

Universidade Federal de São Paulo
Instituto do Mar
Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar

Rodrigo Mercante



INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE ANÁLOGOS DE
RESERVATÓRIOS FLUVIAIS NOS ARENITOS DA FORMAÇÃO
JAICÓS – BORDA LESTE DA BACIA DO PARNAÍBA (CEARÁ).

Santos
2022

Rodrigo Mercante

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE ANÁLOGOS DE
RESERVATÓRIOS FLUVIAIS NOS ARENITOS DA FORMAÇÃO
JAICÓS – BORDA LESTE DA BACIA DO PARNAÍBA (CEARÁ).

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à Universidade
Federal de São Paulo - Campus
Baixada Santista como parte dos
requisitos para a obtenção do título
de Bacharel Interdisciplinar em
Ciência e Tecnologia do Mar.

Orientador (a):

Prof^ª. Dr^ª. Liliane Janikian Paes de Almeida

Santos

2022

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada por sistema automatizado
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M553ii Mercante, Rodrigo.
INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE ANÁLOGOS DE RESERVATÓRIOS
FLUVIAIS NOS ARENITOS DA FORMAÇÃO JAICÓS - BORDA
LESTE DA BACIA DO PARNAÍBA (CEARÁ).. / Rodrigo
Mercante; Orientadora LILIANE JANIKIAN PAES DE
ALMEIDA ALMEIDA; Coorientador . -- Santos, 2022.
87 p. ; 30cm

TCC (Graduação - Bacharelado Interdisciplinar em
Ciência e Tecnologia do Mar) -- Instituto do Mar,
Universidade Federal de São Paulo, 2022.

1. Análogos de reservatórios. 2. Arenitos
siliciclásticos. 3. Texturas sedimentares. 4.
porosidade. I. ALMEIDA, LILIANE JANIKIAN PAES DE
ALMEIDA, Orient. II. Título.

CDD 551.46

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os meus familiares, amigos e professores que me acompanharam em todos os momentos da minha graduação. Reconheço o valor de todos os ensinamentos que me foram passados durante minha trajetória e deixo a minha homenagem.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela sabedoria, força e convicção para completar mais uma tarefa que me foi designada. Agradeço a Deus por me guiar através de todos os obstáculos e por todos os sinais fornecidos no decorrer do meu caminho.

Agradeço ao meu pai e a minha mãe por todos os ensinamentos e por me demonstrarem o verdadeiro significado da palavra amor. Tenho plena certeza de que nada disso seria possível sem a presença deles junto de mim.

Agradeço a minha amiga e colega de classe, Stella Garcia Vaz, por todas as palavras de incentivo destinadas a mim durante esse longo período de graduação e pelo auxílio fornecido nos momentos mais difíceis.

Agradeço a minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Liliane Janikian Paes de Almeida, por toda paciência e tempo dedicado a compartilhar os seus conhecimentos durante esse longo período de preparação.

Agradeço a todos os meus amigos e familiares por fazerem parte da minha história.

ΕΠΙΓΡΑΦΕ

“What we know is a drop, what we don't know is an ocean.”

– Isaac Newton

RESUMO

Nas últimas décadas, a busca contínua por reservatórios de recursos energéticos não-renováveis como Petróleo, Carvão Mineral e Gás natural instituiu-se como grande responsável pelo direcionamento do arcabouço econômico, científico e tecnológico ao estudo das bacias sedimentares, culminando de maneira direta para o avanço expressivo da Sedimentologia. Nesta perspectiva, o aprimoramento das técnicas analíticas e metodologias permitem uma descrição mais acurada a respeito das características físico-químicas das rochas que compõem o sistema petrolífero (além da disposição geomorfológica destas rochas nas bacias sedimentares em que estão inseridas), aliado a um melhor entendimento da influência dos processos de intemperismo, erosão, transporte, deposição e diagênese sobre as tipologias rochosas geradas. Desta forma, por intermédio da consulta bibliográfica e de pesquisas previamente conduzidas em sistemas deposicionais, o trabalho em questão fornece uma abordagem detalhada sobre o estudo de análogos de reservatórios fluviais nos arenitos siliciclásticos, tendo como exemplo os arenitos da Formação Jaicós, localizado na borda leste da Bacia do Parnaíba (CE). Para isso, propõe-se a implementação da análise microscópica para identificação de aspectos texturais (e.g. seleção granulométrica, grau de arredondamento, esfericidade, tamanho dos grãos) das rochas siliciclásticas que compõem a unidade na localidade de São Benedito, associado à aferição da porosidade e das fácies sedimentares. Ademais, a confecção de um método comparativo e da análise integrada entre os dados de microescala e o de fácies sedimentares podem fornecer pistas sobre as características físico-químicas e petrofísicas de reservatórios sedimentares fluviais formados em condições análogas ao afloramento estudado.

Palavras-chave: análogos de reservatório, arenitos siliciclásticos, texturas sedimentares, porosidade.

ABSTRACT

In the last decades, the continuous search for reservoirs of non-renewable energy resources such as Oil, Mineral Coal and Natural Gas is established as largely responsible for directing the economic, scientific and technological framework for the study of sedimentary basins, culminating directly in the significant advance of sedimentology. In this perspective, the improvement of techniques and methodologies allows for a more accurate description of the physicochemical characteristics and the geological arrangement of sedimentary basins, combined with a better understanding of the influence of weathering, erosion, transportation, deposition and diagenesis on the typologies of rocks generated in the basin. In this way, through bibliographical references and research previously conducted in depositional systems, the work in question provides a detailed approach on the study of river reservoir analogues of siliciclastic sandstones of the Jaicós Formation, located in the east edge of Parnaíba Basin (CE). For this, it is proposed the microscopic analysis to the identification of textural aspects (e.g. sorting, roundness, sphericity, size of the grains) of the siliciclastic rocks that integrate the basin, associated with the measurement of porosity and sedimentary facies. Furthermore, the application of a comparative method and integrated analysis between the microscale and sedimentary facies data can provide clues about the physicochemical and petrophysical properties of fluvial reservoirs formed under analogues conditions to the outcrop studied in this work.

Key words: reservoir analogues, siliciclastic sandstones, sedimentary textures, porosity.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. A sedimentologia como campo de aplicação do conhecimento provenientes de outras áreas da ciência..... | 19 |
| Figura 2. O ciclo das rochas | 20 |
| Figura 3. A relação entre o tectonismo e a erosão das rochas soerguidas (rocha matriz). | 21 |
| Figura 4. Esfoliações em rochas graníticas na estrada Coquihalla, Canadá..... | 22 |
| Figura 5. Rochas formadas por óxidos de ferro do Monument Valley, Arizona (EUA). | 23 |
| Figura 6. Descrição dos estágios sedimentares do ciclo das rochas.... | 25 |
| Figura 7. Formação ferrosa disposta em camadas, Dales Gorge. (Australia). | 27 |
| Figura 8. Classificação de rochas sedimentares de acordo com a composição de seus grãos..... | 28 |
| Figura 9. Classificação das rochas sedimentares de acordo com Folk (1968). T = Rochas terrígenas; A = Rochas Aloquímica; Al = Rochas Aloquímicas Impuras; O = Rochas Ortoquímicas; Ol = Rochas Ortoquímicas Impuras | 29 |
| Figura 10. Grãos de Quartzo em microscópio petrográfico..... | 30 |
| Figura 11. Classificação dos sedimentos de acordo com a sua granulometria. | 31 |
| Figura 12. Arenito (Parte superior) apoiado sobre camadas de silte, argila e conglomerados..... | 32 |
| Figura 13. Montanhas de areia formadas a partir de processos eólicos. | 33 |
| Figura 14. Grãos na fração areia associados ao espaço poroso (em azul) em lâmina delgada. | 35 |
| Figura 15. Boa seleção granulométrica entre os grãos, no qual os clastos apresentam tamanhos semelhantes entre si..... | 37 |
| Figura 16. Classificação do grau de arredondamento e esfericidade dos grãos. | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 17. Descrição da influência da orientação das partículas para a percolação de fluidos de reservatório..... | 38 |
| Figura 18. Maturidade Textural em Arenitos a partir de critérios granulométricos, morfológicos e mineralógicos..... | 39 |
| Figura 19. Maturidade Mineralógica em arenitos..... | 39 |
| Figura 20. A influência dos processos pós-deposicionais nas características de reservatórios areníticos..... | 40 |
| Figura 21. Empacotamento cúbico (a), ortorrômbico (b) e romboédrico (c). | 41 |
| Figura 22. Relação entre as tipologias de contato em partículas silicilásticas e a porosidade..... | 42 |
| Figura 23. Tipos de ambientes deposicionais..... | 43 |
| Figura 24. A zonas climáticas do planeta..... | 44 |
| Figura 25. A estruturação de ambientes de sedimentação a partir da combinação de fatores múltiplos..... | 45 |
| Figura 26. (1) A fase de juventude está situada na cabeceira do rio, no qual predominam os processos de erosão. (2) A fase de maturidade situa-se na porção intermediária do vale fluvial, denotado pelo relativo equilíbrio entre os processos de erosão e deposição..... | 46 |
| Figura 27. Extensão do rio Parnaíba..... | 47 |
| Figura 28. Representação do Grupo Serra Grande em associação com as áreas estudadas (IPR) por Janikian et al (2019). | 48 |
| Figura 29. Microscópio Petrográfico Leica DM750P (Instituto de Geociências - USP)..... | 51 |
| Figura 30. Imagem microscópica de lâmina delgada, na qual identificam-se os elementos detríticos e os espaço porosos (em azul)..... | 52 |
| Figura 31. Disposição dos componentes RGB e HSI..... | 53 |
| Figura 32. Segmentação de imagem digital através da identificação de componentes ópticos ((Software Leica Application Suite)..... | 53 |
| Figura 33. Exemplo da planilha excel obtida através da quantificação do espaço poroso no software LAS..... | 54 |
| Figura 34. Porção do código utilizado para a confecção da análise estatística..... | 55 |
| Figura 35. Quadro utilizado para avaliação da seleção granulométrica | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 36. Quadro utilizado para a análise do grau de arredondamento e esfericidade | 57 |
| Figura 37. Formação Jaicós, ladeira da lapa (CE)..... | 60 |
| Figura 38. Pontos de porosidade secundária na amostra SG-III-2. O formato e a presença de grãos ao redor do espaço poroso sugerem a dissolução a partir da percolação de fluidos sobre a organização dos grãos. | 62 |
| Figura 39. Regiões de porosidade secundária presentes na amostra SG-III-9. A má seleção granulométrica é apresentada como um fator para a diminuição do espaço poroso aferido na amostra. | 63 |
| Figura 40. O empacotamento moderado entre os grãos sugere a formação de porosidades secundárias a partir de um alívio de pressão sobre as partículas presentes na amostra. | 64 |
| Figura 41. Pontos de porosidade isolados podem sugerir dissolução de clastos que anteriormente preenchem o espaço vazio..... | 64 |
| Figura 42. Região onde se identifica o crescimento de cimento entre os grãos da amostra SG-III-15, o que certamente influenciou sobre a proporção do espaço poroso aferido..... | 65 |
| Figura 43. Rastro direcional de porosidade aferido da lâmina pode indicar um fraturamento pós-deposicional. | 66 |
| Figura 44. Porosidades secundárias associadas a dissolução parcial e total na amostra SG-III-16. | 66 |
| Figura 45. Compilação dos boxplots de porosidade obtidos para cada amostra. | 67 |
| Figura 46. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-12. | 68 |
| Figura 47. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-2. ... | 68 |
| Figura 48. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-9. ... | 69 |
| Figura 49. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-13. | 69 |
| Figura 50. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-15. | 70 |
| Figura 51. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-16. | 70 |
| Figura 52. Bootstrap conduzido para a amostra SG-III-2..... | 71 |
| Figura 53. Bootstrap conduzido para a amostra SG-III-2 (Avaliação do Desvio Padrão)..... | 72 |
| Figura 54. Porção da lâmina SG-III-2 fotografada durante a análise textural, no qual é possível identificar os aspectos descritos. | 74 |

Figura 55. Clasto de maior granulometria (fração de grânulos), identificado na lâmina SG-III-9, conforme descrito na análise mesoscópica demonstrando uma má seleção granulométrica no arcabouço (Esquerda), em conjunto com uma predominância de grãos alongados (Direita) e não esféricos.

..... 75

Figura 56. Porção fotografada da lâmina SG-III-12, denotando a presença de grãos alongados de maior granulometria (Pobrememente selecionados). 76

Figura 57. Áreas fotografada da amostra SG-III-13, demonstrando uma má seleção granulométrica entre os grãos, associado a presença de clastos alongados e subangulosos..... 76

Figura 58. Área fotografada da lâmina SG-III-15, no qual é possível identificar clastos subarredondados e esféricos..... 77

Figura 59. Foto obtida a partir da lâmina SG-III-16, demonstrando o predomínio de clastos subangulosos e alongados sobre o arcabouço. Também é possível identificar uma moderada seleção granulométrica entre os grãos. . 78

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Reações de Intemperismo Químico | 24 |
| Tabela 2. Exemplos de Intemperismo Biológico..... | 24 |
| Tabela 3. Principais fatores associados a origem das rochas sedimentares..... | 26 |
| Tabela 4. Descrição interpretativa das fácies e elementos arquiteturais presentes nas unidades do Grupo Serra Grande que afloram na borda leste da Bacia do Parnaíba)..... | 49 |
| Tabela 5. Relação do número de fotos obtidas para cada lâmina..... | 54 |
| Tabela 6. Tipologias de porosidade | 58 |
| Tabela 7. Classificação de porosidade descrita por Murray (1960)..... | 59 |
| Tabela 8. Dados das amostras da Formação Jaicós (São Benedito, CE). Em destaque as amostras analisadas..... | 61 |
| Tabela 9. Informações descritivas sobre as amostras analisadas. | 81 |

