compacta a muito compacta	48%	9%	pp	35%	8%		pp		pp	100%
9222	-46.622.608	-23.539.095	34.3	21-22	Areia média a grossa pouco argilosa, c/pedregulho fino (quartzo), muito compacta	26%	10%	6%	30%	7%		20%		1%	100%
9225	-46.623.922	-23.539.555	31.45	21-24	Areia média a grossa c/pedregulho fino, compacta a muito compacta	23%	11%		32%	8%		20%		6%	100%
9228	-46.598.251	-23.527.441	49.45	34-38	Areia média a grossa, c/ pouco pedregulho fino, muito compacta	49%	15%	pp	27%	9%		pp		pp	100%
9232	-46.621.279	-23.538.788	40.24	20-22	Areia média a grossa, c/argila, compacta a muito compacta	62%	10%	pp	21%	7%		pp		pp	100%
9235	-46.610.018	-23.531.124	31.45	23-27	Areia média a grossa argilosa, c/ pedregulho fino a médio (quartzo), compacta a muito compacta	40%	15%		10%	5%		30%			100%
9279	-46.544.970	-23.486.890	32.18	18-23	Areia fina siltosa, compacta á muito compacta	59%	21%	9%	5%	5%		1%			100%

9281	-46.544.110	-23.485.961	35.45	25-29	Areia fina a média siltosa, muito compacta	54%	21%	8%	8%	8%		1%		100%
9283	-46.544.181	-23.485.018	49.27	35-37	Areia fina a média siltosa, muito compacta	55%	18%	8%	pp	pp		8%	11%	100%
9287	-46.542.949	-23.483.705	60.1	46-48	Areia pouco siltosa, dura	43%	15%	8%	21%	8%	pp	5%		100%
9293	-46.541.747	-23.482.076	56.1	46-56	Areia siltosa pouco arenosa, dura	36%	20%	8%	22%	8%	pp	6%		100%
9295	-46.540.506	-23.481.672	55.13	41-43	Areia siltosa pouco arenosa (areia fina) dura	59%	21%	6%	5%	6%		3%		100%
9297	-46.539.805	-23.481.386	48.14	33-38	Argila pouco siltosa, dura	51%	23%	4%	13%	6%	pp	3%		100%
9301	-46.538.151	-23.480.260	43.45	35-37	Areia arenosa (areia fina), dura	57%	21%	10%	3%	9%	pp	pp		100%
9307	-46.536.267	-23.478.693	33.3	15-26	Areia fina a média siltosa pouco argilosa, compacta a muito compacta	44%	24%	pp	17%	15%	pp	pp		100%
9311	-46.535.785	-23.478.219	30.1	19-23	Argila siltosa, rija a dura	61%	22%	5%	3%	8%	pp	1%		100%
9313	-46.535.344	-23.477.702	30.45	16-26	Argila siltosa, dura	62%	16%	4%	12%	4%	pp	2%		100%
9315	-4.653.507	-23.477.271	30.13	15-26	Argila siltosa, dura	58%	7%	pp	25%	7%		3%	pp	100%
9317	-46.534.893	-23.477.003	30.12	13-24	Argila siltosa, dura	59%	24%	4%	8%	3%	pp	2%		100%
9321	-46.534.025	-23.475.813	29.18	15-19	Areia média siltosa pouco argilosa, muito compacta	49%	8%	pp	28%	8%		7%	pp	100%
9325	-46.532.593	-23.475.090	31.28	13-23	Argila siltosa, pouco arenosa (areia fina), dura	52%	10%	pp	22%	10%		6%		100%
9328	-46.531.552	-23.474.539	34.45	21-34	Argila siltosa, dura	58%	20%	8%	5%	8%		1%		100%
9331	-46.530.532	-23.474.019	29.4	18-25	Argila pouco arenosa (areia fina) muito rija a dura	25%	20%	7%	29%	9%	pp	10%		100%
9335	-46.529.609	-23.472.695	26.3	16-26	Argila dura	34%	22%	5%	27%	5%	2%	5%		100%
9337	-46.529.664	-23.471.862	34.3	21-25	Argila pouco siltosa, dura	54%	23%	8%	6%	8%		1%		100%