Sumário

| | | |
|---------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2. | OBJETIVOS..... | 17 |
| 2.1. | Objetivos Gerais..... | 17 |
| 2.2. | Objetivos Específicos | 17 |
| 3. | DESENVOLVIMENTO | 18 |
| 3.1 | GENERALIDADES E DEFINIÇÕES INICIAIS | 18 |
| 3.2 | PRINCÍPIOS DE SEDIMENTOLOGIA | 19 |
| 3.2.1 | A origem e formação dos sedimentos siliciclásticos | 19 |
| 3.2.2 | Tipos de Intemperismo | 21 |
| 3.2.3 | Rochas Sedimentares..... | 25 |
| 3.2.3.1 | Rochas Terrígenas | 29 |
| 3.2.3.2 | A análise de arenitos e parâmetros petrofísicos | 32 |
| 3.2.3.3 | Aspectos Texturais em arenitos..... | 36 |
| 3.3 | AMBIENTES DEPOSICIONAIS CONTINENTAIS E O ESTUDO DE FÁCIES SEDIMENTARES | 42 |
| 3.3.1 | Ambientes deposicionais continentais | 44 |
| 3.3.2 | Ambientes fluviais e análise descritiva do afloramento estudado . | 46 |
| 4. | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 50 |
| 4.1 | ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL PARA AVALIAÇÃO DA POROSIDADE EM LÂMINAS DELGADAS | 50 |
| 4.2 | ANÁLISE ESTATÍSTICA DA POROSIDADE COM O USO DA LINGUAGEM PYTHON | 55 |
| 4.3 | ANÁLISE TEXTURAL EM ARENITOS | 56 |
| 4.4 | ANÁLISE DAS TIPOLOGIAS DE POROSIDADE | 58 |
| 5. | RESULTADOS | 60 |
| 5.1. | Caracterização descritiva dos arenitos da Formação Jaicós na localidade de São Benedito (Bacia do Parnaíba, Ceará) | 60 |

| | |
|--|----|
| 5.1. a) Análise das Fácies Sedimentares..... | 60 |
| 5.1.b) Análise das tipologias de porosidade | 62 |
| 5.1.c) Análise do Volume de Poro | 67 |
| 5.1.d) Análise Textural..... | 72 |
| 6. DISCUSSÃO..... | 79 |
| 6.1 A IMPORTÂNCIA DA PERSPECTIVA HOLÍSTICA SOBRE O ESTUDO DE ANÁLOGOS DE RESERVATÓRIO | 79 |
| 6.2 DEBILIDADES ASSOCIADAS AO ESTUDO DE PARÂMETROS PETROFÍSICOS ATRAVÉS DE ANÁLISE MICROSCÓPICA | 79 |
| 6.3 AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES TEXTURAIS E PETROFÍSICAS EM ARENITOS..... | 80 |
| 6.4 RELAÇÕES ESTABELECIDAS ENTRE A TIPOLOGIAS DE POROSIDADE, ASPECTOS TEXTURAIS E VOLUME DE POROS..... | 81 |
| 7. CONCLUSÃO | 84 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 86 |

1. INTRODUÇÃO

Inserido em um modelo socioeconômico globalizado, estudos preliminares demonstram que o aumento expressivo da demanda energética associada aos combustíveis fósseis é caracterizado como uma tendência mundial (Santos et al., 2013). Neste cenário, esforços provenientes da estrutura técnico-científica e uma parcela significativa de ativos financeiros, humanos e tecnológicos vêm sendo direcionados ao estudo analítico de bacias sedimentares, definindo-se como objetivo primordial, o mapeamento de novos reservatórios de petróleo e gás. Em função dos avanços tecnológicos e do aprimoramento das metodologias de pesquisa, a análise dos aspectos geomorfológicos, caracterização físico-química e identificação de propriedades texturais configuram-se como tarefas de grande viabilidade para o estudo analítico dos depósitos sedimentares. Apesar da grande complexidade instituída aos processos aplicados, o aumento da acurácia para a identificação de propriedades físicas que favoreçam a estruturação de reservatórios de petróleo ou água pode ser obtido através da integração das escalas observacionais de micro, meso e macroescala, bem como da apropriação adequada de métodos diretos e indiretos (Miall, 2000).

Instituído como um método analítico, a modelagem de sistemas deposicionais para identificação de reservatórios conta com a colaboração de equipes interdisciplinares, visando otimizar de maneira quantitativa e qualitativa a etapa de aquisição de dados, além de melhorar a perspectiva de interpretação das informações obtidas (Miall, 1990 & 2000). Deste modo, por intermédio da confecção de uma análise multidisciplinar, é possível agregar de maneira determinante as principais hierarquias observacionais associadas à caracterização de bacias sedimentares, com o intuito de diminuir os riscos relacionados à montagem das estruturas de operações (e.g. Plataformas, FPSOs) e incrementar a perspectiva de produção dos campos petrolíferos (Rodrigues, 2018).

Fundamentado pela metodologia científica, o estudo de análogos de reservatório busca identificar e descrever as propriedades físico-químicas que

favoreçam os aspectos de permeabilidade e porosidade do depósito sedimentar. Aplicado ao contexto, o entendimento da influência dos processos de intemperismo, erosão, transporte, deposição, compactação e diagênese também se constitui como uma ferramenta essencial para a descrição das propriedades físicas de reservatórios, dado que influenciam diretamente na organização espacial dos espaços porosos e na permeabilidade. Deste modo, apropriando-se de um referencial teórico bem consolidado, o presente trabalho utilizou-se da análise microscópica para qualificar os arenitos siliciclásticos da Formação Jaicós - situado na borda leste da Bacia do Parnaíba (CE) – e compreender as propriedades geológicas que podem estar presentes em um reservatório siliciclástico formado em um ambiente fluvial. Ao integrarmos de modo comparativo os dados provenientes da análise petrográfica aos dados de fácies sedimentares obtidos em campo, é possível designar as características que possam compor a estrutura de um reservatório estruturado em condições análogas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Por intermédio da análise microscópica, aplicado em amostras coletadas em um aflorado gerado em sistemas fluviais, busca-se identificar e descrever os aspectos texturais dos arenitos siliciclásticos que integram a Formação Jaicós, na Bacia do Parnaíba. Além disso, tem-se por objetivo pontuar a influência dos processos pré e pós-deposicionais sobre os aspectos de porosidade da rocha gerada.

2.2. Objetivos Específicos

Em concordância ao escopo estabelecido, denotam-se os seguintes objetivos particulares:

- A.** Revisão bibliográfica a respeito das principais associações de fácies sedimentares características sistemas deposicionais fluviais
- B.** Determinação da porosidade por intermédio da análise de imagens digitais sobre seções delgadas;
- C.** Caracterização textural das principais fácies sedimentares que compõem um afloramento da Formação Jaicós na borda leste da

Bacia do Parnaíba, no intuito de caracterizar as heterogeneidades que podem influenciar os parâmetros de porosidade;

- D. Integração das análises confeccionadas nas perspectivas de micro e mesoescala (dados de fácies) para a elaboração do diagnóstico interpretativo;
- E. Identificação de debilidades metodológicas associadas ao estudo de parâmetros petrofísicos através da análise microscópica

3. DESENVOLVIMENTO

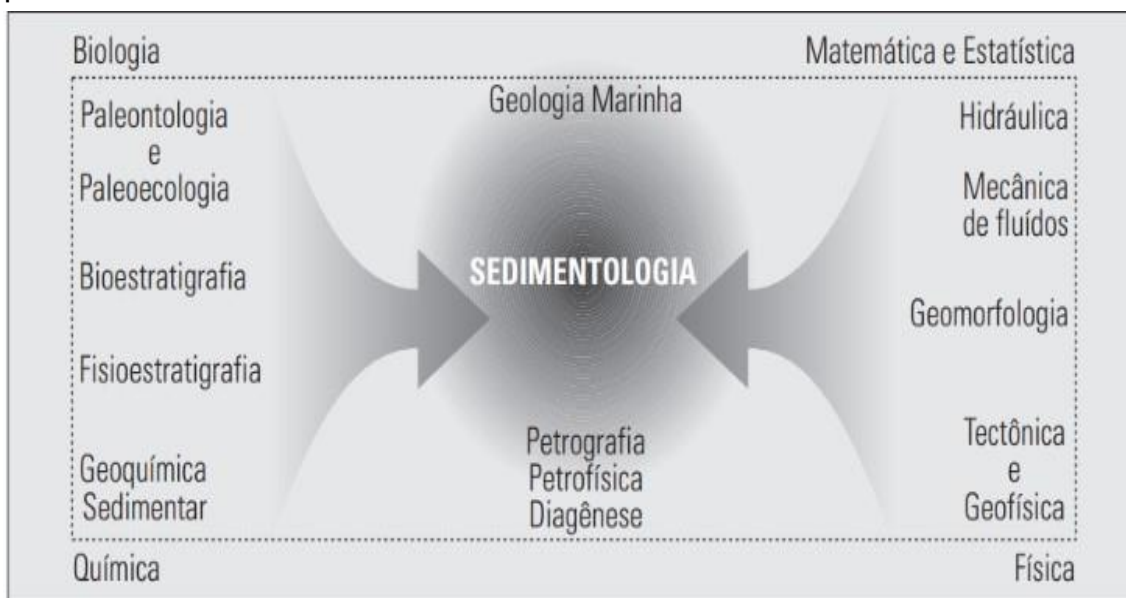
3.1 GENERALIDADES E DEFINIÇÕES INICIAIS

Caracterizado pelo seu dinamismo e complexidade, o planeta terra é visto como uma localidade singular em nosso sistema solar. Até o presente momento, nenhum planeta conhecido apresenta as condições físico-químicas e atmosféricas adequadas para a manutenção da vida como conhecemos. Inserida dentro do conjunto de ciências dedicadas ao estudo da estrutura e dinâmica do planeta, a Geologia instituiu-se como a ciência incumbida de investigar informações a respeito da origem, evolução e das transformações do sistema terra no decorrer do tempo geológico, além de atuar na descrição de elementos estruturais, biológicos, físicos e químicos que integram a litosfera (Popp, 2017).

Em progressão, a Sedimentologia (ou Geologia Sedimentar) emerge como um ramo das geociências incumbido da análise metodológica dos caracteres referentes à origem, estrutura elementar e formação das bacias sedimentares (Suguio, 2003). O avanço da sedimentologia é resultado direto da busca incessante por reservatórios de petróleo e gás, sendo impulsionado diretamente por motivações econômicas. Na atualidade, as bacias sedimentares apresentam-se como objeto de estudo de inúmeros profissionais atuantes no mercado corporativo (e.g. engenheiros, estatísticos, geólogos, físicos, químicos, geofísicos, geoquímicos). Baseado nesta premissa, compreende-se a incorporação da interdisciplinaridade como uma tendência de grande destaque no mercado, sendo a sedimentologia um campo de pesquisa ideal para a aplicação e fortalecimento de conceitos básicos associados a outras áreas da ciência contemporânea (Suguio, 2003). Ao incorporar fundamentos conceituais

provenientes de outros campos científicos (Figura 1), este ramo passa a aumentar a eficiência de suas análises e consolidar suas metodologias, contribuindo diretamente para o incremento da confiabilidade de suas inferências a respeito de seus objetos de estudo.

Figura 1. A sedimentologia como campo de aplicação do conhecimento provenientes de outras áreas da ciência.



Fonte: Extraído de Suguio (2003).

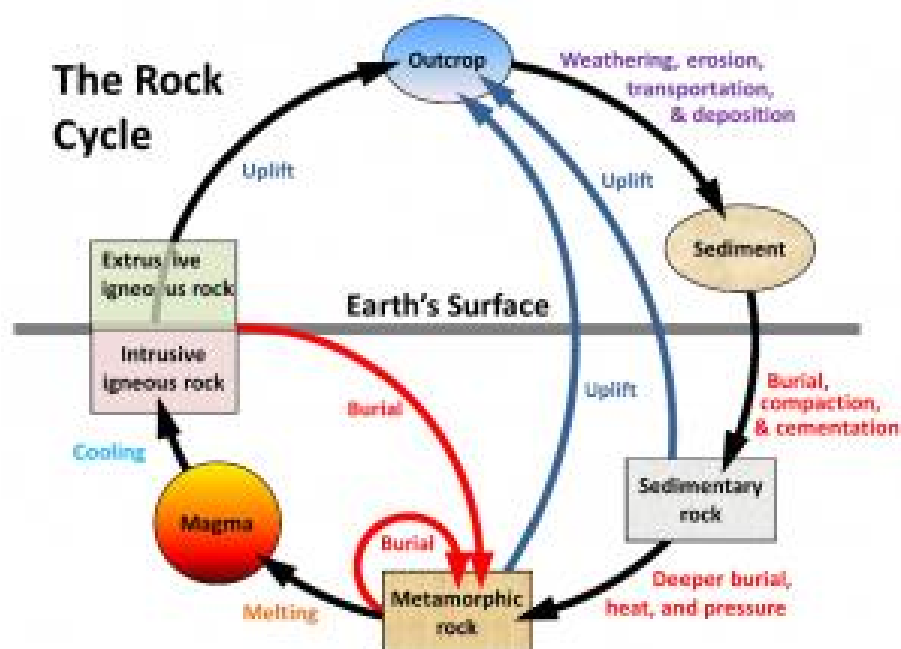
3.2 PRINCÍPIOS DE SEDIMENTOLOGIA

3.2.1 A origem e formação dos sedimentos siliciclásticos

Instituído com um elemento essencial para a manutenção do ciclo das rochas (Figura 1), os sedimentos siliciclásticos são provenientes de localidades geográficas sobre as quais se fazem presentes a atuação dos agentes exógenos da litosfera (*e.g.* água, vento, gelo, gravidade). Como consequência direta da ação de tais agentes transformadores, as rochas inseridas nessas áreas estão constantemente submetidas ao desgaste e fragmentação no decorrer do tempo geológico (Popp, 2017). Em suma, ao conjunto de processos responsáveis pela deterioração dos elementos rochosos da litosfera denomina-se intemperismo, que pode ser de natureza química, física (mecânica) ou biológica (Suguio, 2003). Quando associado à erosão, tais processos geológicos assumem papel de

destaque na formação dos sedimentos siliciclásticos, permitindo a preservação do ciclo das rochas na superfície terrestre (Press et al., 2006).

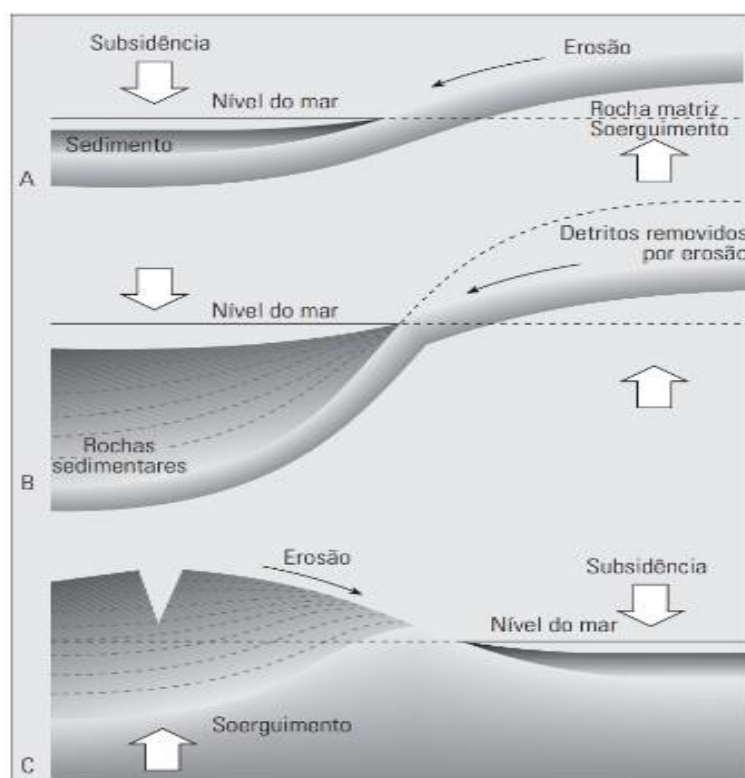
Figura 2. O ciclo das rochas



Fonte: Extraído de Earle (2015.)