9339	-46.529.483	-23.471.280	20.45	19-20	argila arenosiltosa (areia fina) dura	52%	26%	7%	6%	8%	pp	1%	100%
9341	-46.529.460	-23.471.109	40.26	29-32	Argila pouco siltosa, dura	51%	21%	3%	16%	6%	pp	3%	100%
9343	-46.529.568	-23.470.420	45.45	31-43	Argila siltoarenosa (areia fina), com pedregulhos finos esparsos pouco oxidada, dura	52%	26%	9%	2%	9%	pp	2%	100%
9362	-46.529.220	-23.464.284	50.45	35-42	Areia média a grossa, siltosa, compacta á muito compacta	55%	24%	7%	6%	7%	pp	1%	100%
9365	-46.528.952	-23.463.890	50.4	40-42	Argila siltosa, dura	61%	18%	9%	5%	5%	pp	2%	100%
9371	-46.527.053	-23.462.661	31.45	21-25	Argila siltosa, pouco arenosa (areia fina) muito compacta	49%	22%	5%	14%	5%	pp	5%	100%
9373	-46.526.756	-23.462.468	33.15	20-22	Areia fina siltosa, compacta á muito compacta	59%	21%	6%	5%	8%	pp	1%	100%
9375	-46.526.307	-23.462.262	37.3	23-27	Argila siltosa, dura	57%	16%	3%	15%	5%	pp	4%	100%
9377	-46.525.685	-23.461.981	54.3	43-48	Areia fina argilosa muito compacta	52%	22%	7%	7%	10%	1%	1%	100%
9379	-46.524.845	-23.461.897	53.05	39-41	Argila siltosa dura	60%	8%	pp	24%	8%		pp	100%
9381	-46.524.292	-2.346.151	63.15	52-53	Areia fina a média pouco argilosa, muito compacta	62%	28%	3%	2%	5%	pp	pp	100%
9383	-46.523.741	-23.461.034	60.17	46-54	Argila siltosa pouco arenosa (areia fina), dura	50%	19%	7%	13%	7%	pp	4%	100%
9386	-46.522.649	-23.460.280	60.07	47-54	Areia fina á média, siltosa muito compacta	47%	23%	11%	5%	11%	2%	1%	100%
9389	-46.522.052	-23.459.514	48.11	37-39	Areia média a grossa argilosa, muito compacta	67%	18%	3%	9%	3%	pp	pp	100%
9391	-46.521.773	-23.458.833	40.1	31-32	Areia média grossa, siltoargilosa, com pedregulhos finos a	40%	30%	3%	17%	10%		pp	100%

					médios (feldspatos), muito compacta									
9394	-46.521.094	-23.458.558	37.15	23-27	Areia fina argilosa compacta a muito compacta	58%	8%	pp	20%	8%		6%		100%
9396	-46.521.070	-23.458.045	37.15	22-32	Areia fina argilosa, compacta á muito compacta	54%	21%	10%	4%	10%		pp	1%	100%
9398	-46.626.458	-23.540.342	32.45	19-23	Areia média a grossa siltosa, com cascalho fino, compacta	51%	16%	11%	8%	13%		pp	1%	100%
9400	-46.627.649	-23.540.591	36.45	21-29	Areia fina a grossa pouco argilosa, compacta a muito compacta	57%	26%	7%	2%	8%		pp	pp	100%
9402	-46.628.664	-23.540.067	41.45	11 x 16	Areia fina a média, pouco argilosa, pouco micácea, medianamente compacta a compacta	48%	27%	8%	4%	11%		pp	2%	100%
9405	-46.629.212	-23.540.133	40.45	28-29	Areia fina a média argilosa, compacta	53%	20%	3%	17%	7%			pp	100%
9407	-46.630.045	-23.540.293	46.45	12 x 15	Areia fina a média, pouco siltosa, medianamente compacta a muito compacta	66%	26%		pp	8%			pp	100%
9409	-46.630.848	-23.540.409	47.3	36-39	Areia grossa siltosa, com cascalho médio, compacta á muito compacta	61%	9%	pp	21%	9%		pp		100%
9413	-46.632.313	-23.540.562	46.38	34-36	Areia fina a média, siltosa, compacta á muito compacta	45%	7%	pp	33%	7%		8%	pp	100%
9415	-46.633.061	-23.540.797	46.15	35-36	Areia fina a média argilosa, muito compacta	58%	23%	8%	3%	8%		pp	pp	100%