Apesar de estarem separados de modo conceitual, deve-se pontuar a importância dos processos endógenos (e.g. tectonismo e vulcanismo) para a continuidade dos processos de intemperismo e erosão, pois na medida em que a movimentação das placas tectônicas força o movimento da crosta, são criadas as localidades geradoras (Área-Fonte) e receptoras de detritos (Suguio, 2003). Nas regiões soergidas (de maior elevação), o substrato rochoso estabelecido configura-se como a rocha-matriz, caracterizada por constituir a fonte dos sedimentos que serão erodidos e transportados ao sítio de deposição (bacia sedimentar). A relação entre esses eventos demonstra a importância da conectividade dos processos geológicos para a morfologia estrutural da terra (Figura 2), sobre o qual a combinação desses agentes se faz determinante para a dinamicidade característica de sua camada sólida (Litosfera).

Figura 3. A relação entre o tectonismo e a erosão das rochas soerguidas (rocha matriz).



Fonte: Extraído de Suguio (2003).

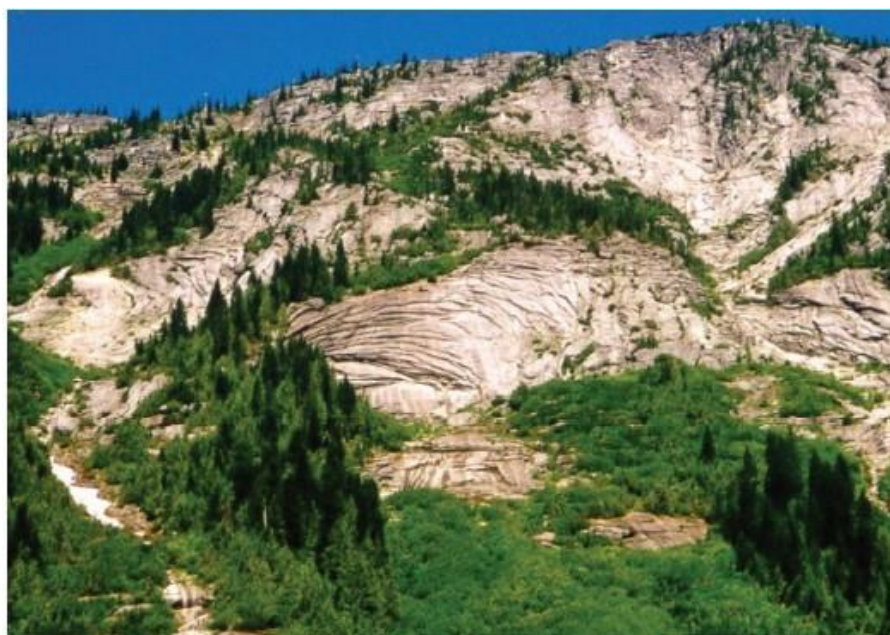
3.2.2 Tipos de Intemperismo

Fundamentado de maneira conceitual, o intemperismo constitui o agrupamento de processos naturais promotores da deterioração das rochas da superfície terrestre (Suguio, 2003). Neste contexto, deve-se pontuar que os agentes intempéricos (e.g. pluviosidade, ventos, temperatura) atuam diretamente na intersecção espacial instituída entre a litosfera e a atmosfera (Suguio, 2003). Classificados de acordo pelo modo com que os detritos são removidos da rocha-matriz, o intemperismo pode ser subdividido em três categorias principais: físico (ou mecânico), químico (ou mineralógicos) ou biológico (Dantas, 2021).

O intemperismo físico é caracterizado por não acarretar alterações químicas ou mineralógicas nos produtos desagregados da rocha-matriz, demonstrando a natureza interinamente mecânica do agente transformador. Na medida em que substrato rochoso de regiões soerguidas são submetidos a

erosão, a diminuição da força gravitacional atuante promove um alívio gradual da pressão sobre as rochas inseridas em estratos inferiores. De outro modo, a variação de temperatura decorrente da exposição à radiação solar acarreta a expansão térmica em rochas expostas na superfície, fenômeno de maior ocorrência em regiões de clima desértico – regiões designadas pela baixa pluviosidade e grande amplitude térmica. Além disso, quando a água adentra o espaço poroso ou sobre as fendas inseridas no interior do substrato, a diminuição de sua densidade em decorrência do seu congelamento pode acarretar a expansão rápida do volume das rochas, culminando na aparição de fraturas e fissuras em sua estrutura (Earle, 2015). Em conjunto, as três situações supracitadas caracterizam exemplos concretos a respeito do intemperismo mecânico (Suguio, 2003). De fato, as principais consequências atribuídas a esse tipo de processo são pontuadas pela aparição de esfoliações, fraturas e pseudoestratificações sobre a rochas expostas (Figura 4).

Figura 4. Esfoliações em rochas graníticas na estrada Coquihalla, Canadá.

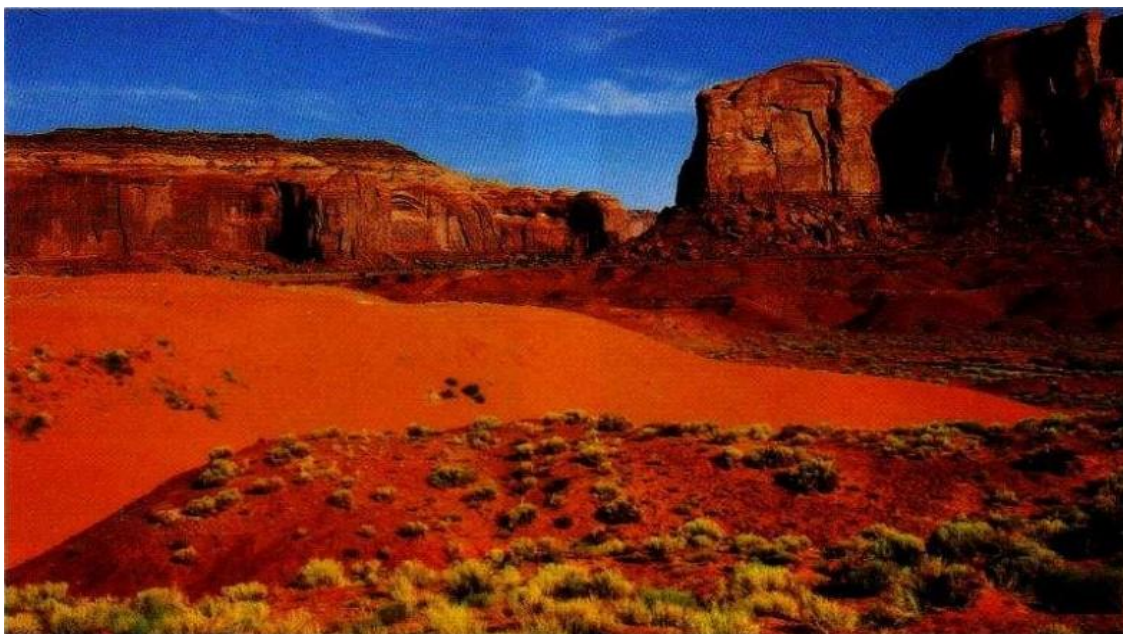


Fonte: Extraído de Earle (2015)

Em segundo plano, o intemperismo químico é caracterizado pelo ruptura do equilíbrio físico-químico entre os minerais que integram as rochas da superfície terrestre. Quando submetidas a variações nas condições de temperatura e pressão ou contatados com água e gases atmosféricos, a

instabilidade atômica do arcabouço mineralógico das rochas pode promover a formação de novos arranjos moleculares (Figura 5) e a estruturação de novos minerais (Earle, 2015). Instituída como uma molécula fundamental para as reações químicas, a água constitui o principal agente causador do intemperismo químico na superfície do planeta (Suguio, 2003).

Figura 5. Rochas formadas por óxidos de ferro do Monument Valley, Arizona



Fonte: Extraído de Press (2006).

As características dos minerais formados a partir do intemperismo químico dependem diretamente da composição da rocha-matriz, bem como das reações químicas a que foi o substrato submetido no decorrer do tempo geológico (Press, 2006). Ao tratarmos desse tipo de intemperismo, as principais reações associadas são designadas pela dissolução, oxirredução, hidratação, hidrólise e carbonatação (Tabela 1). Em um sistema dinâmico, os modelos de reação supracitados podem ocorrer de maneira concomitante nos ambientes naturais, sendo a intensidade e velocidade diretamente influenciados pelas condições climáticas.

Tabela 1. Reações de Intemperismo Químico

| REAÇÃO | TIPO |
|--|----------------------------------|
| $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ | Dissolução da Calcita |
| $2\text{FeS}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7\text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$ | Oxidação da Pirita |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3 + n\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ | Hidratação da Hematita |
| $2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (sol) + 2KHCO_3 (sol) + 4SiO_2 (sol) | Carbonatação do Feldspato |

Fonte: Adaptado de Suguio (2003).

Por fim, o *intemperismo biológico* configura-se como resultado direto da interação entre a litosfera e seus componentes bióticos. Este mecanismo pode ter natureza física (e.g. ação da cunha de raízes) ou química (e.g. atividade bacteriana) e de fato atua como um agente transformador dos ecossistemas (Suguio, 2003). Deve-se pontuar que uma grande parcela do intemperismo mineralógico sobre as rochas superficiais é resultado de atividades orgânicas, desempenhadas essencialmente por bactérias, animais, fungos e plantas.

Tabela 2. Exemplos de Intemperismo Biológico

| Intemperismo Biológico | |
|------------------------|--|
| Físico | - Ação de cunha de raízes por vegetais - Escavação de Animais (e.g. minhocas, topeiras) |
| Químico | - Liberação de ácidos húmicos por atividade bacteriana, vegetal e fúngica. |

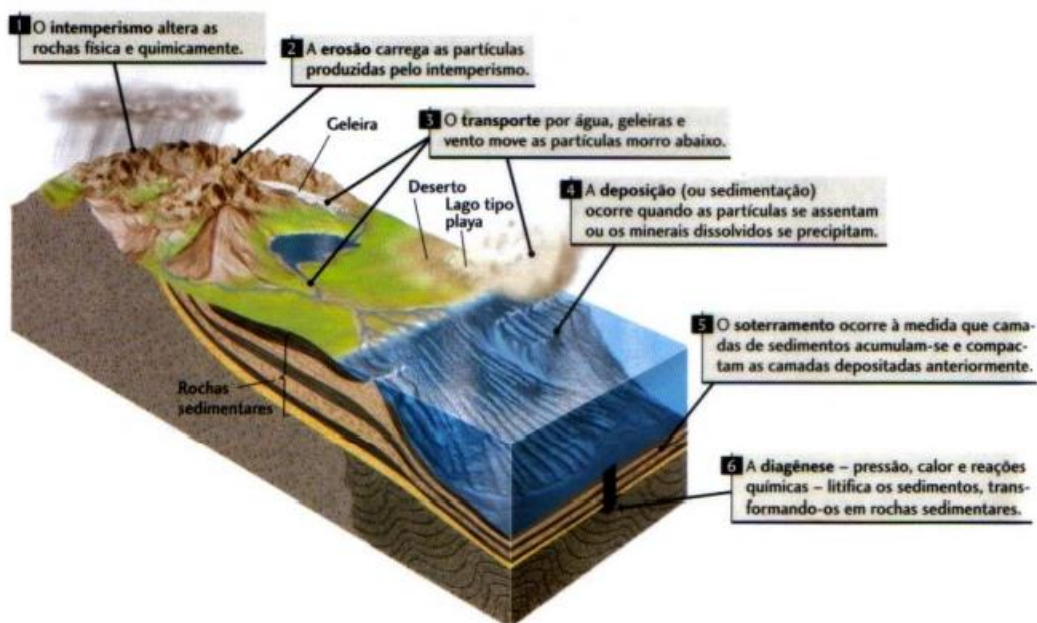
Fonte: Adaptado de Dantas (2021).

Ao conciliarmos os princípios básicos associados a origem e ao modo como o sedimento pode ser disponibilizado no ambiente, cria-se a fundamentação conceitual necessária para o estudo das etapas posteriores a que os detritos serão submetidos até a formação do arcabouço rochoso.

3.2.3 Rochas Sedimentares

Correspondendo por volta de 75% da crosta terrestre (Boogs, 2009), as rochas sedimentares apresentam-se como resultado direto da atuação dos agentes erosivos sobre as rochas expostas na superfície. Ao serem desagregados da rocha-fonte, os sedimentos serão posteriormente transportados, depositados e soterrados na bacia sedimentar. No decorrer do tempo geológico, os processos diagenéticos (e.g. alteração de pressão, temperatura, pH, Eh) instituem-se responsáveis por compactar e estruturar os aspectos físicos-químicos da rocha sedimentar. Inserido em uma perspectiva sistêmica, a sucessão dos eventos supracitados define os estágios sedimentares do ciclo das rochas (Press, 2006).

Figura 6. Descrição dos estágios sedimentares do ciclo das rochas



Fonte: Press et al (2006).

É válido pontuar que as aspectos físico-químicos que integram uma rocha sedimentar apresentam grande variação, na medida em que dependem de variáveis incumbidas na sucessão dos estágios sedimentares (e.g. intensidade do intemperismo, mineralogia da rocha fonte, forma e tempo de transporte, eventos pós-deposicionais). A complexidade instituída na formação das rochas sedimentares está diretamente associada ao local de origem dos sedimentos, além de sua conectividade com seu histórico pré-deposicional, ao ambiente de sedimentação e aos eventos pós-deposicionais ocorrentes na bacia (Suguio, 2003). A tabela 3 ilustra os principais parâmetros interligados a origem das bacias sedimentares:

Tabela 3. Principais fatores associados a origem das rochas sedimentares

| Proveniência dos sedimentos | |
|--|--|
| <i>Características da área-fonte</i> | <i>Propriedades da rocha matriz</i> |
| Fisiografia Drenagem Tectônica (soerguimento) Clima | Composição Textura Estrutura Coerência |
| História pré-deposicional | |
| <i>Características da desagregação</i> | <i>Características de erosão e transporte</i> |
| Tipo de intemperismo Grau de intemperismo | Meio de transporte (água, gelo, etc.) Estado de transporte (solução ou sólido) Tempo, distância e velocidade de transporte |
| Ambiente deposicional | |
| <i>Características da área de deposição subaérea</i> | <i>Características da área de deposição subaquosa</i> |
| Fisiografia Tectônica (subsidiência) Clima Relação ao nível hidrostático | Profundidade Condições hidrodinâmicas Temperatura Salinidade Eh e pH |
| História pós-deposicional | |
| Soterramento e processos diagenéticos Exposição ao ar, água, temperatura alta, etc. | |

Fonte: Extraído de Suguio (2006).

Destacando-se características visuais, o empilhamento de camadas (Figura 7) em decorrência do soterramento dos sedimentos na bacia é um aspecto característico em diversas rochas sedimentares. Apesar disso, sem a confecção de uma análise prévia, não se pode alegar que a presença de tal caractere está presente em todas as rochas dessa tipologia, dado que os processos pós-deposicionais (e.g. diagênese) podem minimizar ou anular esse aspecto.

Figura 7. Formação ferrosa disposta em camadas, Dales Gorge.

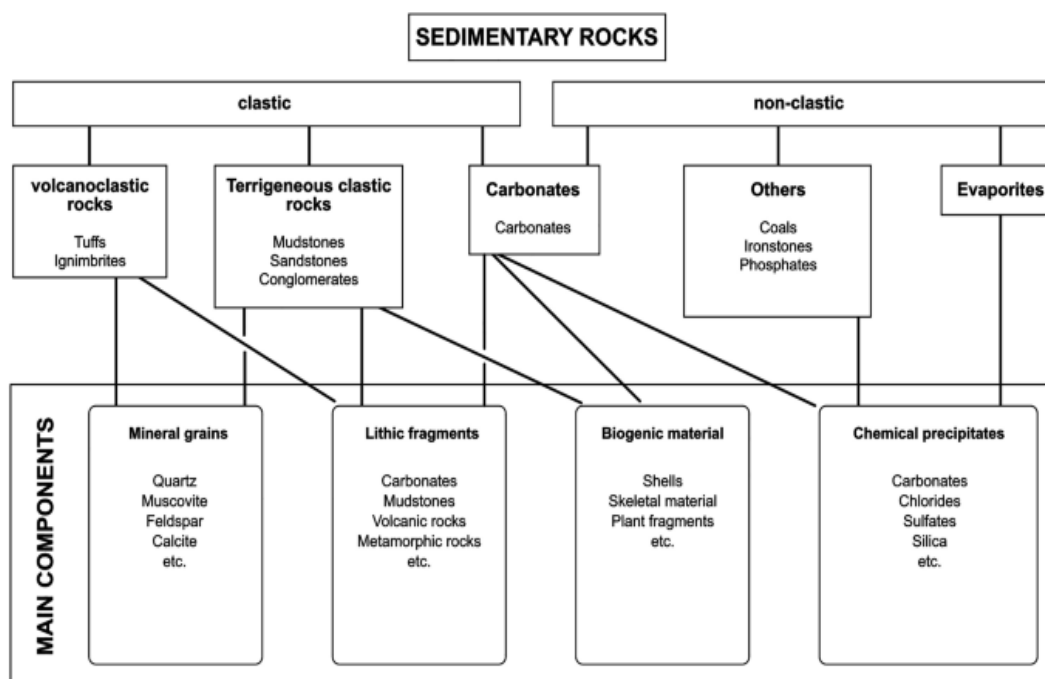


Fonte: Extraído de Earle (2015)

De acordo com a origem e a tipologia dos detritos que integram a sua estrutura, as rochas sedimentares classificam-se em três categorias principais (Boogs, 2006):

1. Rochas sedimentares siliciclásticas (ou terrígenas);
2. Rocas sedimentares químicas;
3. Rochas Sedimentares Biogênicas

Figura 8. Classificação de rochas sedimentares de acordo com a composição de seus grãos.



Fonte: Extraído de Nichols,

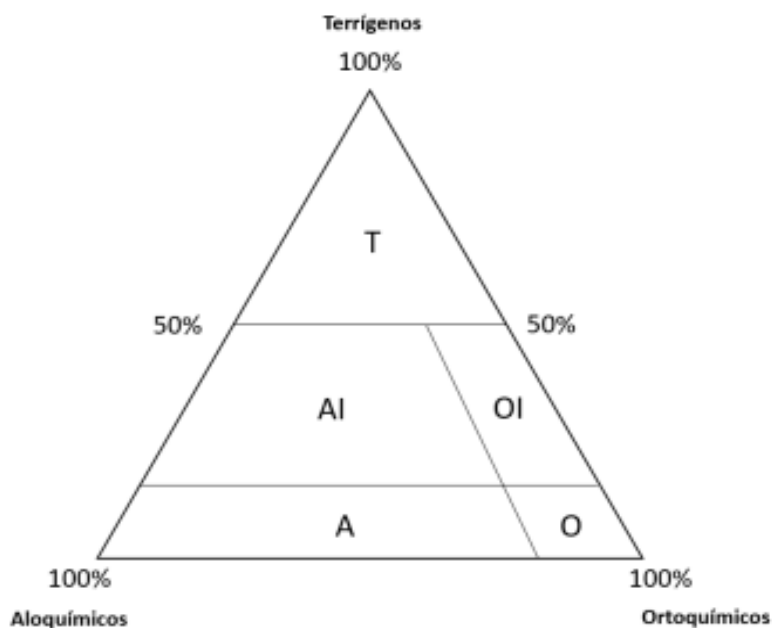
A respeito de sua composição mineralógica, os principais minerais presentes em rochas sedimentares são designados pelo quartzo, feldspato, calcita, gipsita, argilominerais e halita (Dantas, 2021). De fato, uma série de combinações desses minerais podem ser encontradas na natureza, o que influencia diretamente as particularidades físico-químicas da rocha gerada, e conseqüentemente, em sua classificação (Figura 8). A considerável variedade de produtos presentes nas rochas sedimentares e a complexidade na sua formação também abre espaço para a confecção de inúmeras formas de subdivisões. Neste contexto, Folk (1968) direciona sua classificação através da proporção relativa de 3 componentes principais, designados por:

1. *Componentes terrígenos* – Formado por fragmentos detríticos de rochas preexistentes que foram transportados e depositados na bacia sedimentar (e.g. minerais de quartzo, feldspato, mica e argilominerais)
2. *Componentes aloquímicos* - Compostos formados a partir da precipitação de substâncias químicas inseridas no interior da bacia (e.g. restos de conchas).

3. *Componentes Ortoquímicos* - Precipitados químicos formados no interior da bacia onde não se denota a ocorrência de transporte (e.g. calcita, halita, dolomita).

Assim, Folk (1968) propõe uma categorização fundamentada na proporção de cada constituinte supracitado na bacia sedimentar. A figura 9 ilustra uma pirâmide esquemática que descreve a fundamentação elaborada:

Figura 9. Classificação das rochas sedimentares de acordo com Folk (1968). T = Rochas terrígenas; A = Rochas Aloquímicas; AI = Rochas Aloquímicas Impuras; O = Rochas Ortoquímicas; OI = Rochas Ortoquímicas Impuras



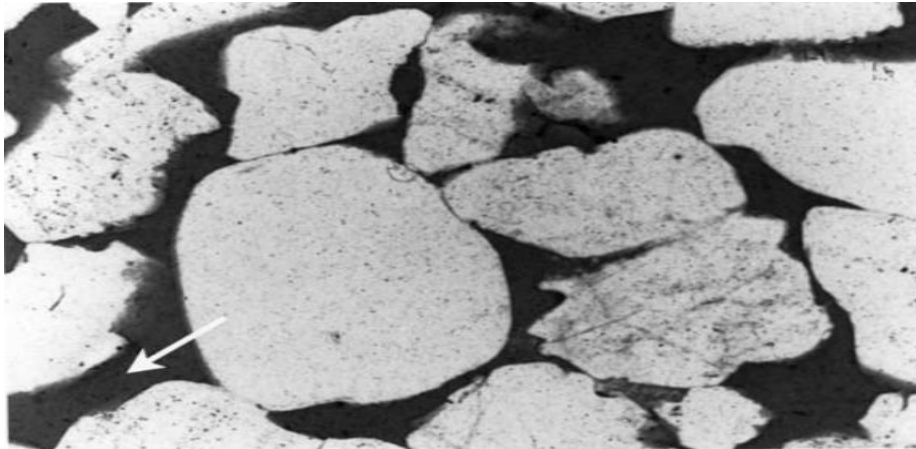
Fonte: Extraído de Dantas (2021).

3.2.3.1 Rochas Terrígenas

No contexto de classificação, as rochas terrígenas correspondem ao conjunto de rochas sedimentares formadas majoritariamente por componentes detríticos de rochas preexistentes que, ao serem submetidas a ação dos agentes erosivos, forneceram fragmentos de sua estrutura ao ambiente (Suguio, 2006). Variando em sua morfologia e granulometria, quando desagregados da rocha-fonte, os clastos fornecidos ao ambiente passam a ser transportados e soterrados no sítio de deposição. Ao tratarmos do arcabouço mineralógico, essa tipologia é formada predominantemente por grãos de quartzo em sua estrutura, em destaque para a presença de compostos de Sílica (SiO_2). Somado a isso, em função da respectiva resistência aos agentes erosivos, minerais como o

feldspato, mica (e.g. Biotita) e argilominerais (e.g. Caulinita) também se denotam comumente integrantes das rochas siliciclásticas (Boogs, 2009).

Figura 10. Grãos de Quartzo em microscópio petrográfico.



Fonte: Extraído de Boogs (2009)

Em decorrência da grande variedade de tamanho dos fragmentos que integram as rochas siliciclásticas, a categorização granulométrica fornece uma alternativa congruente para a identificação de estruturas rochosas e, por vezes, dos processos de transporte e agentes de sedimentação responsáveis pela deposição na bacia. Deste modo, as quatro principais subdivisões de rochas terrígenas, a partir do parâmetro abordado, são designados por conglomerados, arenitos, argilitos e siltitos (Dantas, 2021), sendo essa uma das classificações mais simples existentes. A faixa granulométrica (em mm) correspondente a cada classe de sedimentos é exibida na figura 11:

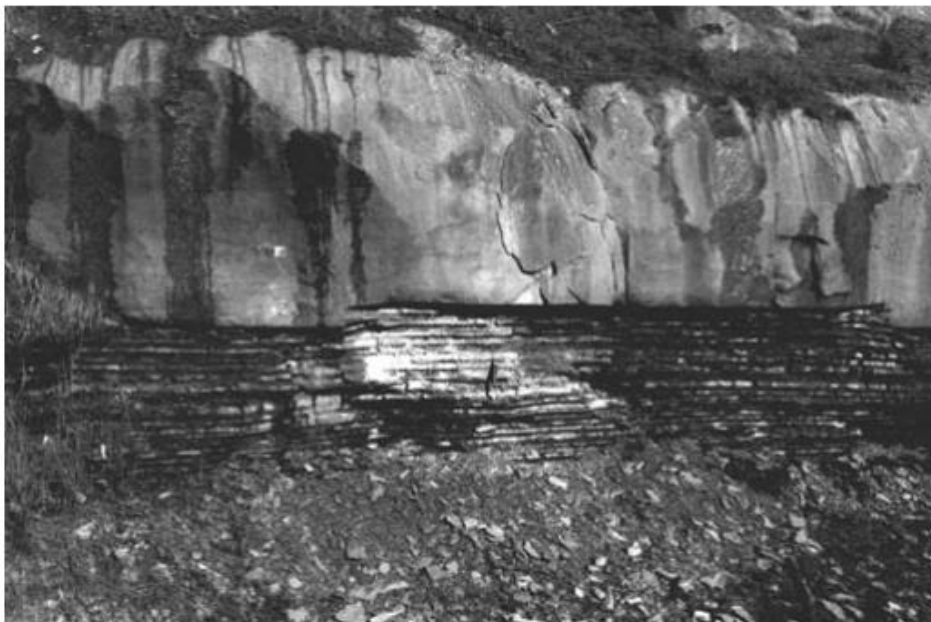
Figura 11. Classificação dos sedimentos de acordo com a sua granulometria.

| | US Standard sieve mesh | Millimeters | Phi (ϕ) units | Wentworth size class | |
|--------|---------------------------|-------------|-------------------------|----------------------|------------------|
| GRAVEL | | 4096 | -12 | | |
| | | 1024 | -10 | Boulder | |
| | | 64 | 64 | - 6 | Cobble |
| | | 16 | | - 4 | Pebble |
| | 5 | 4 | 4 | - 2 | |
| | 6 | 3.36 | | - 1.75 | |
| | 7 | 2.83 | | - 1.5 | Granule |
| | 8 | 2.38 | | - 1.25 | |
| | 10 | 2.00 | 2 | - 1.0 | |
| | 12 | 1.68 | | - 0.75 | |
| SAND | 14 | 1.41 | | - 0.5 | Very coarse sand |
| | 16 | 1.19 | | - 0.25 | |
| | 18 | 1.00 | 1 | 0.0 | |
| | 20 | 0.84 | | 0.25 | |
| | 25 | 0.71 | | 0.5 | Coarse sand |
| | 30 | 0.59 | | 0.75 | |
| | 35 | 0.50 | 1/2 | 1.0 | |
| | 40 | 0.42 | | 1.25 | |
| | 45 | 0.35 | | 1.5 | Medium sand |
| | 50 | 0.30 | | 1.75 | |
| | 60 | 0.25 | 1/4 | 2.0 | |
| | 70 | 0.210 | | 2.25 | |
| | 80 | 0.177 | | 2.5 | Fine sand |
| | 100 | 0.149 | | 2.75 | |
| | 120 | 0.125 | 1/6 | 3.0 | |
| | 140 | 0.105 | | 3.25 | |
| | 170 | 0.088 | | 3.5 | Very fine sand |
| | 200 | 0.074 | | 3.75 | |
| MUD | 230 | 0.0625 | 1/16 | 4.0 | |
| | 270 | 0.053 | | 4.25 | |
| | 325 | 0.044 | | 4.5 | Coarse silt |
| | | 0.037 | | 4.75 | |
| | | 0.031 | 1/32 | 5.0 | |
| | | 0.0156 | 1/64 | 6.0 | Medium silt |
| | | 0.0078 | 1/128 | 7.0 | Fine silt |
| | | 0.0039 | 1/256 | 8.0 | Very fine silt |
| | | 0.0020 | | 9.0 | |
| | | 0.00098 | | 10.0 | Clay |
| CLAY | | 0.00049 | | 11.0 | |
| | | 0.00024 | | 12.0 | |
| | | 0.00012 | | 13.0 | |
| | | 0.00006 | | 14.0 | |

Fonte: Extraído de Boogs (2009).

Característico da complexidade atrelada a cada ambiente deposicional, os diferentes tipos de granulometria são comumente encontrados em uma mesma estrutura rochosa (Figura 12). Ao serem depositadas e soterradas no interior da bacia, as camadas sedimentares podem vir a apresentar diferentes granulometrias, colorações e arranjos estratigráficos (como seleção, compactação, etc), o que na prática representa um indício de variações paleoclimáticas e paleodeposicionais aliados a processos diagenéticos no decorrer do tempo geológico.

Figura 12. Arenito (Parte superior) apoiado sobre camadas de silte, argila e conglomerados.