9417	-46.639.370	-23.548.583	36.45	27-28	Areia média a pouco argilosa, com lentes de argila cinza, compacta a muito compacta	52%	26%	9%	5%	8%	pp	pp	100%
9417	-46.639.370	-23.548.583	36.45	27-28	Areia média a pouco argilosa, com lentes de argila cinza, compacta a muito compacta	52%	26%	9%	5%	8%	pp	pp	100%
9420	-46.633.456	-23.541.039	44.18	33-35	Areia média á grossa siltosa medianamente compacta á compacta	61%	24%	6%	3%	6%	pp	pp	100%
9423	-46.634.247	-23.541.903	41.45	26-41	Areia, média a grossa siltosa com pedregulhos finos, compacta	62%	20%	6%	4%	8%	pp	pp	100%
9426	-46.634.981	-23.542.602	42.45	28-42	Areia fina á média siltosa compacta muito compacta	62%	21%	4%	5%	8%	pp	pp	100%
9430	-46.635.694	-23.542.939	42.39	22-31	Areia fina a média, siltosa compacta	49%	23%	4%	18%	6%	pp	pp	100%
9432	-46.635.929	-23.543.358	42.38	19-33	Areia fina a média, siltosa, pouco argilosa, compacta á muito compacta	50%	27%	9%	3%	11%	pp	pp	100%
9445	-46.638.377	-23.547.193	41.45	28-33	Areia média a grossa, pouco siltosa, medianamente compacta a compacta	58%	27%	4%	4%	6%	pp	1%	100%
9449	-46.638.934	-23.547.579	38.45	29-31	Areia fina siltosa, compacta	41%	15%		27%	7%		10%	100%
9452	-46.639.068	-23.549.039	36.45	26-27	Areia fina a média, pouco argilosa e pouco siltosa, medianamente compacta	63%	20%		10%	7%			100%

9454	-46.639.546	-23.549.974	36.45	27-28	Argila plástica pouco arenosa (fina), rija	20%	12%	8%	30%	10%		20%		100%
9459	-46.640.437	-23.551.597	50.45	24-29	Argila pouco siltosa, plástica, mole a rija	24%			64%	10%	2%	pp	pp	100%
9461	-46.640.671	-23.552.263	52.45	40-42	Areia fina a média argilosa, fofa e medianamente compacta	53%	19%	8%	9%	11%		pp	pp	100%
9463	-46.640.631	-23.553.079	53.45	34-35	Argila pouco siltosa, medianamente consistente	48%	14%	5%	22%	7%		2%	2%	100%
9465	-46.640.555	-23.553.722	54.45	31-32	Areia média argilosa, pouco a medianamente compacta	38%			58%	4%				100%
9467	-46.639.902	-23.549.897	36.45	29-30	Areia fina a grossa pouco argilosa, medianamente compacta	69%	18%	4%	3%	6%		pp	pp	100%
9469	-46.640.412	-23.554.666	54.45	39-40	Argila, plástica, rija	52%	16%	7%	10%	14%		pp	1%	100%
9471	-46.640.305	-23.555.039	54.45	47-48	Argila, plástica, medianamente consistente a rija	59%	12%	3%	19%	3%		1%	3%	100%
9474	-46.627.386	-23.540.272	34.45	23-24	Areia fina a média, pouco argilosa, medianamente compacta a compacta	61%	27%	4%	2%	6%		pp	pp	100%
9477	-46.635.341	-23.542.483	42.16	30-42	Areia média á grossa siltosa, compacta á muito compacta	51%	20%	9%	7%	13%		pp	pp	100%
9479	-46.611.508	-23.534.036	29.25	21-24	Argila siltosa c/ areia fina, dura	42%	8%	pp	22%	8%		20%	pp	100%
9486	-46.625.653	-23.540.211	29	11 x 12	Areia média a grossa, compacta	30%	17%	1%	25%	9%		10%	8%	100%
9533	-46.627.204	-23.540.291	33.45	25-26	Areia fina a média siltosa pouco argilosa compacta	57%	26%	5%	4%	8%		pp	pp	100%

9536	-46.627.522	-23.540.403	34.37	21-22	Argila siltosa, dura	54%	24%	5%	12%	3%	pp	pp	98%
9538	-46.628.237	-23.539.993	41.45	24-39	Areia fina a média siltosa compacta á muito compacta	52%	22%	9%	5%	12%	pp	pp	100%
9540	-46.628.626	-23.540.058	41.45	30-38	Areia média á grossa siltosa, compacta á muito compacta	49%	27%	8%	4%	12%	pp	pp	100%
9542	-46.629.318	-23.540.230	43.45	22-24	Areia arenosa (areia fina), medianamente consistente a muito rija	57%	21%	6%	5%	8%	1%	2%	100%
9545	-46.629.904	-23.540.269	45.45	30-31	Areia fina a grossa com micáceos, medianamente compacta a muito compacta	56%	19%	9%	5%	11%	pp	pp	100%
9548	-46.631.086	-23.540.356	46.15	33-34	Areia fina a grossa argilosa, com pedregulhos finos, medianamente compacta a compacta	59%	28%	3%	3%	6%	pp	1%	100%
9550	-46.631.773	-23.540.565	46.45	33-35	Areia fina a grossa pouco com micáceos, medianamente compacta a compacta	58%	20%	8%	3%	11%	pp	pp	100%
9557	-46.633.895	-23.541.348	43.45	30-32	Areia média grossa pouco argilosa, compacta	54%	29%	6%	2%	9%	pp	pp	100%
9567	-46.598.251	-23.527.441	49.27	40-43	Areia fina a grossa c/ argila muito compacta	30%	20%	1%	33%	7%		8%	1% 100%
9570	-46.592.501	-23.521.722	30.45	24-25	Areia fina a média pouco argilosa, compacta a muito compacta	26%	15%		31%	8%		20%	100%

9573	-46.588.465	-23.516.608	30.34	17-18	Areia fina a média pouco siltosa compacta	28%	10%		30%	6%		25%		1%	100%
9596	-46.529.522	-23.470.634	45.15	34-40	Argila siltosa, dura	52%	20%	pp	10%	8%		pp		10%	100%
9598	-46.531.835	-23.474.351	34.4	21-24	Silte argiloso, duro	56%	23%	2%	10%	6%		pp	3%		100%
9600	-46.540.225	-23.481.615	47.23	32-38	Argila siltosa, pouco arenosa (areia fina), dura	63%	21%	2%	7%	5%		pp	2%		100%
9611	-46.640.513	-23.551.737	50.45	36-39	Areia média a grossa pouco argilosa, com pedregulhos finos, fofa a pouco compacta	56%	24%	3%	11%	5%		pp	1%		100%
9614	-46.640.626	-23.552.948	52.45	40-41	Areia fina a média pouco argilosa, fofa	71%	15%	2%	9%	3%		pp	pp		100%
9619	-46.526.386	-23.462.970	33.45	23-25	Areia fina argilosa siltosa, muito compacta	53%	18%	11%	2%	15%		pp	1%		100%

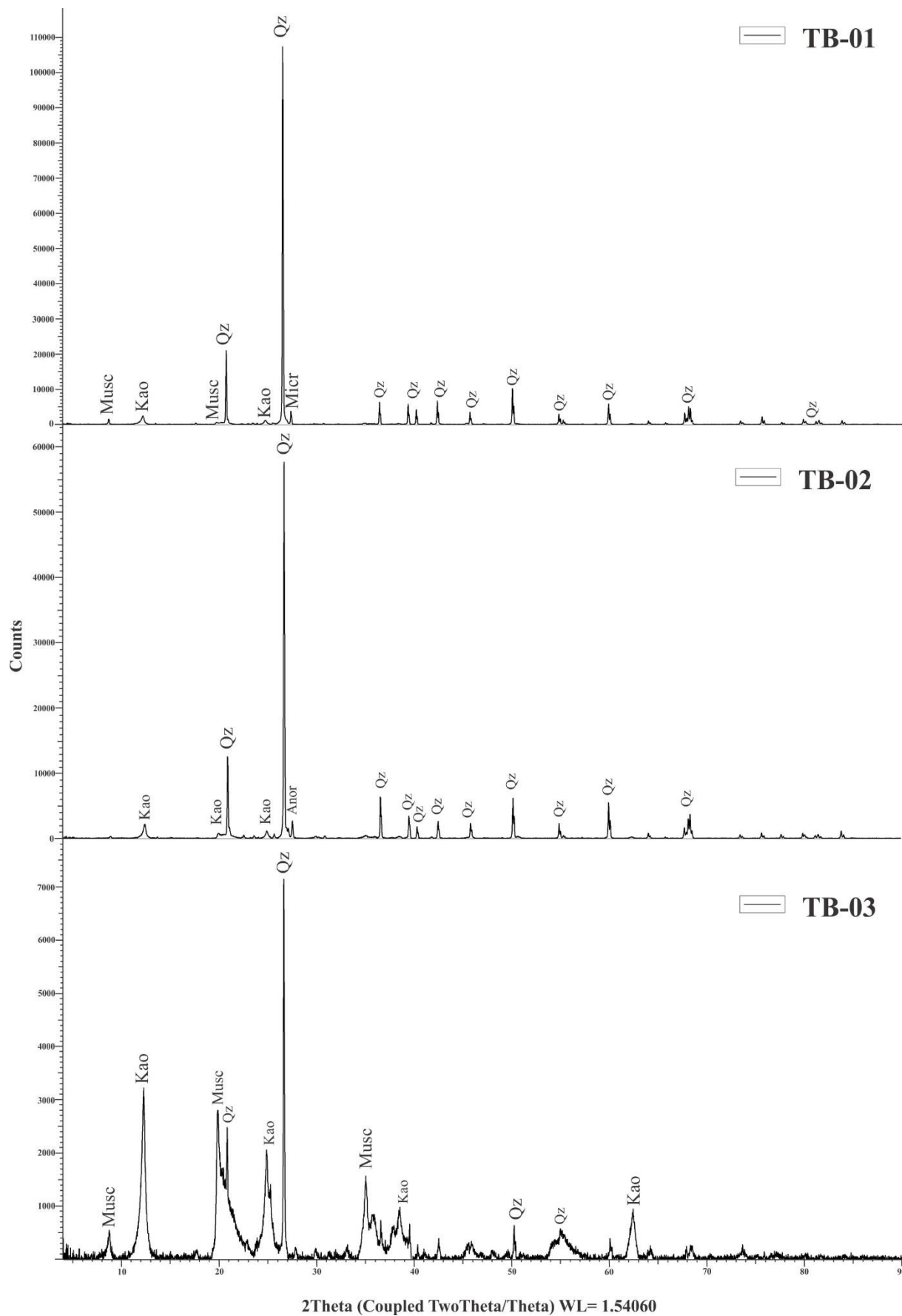
ANEXO 3

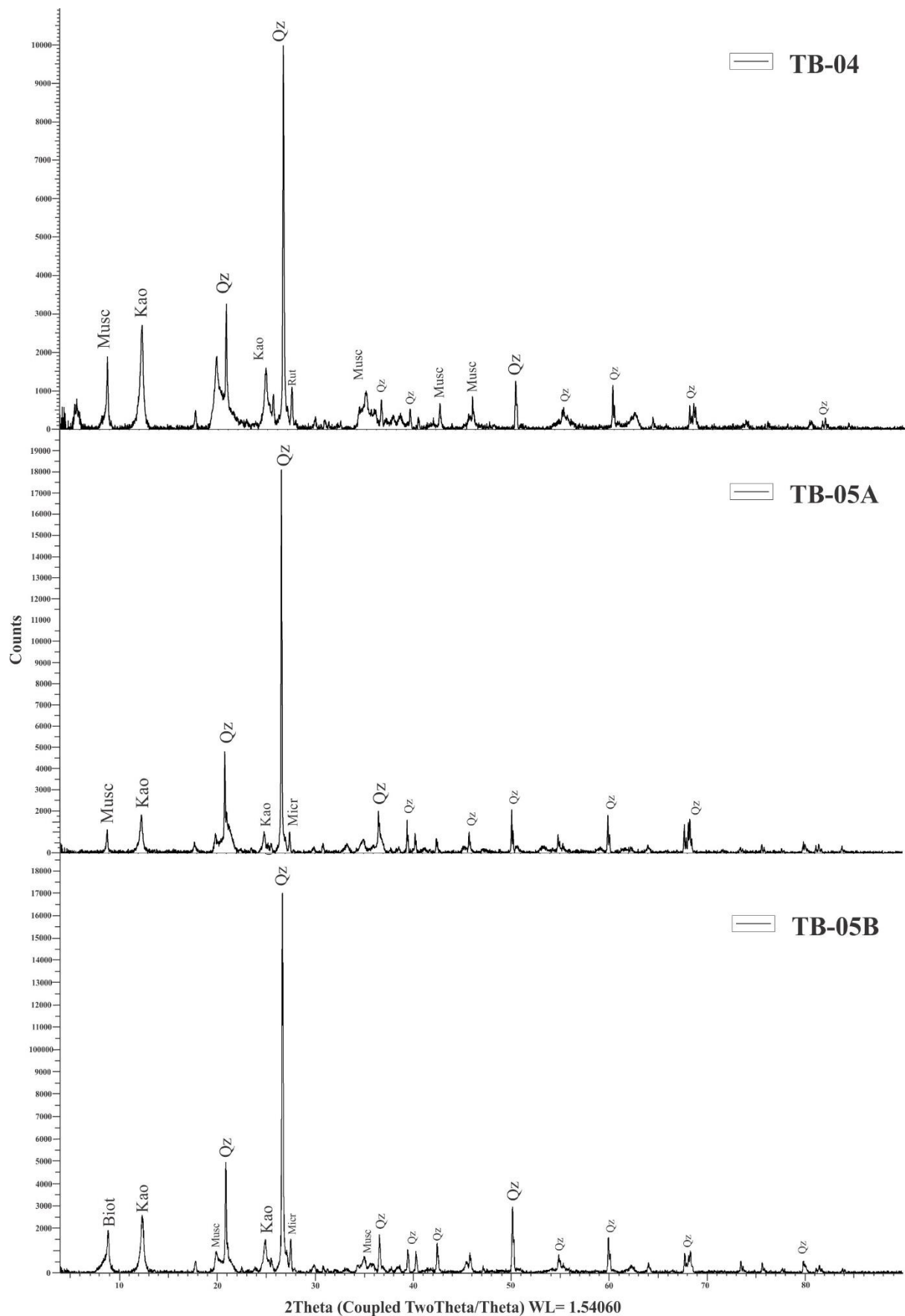
**BANCO DE DADOS ANÁLISES DE
DIFRAÇÃO DE RAIO X – TABOÃO**