Fonte: Extraído de Boogs (2009).

3.2.3.2 A análise de arenitos e parâmetros petrofísicos

Inserido como uma das quatro categorias granulométricas, os arenitos correspondem a quase 25% das rochas sedimentares que integram a crosta terrestre. A respeito dos critérios de classificação, os arenitos são formados por fragmentos detríticos na fração areia, instituído entre 0,0625 – 2 mm de diâmetro. Tais aspectos possuem influência direta nas características de reservatórios areníticos de petróleo, gás e água (Boogs, 2009). Apesar da variedade de proporções, os arenitos são majoritariamente compostos por grãos de quartzo, feldspato, minerais autigênicos, cimento e matriz (Dantas, 2021). Os grãos de areia ainda podem apresentar variações em relação à sua granulometria, abrindo espaço para a criação de mais 5 subdivisões: arenitos muito-grosso (1 – 2 mm), grosso (0,50 – 1 mm), médio (0,250 – 0,50 mm), fino (0,125 – 0,250 mm), muito fino (0,0625 – 0,125 mm).

Figura 13. Montanhas de areia formadas a partir de processos eólicos.



Fonte: <https://theconversation.com/where-does-beach-sand-come-from-126323>

Os arenitos estão presentes em uma grande variedade de ambientes deposicionais, e juntamente com as rochas carbonáticas, apresentam o maior potencial para o armazenamento de fluidos de reservatório destacando-se o petróleo, gás e água (Teixeira, 2016). Essa característica é decorrente da proporção do espaço poroso que, no caso dos arenitos, pode atingir proporções entre 30 e 35% em volume. Aplicado ao estudo de análogos de reservatórios, dois parâmetros petrofísicos são de grande relevância para descrever as propriedades físico-químicas de diferentes tipologias rochosas: porosidade e permeabilidade (Dantas, 2021). Deve-se pontuar que o amplo contexto de aplicação para os parâmetros supracitados impulsiona o seu entendimento por diversas áreas da ciência moderna, tais como a engenharia, geologia, hidrologia e petrofísica.

Por definição, a porosidade representa a razão entre o volume vazio e o volume total de uma estrutura rochosa (Cupertino, 2005), sendo caracterizada por uma medida adimensional. Os espaços vazios instituídos entre os grãos simbolizam o espaço disponível para a percolação e acúmulo de hidrocarbonetos, água ou gás, os denominados fluidos de reservatório (Boogs, 2009).

$$\text{Porosidade Absoluta } (\phi_{\text{absoluta}}) = \frac{V_p}{V_t} \cdot 100 \quad (\%)$$

De outro modo, cientistas dedicados a esta área optam pela adoção do conceito de porosidade efetiva, a fim de quantificar a proporção de poros interconectados perante o volume total do corpo rochoso.

$$\text{Porosidade Efetiva } (\phi_{\text{efetiva}}) = \frac{IV_p}{V_t} \cdot 100 \quad (\%)$$

No qual:

$$V_t = \text{Volume Total}$$

$$IV_p = \text{Volume de poros interconectados}$$

$$V_p = \text{Volume de poros}$$

Ao tratarmos dos critérios de classificação associados à origem do poro, a porosidade pode ser classificada em primária ou secundária. Em primeiro plano, a porosidade primária origina-se através do processo deposição dos sedimentos na bacia, definindo a estrutura organizacional dos espaços intergrãos. De outro modo, a porosidade secundária é formada a partir de processos diagenéticos (pós-deposicionais) decorrentes no interior da bacia, ocasionando a modificação da estrutura de espaço vazios (poros) no arcabouço (Boogs, 2009). Em decorrência heterogeneidade de porosidade nas rochas sedimentares, o espaço poroso também pode ser categorizado através do seu tamanho, como demonstrado na tabela 3.

Tabela 3. Critérios de classificação de porosidade

| Tipo de porosidade (ϕ) | Diâmetro(d) |
|-------------------------------|---|
| nanoporos/ultramicroporos | $d \leq 0,6 \text{ nm}$ |
| microporos | $0,6 \text{ nm} \leq d \leq 2 \text{ nm}$ |
| mesoporos | $2 \text{ nm} \leq d \leq 50 \text{ nm}$ |
| macroporos | $d \geq 50 \text{ nm}$ |

Fonte: Extraído de Dantas (2021)

Instituído como parâmetro petrofísico, a permeabilidade (K) constitui a capacidade de uma estrutura rochosa em permitir a percolação de fluidos de reservatório através do espaço poroso. Na prática, a permeabilidade é resultado direto das correlações instituídas entre esfericidade, morfologia, mineralogia, tamanho, grau de arredondamento, seleção, compactação e orientação dos detritos no reservatório (Boogs, 2009). Esta propriedade foi inicialmente estudada pelo engenheiro de origem francesa Henry Philibert Gaspard Darcy (1803 - 1858), que equacionou a permeabilidade (K) por intermédio da observação experimental e das ferramentas matemáticas disponíveis no primeiro meado do século XX.

Equação de Darcy

$$K = \frac{q \cdot \mu \cdot L}{A \cdot \Delta p}$$

Na qual:

K = Constante de permeabilidade

Δp = Gradiente de pressão

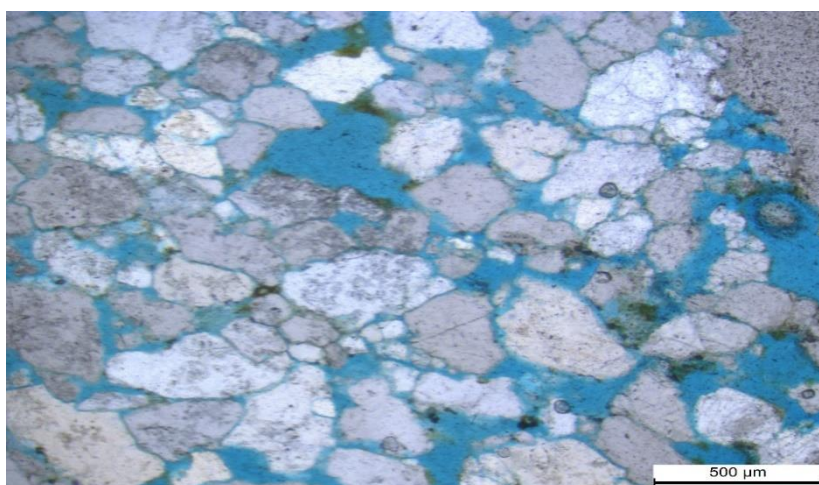
μ = viscosidade

q = Vazão do fluido

L = Comprimento do meio poroso

A = Área transversal

Figura 14. Grãos na fração areia associados ao espaço poroso (em azul) em lâmina delgada.



Fonte: Este trabalho

A quantificação dos dois parâmetros abordados faz-se imprescindível para a descrição das características físico-químicas de reservatórios areníticos, dado que a variância de propriedades petrofísicas tem influência direta sobre suas potencialidades para o acúmulo e percolação de fluidos. Dentre as inúmeras metodologias utilizadas para o estudo de parâmetros petrofísicos (e.g. Microscopia de Varredura - MEV, Microscopia de Transmissão - McT, Ressonância Magnética Nuclear - RMN) no âmbito da microescala, a análise petrográfica configura-se como um método direto para a avaliação de propriedade petrofísicas das rochas sedimentares. Trata-se da confecção de lâminas delgadas de rochas, para análise em microscópio (Figura 14), que ao serem analisadas a partir de um software de processamento de imagens digitais, fornecem os dados necessários para a quantificação de porosidade.

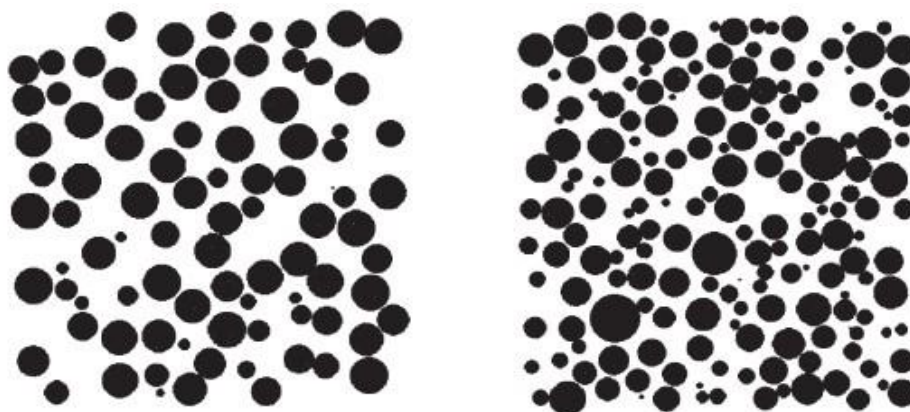
3.2.3.3 Aspectos Texturais em arenitos

No intuito de coletar um conjunto completo de informações, a descrição de características físico-químicas de um reservatório conta com a confecção de análises técnicas aplicadas em micro, meso e macroescala. Em função da heterogeneidade das formações areníticas, a análise de aspectos texturais representa uma metodologia comumente utilizada para aquisição de dados (Boogs, 2009).

A) Análise granulométrica e morfológica dos clastos

Na perspectiva de análise, aspectos associados ao tamanho dos grãos, arredondamento, esfericidade e grau de seleção fornecem pistas a respeito do histórico de transporte e ao sítio deposicional. A distribuição dos clastos dentro do reservatório possui influência direta nas propriedades petrofísicas da bacia, no qual a boa seleção granulométrica favorece aspectos de porosidade e permeabilidade (Boogs, 2009). A figura 15 fornece um exemplo de boa seleção granulométrica, no qual a porosidade encontra-se bem distribuída entre os clastos.

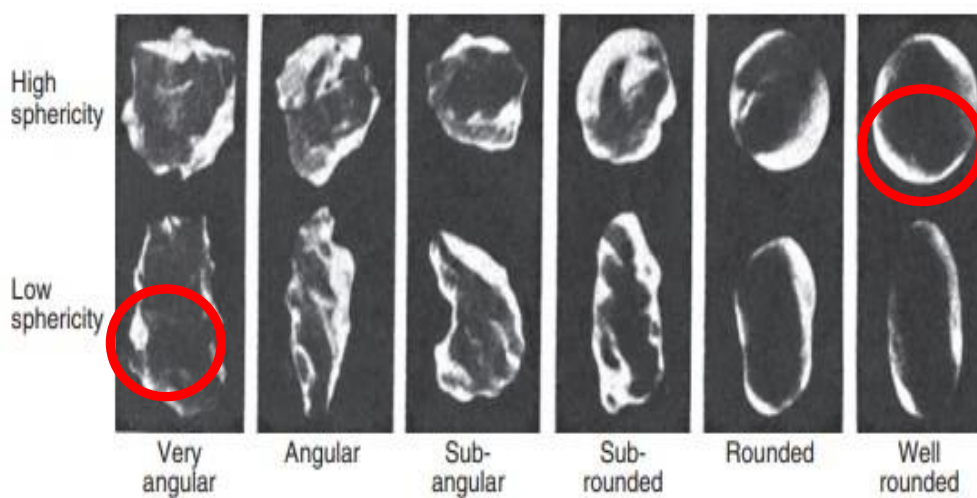
Figura 15. Boa seleção granulométrica entre os grãos, no qual os clastos apresentam tamanhos semelhantes entre si.



Fonte: Extraído de Boogs (2009)

O grau de arredondamento dos grãos fornece pistas em relação ao histórico de transporte dos detritos presentes na bacia sedimentar, sendo modelado através dos processos abrasivos com objetos ou/e outros clastos. Somado a isso, a esfericidade dos sedimentos também é denotada por um parâmetro que fornece informações a respeito dos agentes de transporte atuantes, sendo definida pela compatibilidade do grão a um molde de formato circular (Figura 16).

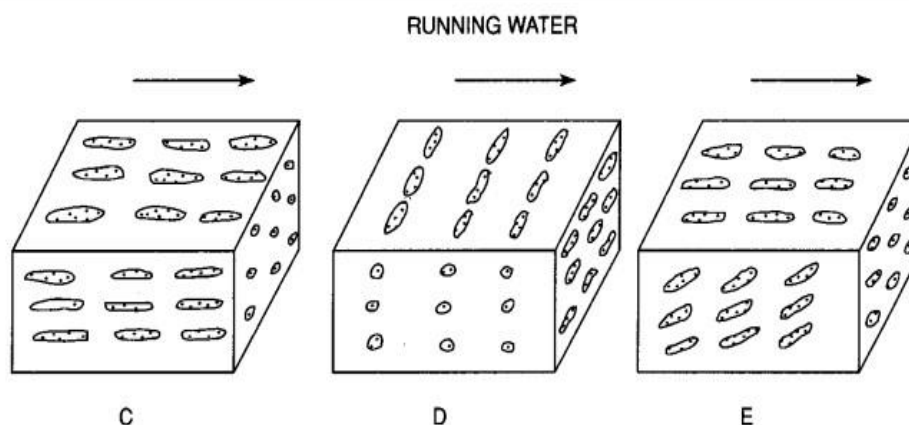
Figura 16. Classificação do grau de arredondamento e esfericidade dos grãos.



Fonte: Modificado de Boogs (2009)

Ao migrarmos para a aplicação de técnicas analíticas em mesoescala, a orientação e arranjo das partículas dentro da bacia são caracteres determinantes para a capacidade de percolação de fluidos de reservatório. A trama da rocha corresponde a propriedade responsável por mensurar e identificar tais caracteres (Figura 17). A percolação de fluidos de reservatório em arenitos portadores de maior grau de anisotropia é um indicativo de fluxo direcional favorecido pela orientação dos sedimentos, no qual o parâmetro de permeabilidade é maior em determinada direção (Boogs, 2009). Nesta perspectiva, deve-se pontuar que essa propriedade também é influenciada pela morfologia dos clastos contidos na bacia, o que reforça a conectividade de inúmeras variáveis para a estruturação completa de um reservatório arenítico.

Figura 17. Descrição da influência da orientação das partículas para a percolação de fluidos de reservatório



Fonte: Extraído de Boogs (2009).

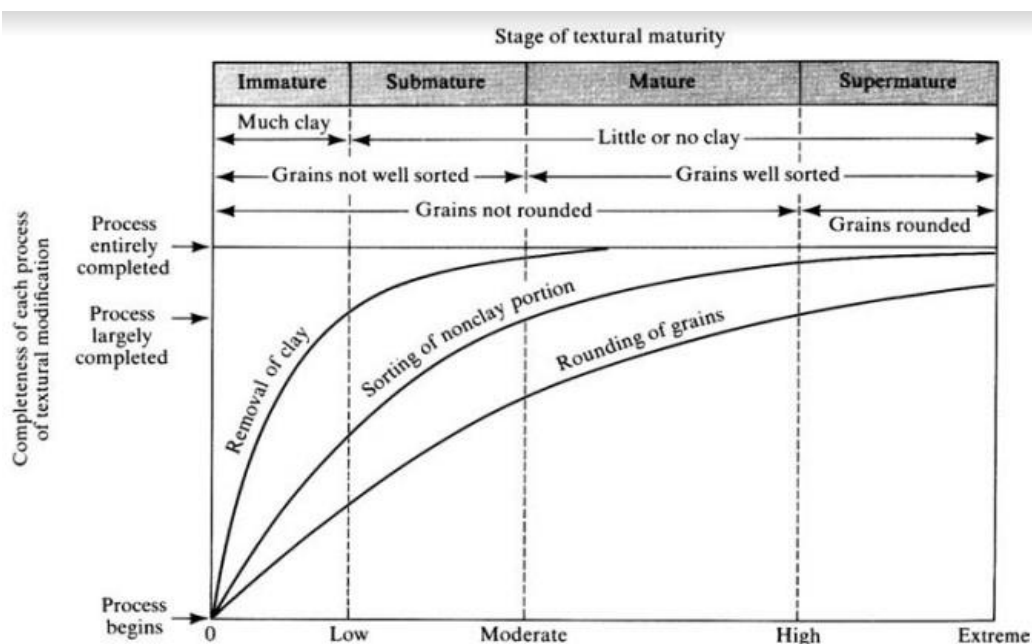
B) Análise de Maturidade

A verificação da maturidade textural e mineralógica nas rochas siliciclásticas configura-se como a análise associada a determinação das características dos sedimentos que integram a estrutura rocha. Em conformidade com Folk (1951), três critérios são utilizados para classificar a maturidade textural das rochas areníticas:

1. Teor de argila contido no reservatório
2. Grau de seleção
3. Grau de arredondamento

A combinação dessas propriedades permite a criação de cinco estágios de maturidade nas rochas areníticas: imaturo, submaturo, maturo, supermaturo.

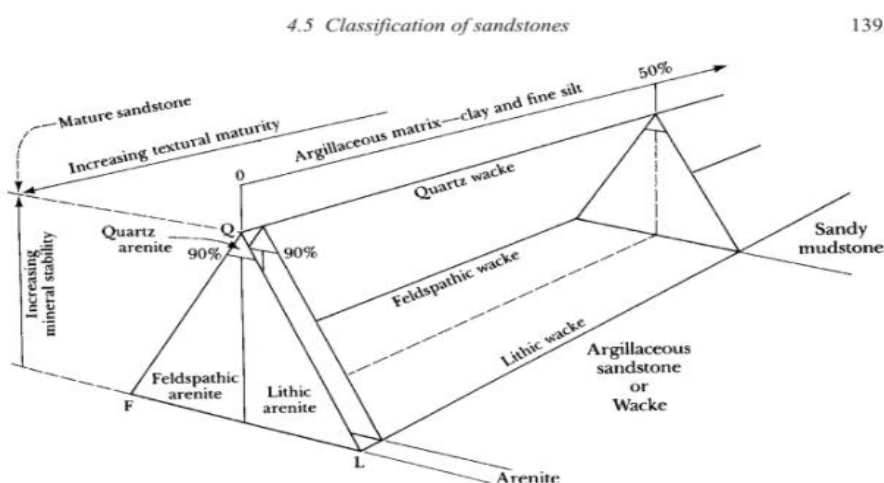
Figura 18. Maturidade Textural em Arenitos a partir de critérios granulométricos, morfológicos e mineralógicos.



Fonte: Extraído de Boogs (2009).

Nesta perspectiva, a verificação da maturidade mineralógica (Figura 19) também constitui um parâmetro utilizado para descrever os aspectos físico-químicos de depósitos sedimentares. Esta propriedade é mensurada a partir da proporção de minerais estáveis (e.g. quartzo e feldspato) nas rochas areníticas (Boogs, 2009).

Figura 19. Maturidade Mineralógica em arenitos.



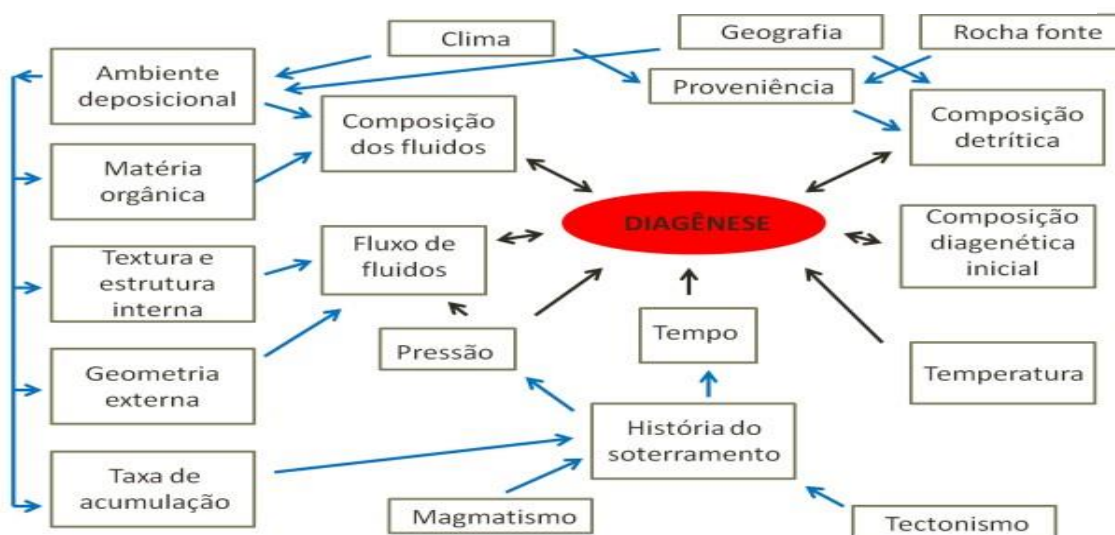
Fonte: Extraído de Boogs (2009).

Ao serem analiticamente conectadas, essas informações fornecem indicativos para a descrição das características mineralógicas e granulométricas do depósito, no qual serão integrados ao conjunto de dados de meso e macroescala adquiridos por profissionais dedicados ao estudo analítico de reservatórios.

C) Análise do grau de compactação

A partir da análise da configuração espacial e geométrica dos detritos que compõem o reservatório, o grau de compactação é uma propriedade que descreve a influência do tamanho e morfologia dos grãos dentro da estrutura rochosa, além da influência de processos pós-deposicionais (diagenéticos) nos ambientes de sedimentação (Boogs, 2009). De modo direto, a deposição e o soterramento das partículas no decorrer do tempo geológico induzem a compactação dos grãos, processo que é influenciado diretamente pelas características do ambiente deposicional em questão. Somado a isso, deve-se destacar a influência dos processos pós-deposicionais (químicos ou físicos) sobre as características físico-químicas dos reservatórios areníticos, inclusive em seu arranjo geométrico (Figura 20), que também é definido a partir dos diferentes graus de compactação dos grãos integrantes.

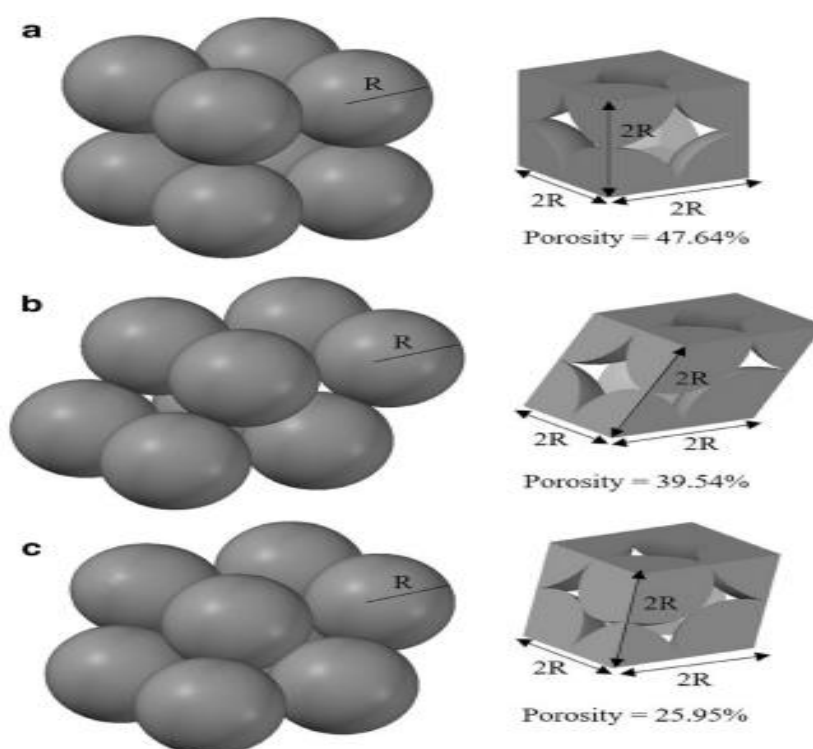
Figura 20. A influência dos processos pós-deposicionais nas características de reservatórios areníticos.



Fonte: Extraído de Teixeira (2016).

Como parte de um parâmetro petrofísico, a porosidade constitui uma propriedade diretamente influenciada pelo empacotamento dos grãos nos depósitos sedimentares. De acordo com a subsidência dos detritos na bacia, a diminuição do volume poroso é resultado do arranjo adquirido pelos grãos dentro da estrutura rochosa (Selley, 1998). Ao consideramos grãos providos de uma morfologia perfeitamente esférica, a figura 21 ilustra três arranjos possíveis para a organização de partículas siliciclásticas, destacando o percentual de volume poroso associado a cada distribuição espacial.

Figura 21. Empacotamento cúbico (a), ortorrômbico (b) e romboédrico

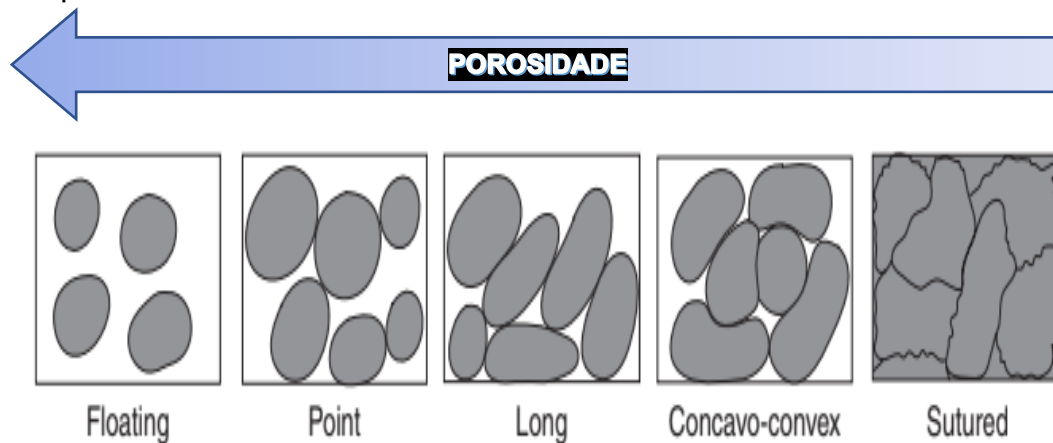


Fonte: Katre & Nair (2021).

A avaliação dessa propriedade também pode ser efetuada através da constatação das tipologias de contato estabelecidos entre as partículas na bacia (Boogs, 2009). Fundamentado por Taylor (1950), quatro tipos de contato são propostos (Pontual, Planar, Côncavo-Convexo e Suturado) para projetar a distribuição geométrica granular em arenitos, destacando uma tendência de diminuição da porosidade de acordo com o aumento do contato intergranular (Figura 22). Deve-se pontuar que o contato estabelecido entre os grãos do reservatório é resultado da interação dos processos que integram os estágios sedimentares (erosão, transporte, deposição e soterramento) e das

peculiaridades atreladas ao ambiente deposicional (e.g. Temperatura, pressão, pH). Somado a isso, não se pode omitir a atuação de eventos pós-deposicionais (diagenéticos) e os seus impactos na distribuição geométrica das partículas no interior do reservatório.

Figura 22. Relação entre as tipologias de contato em partículas silicilásticas e a porosidade.



Fonte: Adaptado de Boogs (2009).

3.3 AMBIENTES DEPOSICIONAIS CONTINENTAIS E O ESTUDO DE FÁCIES SEDIMENTARES

Fundamentado por perspectivas teóricas, os ambientes deposicionais são definidos como unidades geomórficas dinâmicas, portadoras de características físicas (e.g. temperatura, pluviosidade), químicas (e.g. pH, eH) e biológicas (e.g. fauna, flora, relações ecológicas) fundamentais para a deposição de sedimentos (Suguio, 2003). A interação conjunta de todas essas variáveis em uma mesma perspectiva de tempo e espaço é responsável por definir as propriedades de cada ambiente deposicional (Suguio, 2003). Em suma, os ambientes deposicionais são divididos em três classes principais definidas a partir de sua localização no espaço geográfico:

1. Ambientes Terrestres
2. Ambientes Transicionais
3. Ambientes Marinhos

Deste modo, as subdivisões existentes em cada classe conferem especificidades a cada tipo de ambiente, destacando suas peculiares físicas, químicas e biológicas dentro da grande variedade de ambientes de sedimentação (Figura 23).

Figura 23. Tipos de ambientes deposicionais

| | | |
|--------------|--|---|
| Continental | Terrestre | Desértico Glacial Espélico (cavernas) |
| | Subaquoso | Fluvial Paludial (pântanos) Lacustre |
| Transicional | Deltaico Estuarino Lagunar Litorâneo (intermarés) | |
| Marinho | Recifal Nerítico (maré baixa a -180m) Batial (-180 a -1.800m) Abissal (abaixo de -1.800m) | |

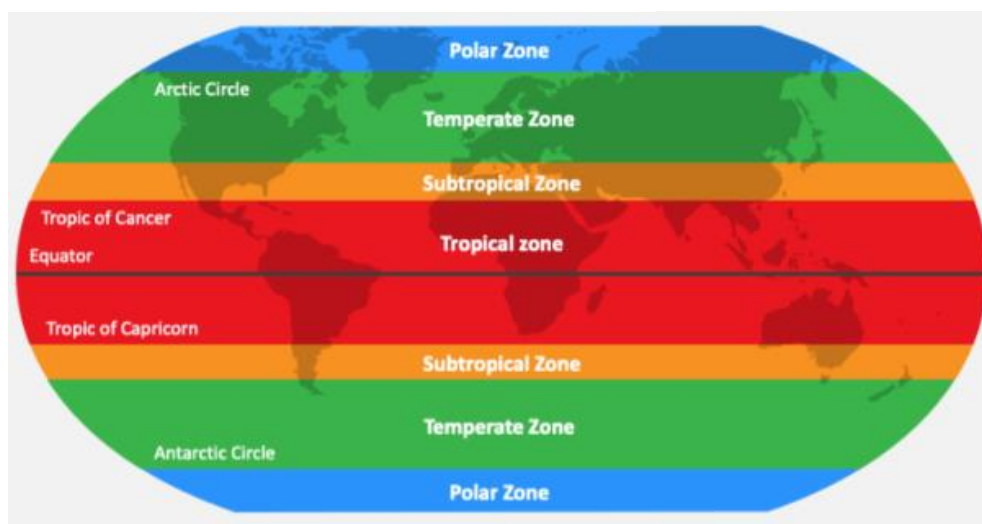
Fonte: Extraído de Suguio (2003).