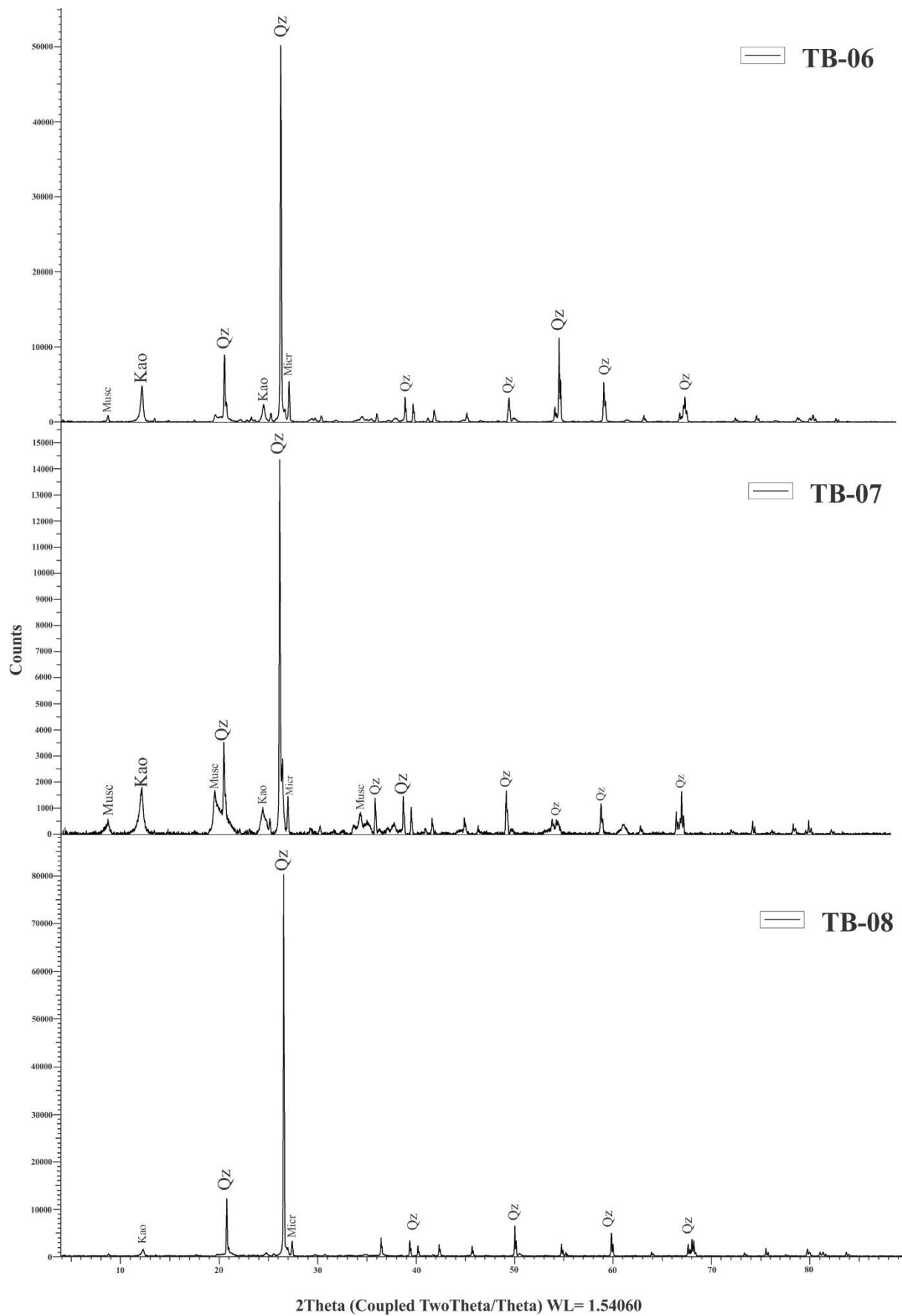
[illegible]