Na busca por informações pretéritas, as camadas de sedimentos acumulados em uma bacia sedimentar fornecem informações a respeito das características paleoambientais das áreas de deposição. Neste contexto, porções delimitadas de sedimentos provida de propriedades físico-químicas bem definidas em uma unidade estratigráfica podem ser caracterizadas como fácies sedimentares (Reading, 1986; Nichols, 2009). De fato, o estudo de fácies sedimentares configura-se como parte da metodologia científica aplicada ao estudo dos paleoambientes de sedimentação, além de instituírem-se essenciais para a caracterização descritiva de bacias sedimentares. Deste modo, a compreensão de propriedades físico-químicas dos reservatórios siliciclásticos pode ser integrada ao estudo dessas estruturas, agregando ao entendimento de aspectos de micro, meso e macroescala.

3.3.1 Ambientes deposicionais continentais

A variedade de condições ambientais, designadas principalmente a partir da variação latitudinal, permite a formação de sistemas deposicionais portadores de propriedades distintas. Nesta perspectiva, uma grande parcela dessas características são modeladas a partir de aspectos climáticos tais como a temperatura, pluviosidade, umidade, pressão e radiação solar (Suguio, 2003). Por sua vez, a localização geográfica de acordo com as zonas climáticas (Figura 24) do planeta pode definir as propriedades físicas, químicas e biológicas de cada ambiente de deposição (Press et al, 2006). Somado a isso, as particularidades regionais e locais (e.g. relevo, altitude, tectonismo), em conjunto com a atuação dos elementos bióticos (e.g. interações ecológicas, fauna, flora), também integram o complexo de características que modelam o funcionamento dos ambientes de sedimentação. Em função de sua grande porção continental e extensão latitudinal, o Brasil possui inúmeras tipologias de ambientes designados para a acumulação de sedimentos em seu território.

Figura 24. A zonas climáticas do planeta

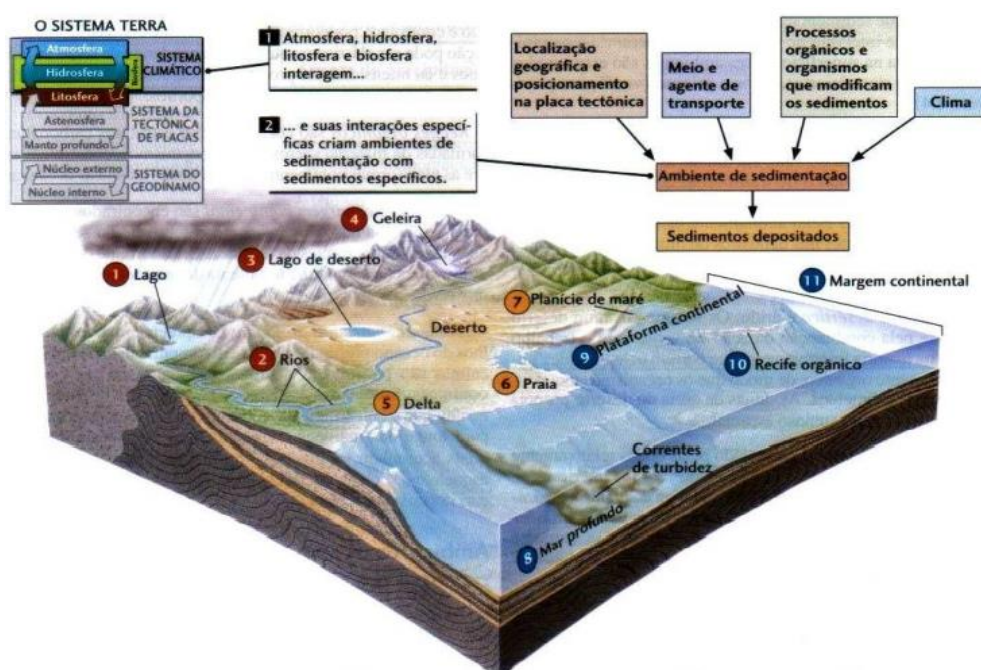


Fonte: <https://www.sketchbubble.com/en/presentation-climate-zones.html>

Caracterizados diretamente pela combinação de processos geológicos e pelas variações de temperatura e pluviosidade, os ambientes desértico, aluvial, fluvial, lacustre, glacial e paludial configuram-se como os principais representantes dos ambientes de sedimentação continentais (Press et al, 2006). De acordo com sua denominação, essas localidades estão sujeitas às condições

ecossistêmicas oferecidas por áreas continentais, englobando uma grande variedade de condições ambientais. Em continuidade, deve-se pontuar que os sedimentos presentes nos ambientes de deposição continentais são majoritariamente formados por componentes clásticos, qualificados pela sua proximidade em relação a rocha-fonte. A figura 25 ilustra a variedade de ambientes de sedimentação formados em diferentes localidades geográficas do planeta, bem como a presença dos agentes responsáveis por modelar as propriedades de cada sítio de deposição.

Figura 25. A estruturação de ambientes de sedimentação a partir da combinação de fatores múltiplos



Fonte: Extraído de Press et al (2009).

Diante da grande variedade de ambientes estruturados em superfície, o estudo de análogos de reservatório em sistemas continentais busca ampliar o conhecimento técnico sobre as propriedades físico-químicas dos ambientes de sedimentação, além de promover a melhoria na avaliação de aspectos petrofísicos interligados ao potencial de armazenamento e percolação de fluidos em potenciais sítios de formação de reservatórios de petróleo e gás natural. No trabalho desenvolvido, os ambientes fluviais destacam-se como principal objeto de estudo, dado o contexto em que os arenitos da Formação Jaicós se situam no arranjo geométrico da borda leste da Bacia do Parnaíba.

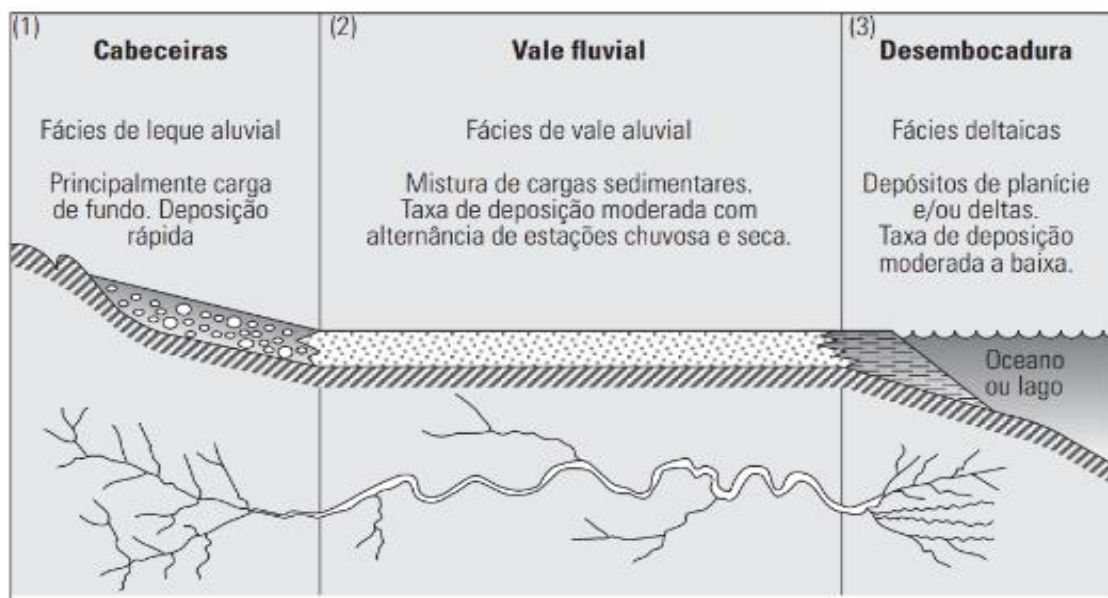
3.3.2 Ambientes fluviais e análise descritiva do afloramento estudado

Instituído como uma substância essencial para a manutenção dos ecossistemas vivos, a água também corresponde a um agente geológico de grande força na modelagem das paisagens da superfície do planeta. A partir das definições geomorfológicas, os rios são caracterizados como um fluxo de água canalizado e direcional, sendo o seu regime classificado de acordo com a vazão de água disponível (Suguio, 2003):

1. Rios Intermitentes (ou efêmeros)
2. Rios Perenes (ou permanentes)

Os rios também podem ser distinguidos através das características estruturais de seu canal. Ao desprezarmos as subdivisões para cada categoria, os rios podem ser designados como retilíneos, meandrantes, anastomosados e entrelaçados (Nichols, 2009).

Figura 26. (1) A fase de juventude está situada na cabeceira do rio, no qual predominam os processos de erosão. (2) A fase de maturidade situa-se na porção intermediária do vale fluvial, denotado pelo relativo equilíbrio entre os processos de erosão e deposição.



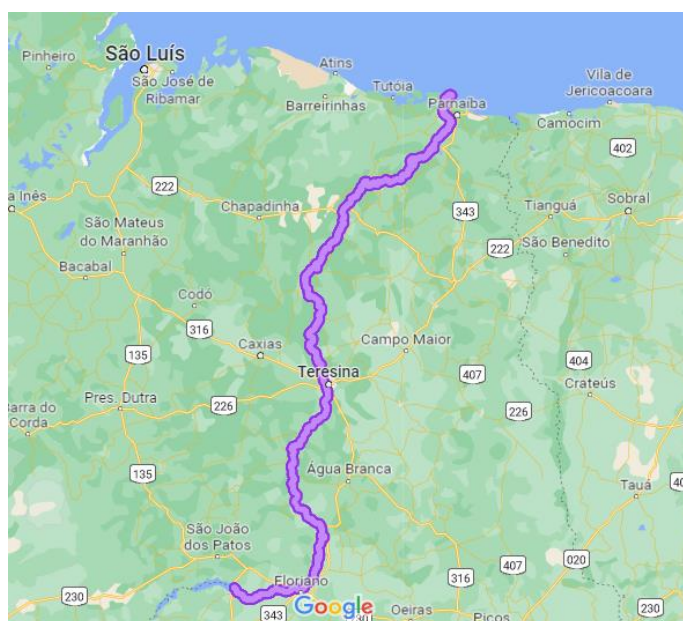
Fonte: Extraído de Suguio (2003).

Os processos atuantes nos sistemas fluviais incluem as etapas de erosão, transporte e deposição dos sedimentos ao longo de seu leito (Miall, 2006). Inicialmente proposto por Davis (1899), o conceito definido pelo *ciclo de erosão* é baseado nas 3 fases de evolução de um sistema fluvial: juventude, maturidade

e senilidade. As três sucessões supracitadas são elaboradas a partir do volume da carga sedimentar e o balanço entre a deposição e erosão decorrentes ao longo da extensão do rio (Figura 26).

Ademais, elementos denotados por diques, barras e várzeas são denominados como subambientes inseridos em sistemas fluviais (Mahesha & Balasubramanian, 2013). Designados pelo seu grande potencial erosivo, os rios atuam como os principais agentes de transporte de sedimentos clásticos rumo ao sítio de deposição. Deve-se pontuar que o tempo de transporte apresenta influência direta nos aspectos texturais, granulométricos e composicionais dos sedimentos depositados, o que influi diretamente na disposição estrutural das fácies sedimentares. Ao iniciarmos a descrição do objeto de estudo, a Bacia do Parnaíba está localizada na região Nordeste do Brasil, englobando os estados Piauí (PI), Maranhão (MA) e parte do Ceará (CE). Instituído pela sua importância ecossistêmica, social e geológica, o rio Parnaíba constitui o principal elemento integrante dessa bacia.

Figura 27. Extensão do rio Parnaíba

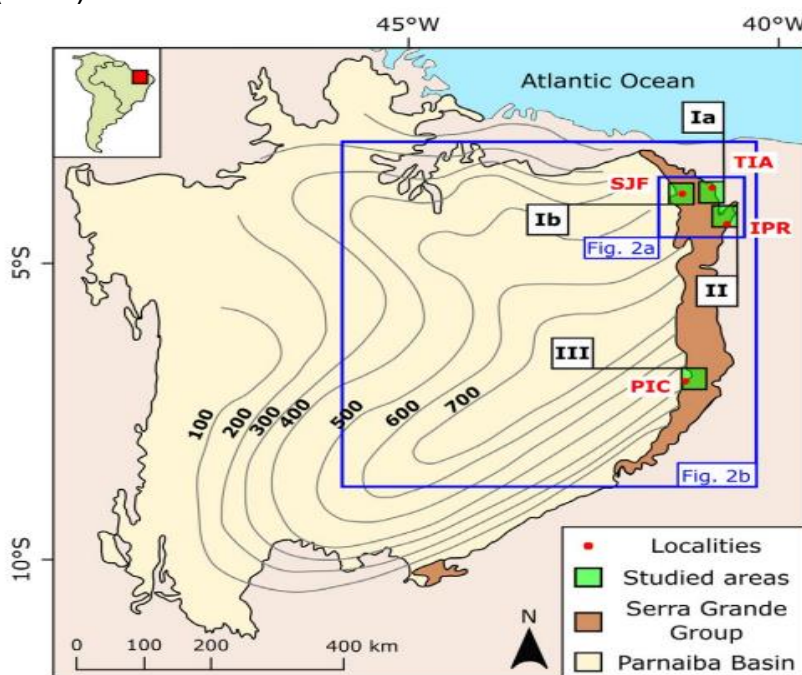


Fonte: Google Maps

A Bacia do Parnaíba constitui uma bacia cratônica composta por sucessões sedimentares e vulcânicas que, de acordo com a cronologia geológica, foram estruturadas do período Siluriano ao Cretáceo (Janikian et al, 2019). Situado na borda leste da bacia, o Grupo Serra Grande constitui a unidade

geomorfológica mais baixa do arcabouço sedimentar, sendo composta pelas formações Ipu, Tianguá e Jaicós. O estudo analítico de fácies sedimentares constitui uma metodologia aplicada ao estudo de variabilidade espacial e temporal de sistemas fluviais.

Figura 28. Representação do Grupo Serra Grande em associação com as áreas estudadas (IPR) por Janikian et al (2019).



Fonte: Extraído de Janikian et al (2019).