ANEXO 4

ANÁLISES DE DIFRAÇÃO DE RAIO X – TABOÃO







ANEXO 5

DESCRIÇÃO DAS LÂMINAS PETROGRÁFICAS

Lâmina	Fáce	Seleção	Tamanho dos grãos		Contatos	Arredondame	Arcabouço	Empacotame	Porosidade	Matriz	Cimento	Orientação
		mb=mto boa			p = pontual	ar = arredondado	sg = sustent. Grãos	fr = frouxo	inter = intergran	p = pouca	carb = carbonático	est=estratif.
		b = boa	diâmetro em	Granulometr	f = flutuante	sar = sub- arredon.	sm = sustent. matriz	m = médio	intra = intragran	m = moderada	ferr = ferruginoso	gr=gradação
		m = média	mm	ia	s = suturado	san = sub- angular	sc = sustent. cimento	n = normal		e = elevada	sil = silicático	
		r = ruim			r = reto	an = anguloso		fc = fechado			arg = argiloso	
MT01-19	3Ar 1	b	0,18-1,7	ag	f	sar	sg /sc	fr	-	p	arg/ferr	bandas de ferr
MT06-05	3Ar 1	b	0,25-0,70	af	f	san	sg/sc	fr	inter	m	arg ferr	
MT01-05	3Ar 1	m	0,08-1,2	am	p f	sar	sc	fr	inter/intra	p	ferr	
MT03-05	3Ar 1	b	0,1-2,2	am	f(p)	sar	sc	fr	inter	f	arg	
MT17-18	3Ar 1	b	0,158-0,7	af	p	san	sg	m	inter	p	arg/ferr	
TB-01	3Ar 1	m/r	0,2-4	am-g	p(r)	sar/san	sc/sg	n/m	inter/intra	m	ferr/arg(sil)	
TB-02	3Ar 1	m		af-ag	p	sar	sg	m	inter	m	arg	
TB-05A	3Ar 1	b/m	0,05-0,8	amf-ag	p	san	sg	n	inter/intra	p	ferr/arg	est
TB-05B	3Ar 1	m/r	0,09-0,8	am	p/f	sar	sg/sc	n	inter	m	ferr/sill	est
TB-07	3Ar 1	m	0,15-2,5	am	f(p)	san	sc	fr	inter	m	ferr/arg	
IT-06	3Ar 1	r	0.05-0.9	am	f	san	sc	fr	inter	p	ferr/arg	
MT01-08	3Ar 2	r	0,2-15	amg	f	na	sg/sc	f	inter	m	arg/ferr	bandas de ferr
MT06-07	3Ar 2	r	0,18-2,4	am	f	sar	sg	f	intra/inter	p	arg	
MT01-43	3Ar 2	r	0,047-1,4	am	f	sar	sm	f	inter	e	ferr	
MT01-24	3Ar 2	r	0,06-2,6	am	p(f)	sar	sg/sm	f	inter	e	ferr	

MT01-16	3Ar 2	r	0,13-4,3	amg	f	sar	sg	f	inter	m	arg	
IT-08	3Ar 2	r	0.05-3.6	am	f	sar	sg	f	inter	m	ferr/arg	bandas de ferr
MT07-09	2Ar 1	m	0,1-1,37	ag	f p	sar	sg	f	inter	m	arg/ferr	
MT03-18	2Ar 1	m	0,16-1,6	ag	p	sar	sm	f	inter	e	ferr/arg	bandas de ferr
MT03-26	2Ar 1	m	0,15-2,1	ag	f	sar	sg	f	inter	m	arg/ferr	
MT07-22	2Ar 1	b	0,15-1,4	am	p(f)	sar	sg	f	inter	p	ferr	
MT07-50	2Ar 1	b	0,08-1,8	am	p®	sar	sg	n	inter	m	arg	
MT13-47	2Ar 1	b	0,06-0,6	af	p e reto	san	sg/sm	n	inter	m	arg	
MT13-27	2Ar 1	m	0,11-0,5	af	f(p)	san	sg	m	inter	p	arg/ferr	
MT05-52	2Ar 1	r	0,18-2,0	am	sar	san	sg	n	inter e intra	m	arg/ferr	
MT05-19	2Ar 1	n	0,14-0,7	af	f	san	sc	f	inter	p	arg/ferr	bandas de ferr
TB-06	2Ar 1	b/m	0,04-0,5	af-am	p(r)	san	sg	m	inter/intra	m	arg	
MT07-38	2Ar 1	m	0,1-0,78	ag	f (p)	san	sg	muito f	inter	p	arg	
MT13-38	2Ar 1	m	0,8-1,6	amg	p (f)	san	sg	m	inter/intra	m	sil/ferr	
MT03-15	2Ar 1	r	0,1-0,7	ag	f(p)	san	sg	fr	inter	m	arg	
TB-12	2Ar 1	m	0.6-1.2	am	f	san	sg	fr	inter/intra	p	arg	
MT07-34	2Ar 2	r	0,1-2,3	amg	p	sar	sg	fr	intra	p	arg	
MT13-21	2Ar 2	r	0,18-5,7	amg	p	sar	sg/sm	m	inter/intra	m	arg/ferr	
MT07-17	2Ar 2	r	0,2-2,4	ag	f	sar	sg/sc	f	intra	e	arg	
TB-14	2Ar 2	r	0.15-2.7	ag	f	SAR	sg	fr	inter/intra	m	arg	
MT03-44	2Ar 3	m	0,1-2,7	amg	p e reto	sar	sg/sc	m	inter	m	arg	

MT07-60	2Ar 3	m	0,12-3,4	amg	p	sar	sg	n	inter	m	arg	
MT05-20	2Ar 3	r	0,2-3,1	amg	p	san	sg/sc	f	inter/intra	f	ferr/arg	bandas de ferr
TB-08A	2Ar 3	r	0,1-3	ag	f(p)	sar	sg	fr	intra	e	ferr	fratura
TB-08B	2Ar 3	r							inter/intra			
TB-09	2Ar 3	r							inter/intra			
IT-02	2Ar 3	r			f	san	sg	fr	intra/inter	p	ferr	bandada ferr
IT-03	2Ar 3	r			f	san	sg	fr	inter/intra	p	ferr/arg	
IT-04	2Ar 3	r			f	san	sg/sc	fr	inter	m	ferr/arg	
IT-05	2Ar 3	r			p(f)	san	sg	fr	inter	p	ferr/arg	

ANEXO 6

BANCO DE DADOS CIMENTAÇÃO *VERSUS* PROFUNDIDADE

Amostra	Cimentação Total (%)	FÁCIE Estratigráfica
MT06-05	20.5	3Ar1
MT01-05	29.85	3Ar1
MT06-07	13.5	3Ar2
MT01-08	20.5	3Ar2
MT01-16	8.5	3Ar2
MT17-18	9.5	3Ar1
MT01-19	17.5	3Ar1
MT01-24	22	3Ar2
MT01-43	14	3Ar2
MT03-05	24.5	2Ar3
MT07-09	17.91	2Ar1
MT03-15	15	2Ar1
MT07-17	5	2Ar2
MT03-18	24.5	2Ar1
MT05-19	32.5	2Ar1
MT05-20	17	2Ar3
MT13-21	14.5	2Ar2
MT07-22	3.5	2Ar1
MT03-26	24.25	2Ar1
MT13-27	24.5	2Ar1
MT07-34	8	2Ar2
MT07-38	12.5	2Ar1
MT13-38	4	2Ar1
MT03-44	17.5	2Ar3
MT08-45	0	2Ar3
MT13-47	20	2Ar1
MT07-50	15	2Ar1
MT05-52	9	2Ar1
MT07-60	5	2Ar3

ANEXO 6

**BANCO DE DADOS POROSIDADE
VERSUS PROFUNDIDADE**

Amostra	Porosidade Total(%)	FÁCIE Estratigráfica
MT06-05	13.5	3Ar1
MT01-05	23	3Ar1
MT06-07	25.5	3Ar2
MT01-08	21	3Ar2
MT01-16	24.5	3Ar2
MT17-18	20	3Ar1
MT01-19	14	3Ar1
MT01-24	12.5	3Ar2
MT01-43	25	3Ar2
MT03-05	13	2Ar3
MT07-09	18.5	2Ar1
MT03-15	24	2Ar1
MT07-17	32.5	2Ar2
MT03-18	17	2Ar1
MT05-19	18.5	2Ar1
MT05-20	16	2Ar3
MT13-21	17.5	2Ar2
MT07-22	14.5	2Ar1
MT03-26	15.5	2Ar1
MT13-27	15	2Ar1
MT07-34	29.5	2Ar2
MT07-38	26	2Ar1
MT13-38	23	2Ar1
MT03-44	16	2Ar3
MT08-45	16	2Ar3
MT13-47	18	2Ar1
MT07-50	8	2Ar1
MT05-52	18	2Ar1
MT07-60	11.5	2Ar3