No contexto aplicado aos ambientes de sedimentação, o Grupo Serra Grande é resultado da atuação de sistemas fluviais de canais entrelaçados sobre as áreas da borda leste da Bacia do Parnaíba. A organização estrutural e geométrica dos sedimentos que formam as sucessões estudadas permite o reconhecimento de 4 associações de fácies principais:

1. Rios proximais entrelaçados em lençol
2. Rios proximais de alta declividade
3. Rios distais de baixa declividade
4. Costa dominada por onda, glacialmente influenciada

Para cada associação de fácies identificada, denota-se a presença de elementos arquiteturais que sugerem diferentes inferências a respeito das características do paleoambiente. A tabela 4 demonstra as associações de

fácies encontradas instituídas no Grupo Serra Grande bem como a descrição resumida de seus respectivos elementos arquiteturais.

Tabela 4. Descrição interpretativa das fácies e elementos arquiteturais presentes nas unidades do Grupo Serra Grande que afloram na borda leste da Bacia do Parnaíba).

| Facies association | Architectural elements | Description | Interpretation |
|---|--|--|--|
| Proximal sheet-braided rivers | F1 - Sheet-like cross-bedded conglomerate and coarse sandstone G1 - Diamictite lenses | Successions dominated by amalgamated beds of massive pebbly sandstone and conglomerate, as well as dm-cm sets of cross-bedded conglomerate, crossbedded conglomerate and coarse sandstone with pebbles (F1). Cm layers of laminated sandstone may occur. Width-depth ratio of sediment bodies is > 1:30. At a particular stratigraphic level near the top of the Ipu Fm. in Area II, diamictite lenses (G1) intercalate F1. | Deposits of wide and shallow sheet-braided rivers on high-slope alluvial plains and glacial outwash settings. Fine-grained deposits mark local flow interruption. Diamictite intercalation is interpreted as the product of a glacial advance event onto the alluvial plain. |
| Proximal, high-slope rivers | F2 - Lenses of cross-bedded cosets F3 - Lenses of large-scale cross-beds F4 - Channelized cross-bedded sandstone F5 - Current ripple-dominated fine sandstone and silt lenses | Successions dominated by: (F2) dm-cm lenses of cross-bedded and cm-m cosets of fine-to-medium sandstone; (F3) large-scale cross-bedded sandstone with dm-m sets of coarse sandstone; (F4) occurrence of channelized cross-bedded sandstone. Architecture of the sediment bodies is tabular to channelized, typically composing a few to several m-thick cycles with a lower erosional surface and an upper drape of fine sediments (F5). Width-depth ratio of channelized bodies is < 1:20. | Deep channels filled with the deposits of downstream-migrating unit and compound bars, related to a large river system with more distal sources and larger catchment areas than the fluvial system of Proximal sheet-braided rivers. |
| Distal, low-slope rivers and floodplains | F4 - Channelized cross-bedded sandstone F2 - Lenses of cross-bedded cosets F3 - Lenses of large-scale cross-beds F5 - Current ripple-dominated fine sandstone and silt lenses | Successions dominated by: (F4) channelized crossbedded sandstone; (F2) lenses of cross-bedded cosets and (F3) lenses of large-scale cross-beds, with great preservation of current ripple-dominated fine sandstone and silt lenses (F5). Fining upward cycles bounded by erosional surfaces are typically several meters thick and the average grain-size is fine to medium sand. Width-depth ratio of channelized bodies is < 1:20. | Stable meter-scale channels in low-slope settings flanked by preserved overbank deposits. |
| Wave dominated, glacially influenced coast | C1 - Wave ripple-dominated sandstonesiltstone lenses C2 - Laterally continuous siltstone and shale beds | Successions dominated by wave ripple-dominated sandstone-siltstone lenses and hummocky crossstratification (C1) and/or laterally continuous siltstone and shale beds (C2) with local dropstone-rich decimeter-thick beds. The sandier successions of C1 are dominant in the northern exposures of the Tianguá Fm., whereas muddier C2 characterizes the southern areas. Some exposures reveal a low-angle truncation between this coastal successions and the underlying fluvial strata of the Ipu Fm., interpreted as a transgressive ravinement surface. | The dominance of wave structures and the occurrence of both Cruziana and Skolithos ichnofacies in C1 indicates coastal environments (Pemberton, Wagoner, & Wach, 1992). Paleocurrents in the fluvial units indicate a marine transgression from west to east, but the abundance of deeper water deposits to the south suggests an irregular coast, in agreement with the evidence for a larger fluvial system to the north, capable of delivering enough sediment to build aggradational coastal deposits. Dropstone-rich beds indicate a glacial retreat context at the base of the succession. |

Fonte: Extraído de Janikian et al (2019).

Os depósitos que integram a Formação Jaicós são designados pela presença de sedimentos finos compreendidos desde a escala decimétrica até a escala de metro (Janikian et al, 2019). O afloramento estudado (Área IPR) está inserido em uma fácies distal, formada pela associação de fluxos de água de baixa

declividade, no qual se destaca a presença dos elementos arquiteturais F2, F3, F4 e F5 (Figura 36).

A partir da descrição das fácies sedimentares que compõem a Formação Jaicós, é possível entender a influência dos estágios sedimentares do ciclo das rochas sobre sua estrutura e evidenciar a participação dos sistemas fluviais sobre as propriedades petrofísicas dos arenitos que compõem o seu arcabouço. Para os objetivos supracitados, a análise microscópica foi confeccionada a partir da obtenção de 6 lâminas delgadas da Formação Jaicós, no qual foram avaliados os aspectos texturais e os tipos de poros.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Orientado pelos critérios de padronização inerentes à metodologia científica e pelos objetivos previamente estabelecidos, o trabalho em questão foi realizado a partir de uma ampla revisão bibliográfica, apropriando-se de artigos, monografias e livros acadêmicos dotados de relação direta ou indireta à temática desenvolvida. Somado a isso, a conciliação entre as ferramentas estatísticas (e.g. gráficos, tabelas, teoremas) e o aparato tecnológico (e.g. microscópio petrográfico, software de análise de imagem digital, linguagens de programação) adequado denotou-se essencial para confecção das análises, e posteriormente, a elaboração das inferências.

Nesta seção do trabalho serão descritos os procedimentos efetuados para a elaboração da pesquisa, apresentados de modo sequencial e constituídos de certo de grau de detalhamento. Assim, o intuito desta seção é demonstrar de maneira clara e organizada todas as etapas e metodologias utilizadas no estudo aqui conduzido.

4.1 ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL PARA AVALIAÇÃO DA POROSIDADE EM LÂMINAS DELGADAS

As análises foram conduzidas em lâminas delgadas, confeccionadas em amostras de fácies sedimentares coletadas em trabalhos de campo por pesquisadores do projeto FAPESP 2016/03091-5. As amostras de lâminas foram

obtidas diretamente do afloramento da Formação Jaicós, Ladeira da Lapa, situado na borda leste da Bacia do Parnaíba (Figura 28).

A primeira etapa do estudo foi integralmente conduzida no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Para cada lâmina delgada, foram obtidas (em média) 28 fotos digitais, a partir da câmera fotográfica acoplada ao microscópio petrográfico DM750P (Leica). As fotos digitais das seções delgadas foram obtidas através do software LAS (Leica Application Suite) portador do módulo dedicado ao processamento de imagem e da câmera Leica MC170HD. De acordo com o objetivo estipulado, a avaliação da porosidade foi conduzida de acordo com a metodologia elaborada por Gesicki (2009).

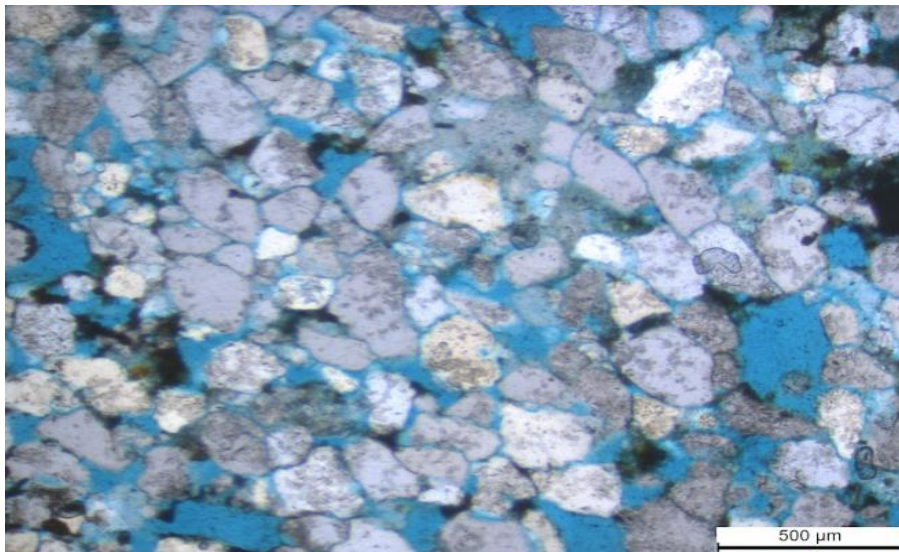
Figura 29. *Microscópio Petrográfico Leica DM750P (Instituto de Geociências - USP)*



Fonte: Este trabalho

A análise microscópica para a identificação de parâmetros texturais e petrofísicos configura-se como uma metodologia eficiente no estudo de análogos de reservatórios. A metodologia é pautada na obtenção de dados quantitativos em escala microscópica (medidas lineares) para a formulação de inferências em escalas tridimensionais de meso e macroescala (Gesick et al, 2009). A partir da observação microscópica das lâminas delgadas, é notável a distinção entre os grãos de areia e o espaço poroso (tingido em azul).

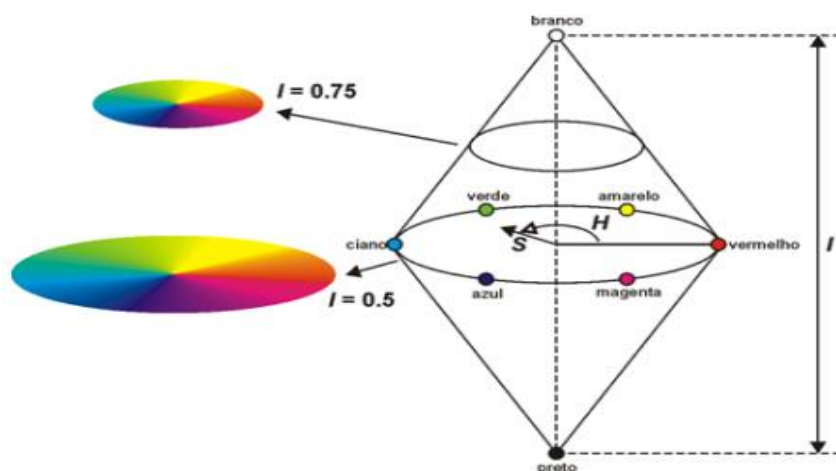
Figura 30. Imagem microscópica de lâmina delgada, na qual identificam-se os elementos detríticos e os espaço porosos (em azul).



Fonte: Este trabalho

Em função da grande variedade de componentes ópticos, as imagens digitais coloridas são representadas a partir do espectro de cores primárias RGB e dos atributos HSI. Sistemas modelados para identificação de componentes ópticos de imagens coloridas são portadores de métodos estatísticos bem fundamentados e podem ser aplicados em inúmeros campos do conhecimento científico (e.g. Geoprocessamento, cartografia, biologia). Em primeiro plano, o sistema RGB denota a composição da imagem colorida a partir da combinação de cores primárias, neste caso, designados pelo vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*). Ademais, os atributos de matiz (*Hue*) são fundamentados pelo espectro de cores primárias, dado que a saturação (*Saturation*) está conectada ao grau de diluição da cor pura sobre a luz branca. Por fim, a intensidade (*Intensity*) constitui-se como um atributo associado ao brilho, sendo calculada a partir da soma dos componentes RGB das imagens coloridas (Gesicki et al, 2009).

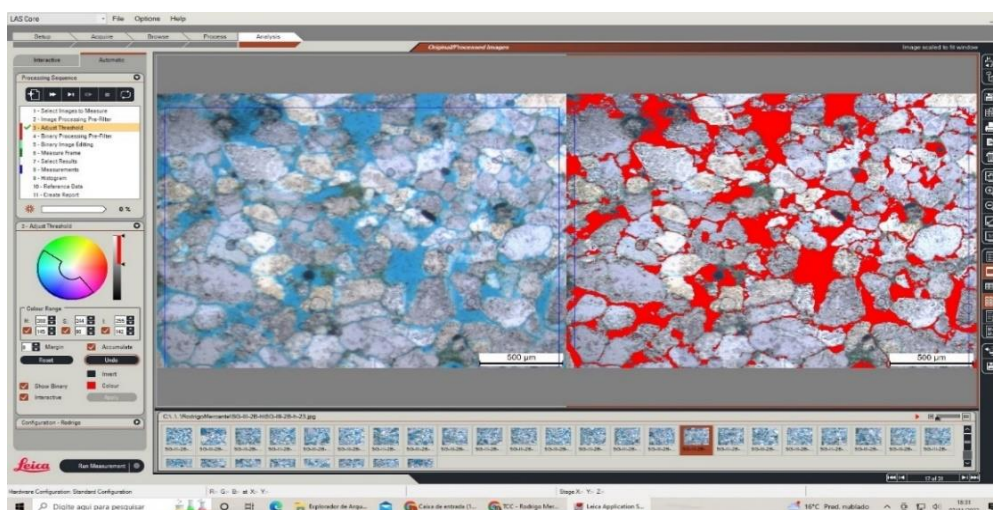
Figura 31. Disposição dos componentes RGB e HSI.



Fonte: Extraído de Gesicki et al (2009).

Desta forma, a etapa de segmentação de imagem é denotada pela definição de critérios para a contabilização de regiões portadores de componentes ópticos semelhantes, que aplicado ao contexto, foi responsável pela subdivisão das imagens em poros e não-poros. Após efetuada a segmentação, apresenta-se a formação de uma imagem binária, no qual é possível quantificar a proporção representada pelo espaço poroso (Gesicki, 2009). De acordo com a metodologia descrita, a figura 32 ilustra a etapa de segmentação efetuada para análise do volume de poros dentro do software LAS (Leica Application Suite).

Figura 32. Segmentação de imagem digital através da identificação de componentes ópticos ((Software Leica Application Suite).



Fonte: Este trabalho

A tabela 5 mostra o número respectivo de fotos para cada uma das seis lâminas analisadas:

Tabela 5. Relação do número de fotos obtidas para cada lâmina

| Amostra | Nº de fotos |
|-----------|-------------|
| SG-III-2 | 31 |
| SG-III-9 | 28 |
| SG-III-12 | 27 |
| SG-III-13 | 30 |
| SG-III-15 | 26 |
| SG-III-16 | 29 |

Os dados percentuais referentes ao espaço poroso (*Area Percent %*) foram importados em uma planilha Excel, pelo qual foi conduzida a análise estatística (Figura 33).

Figura 33. Exemplo da planilha excel obtida através da quantificação do espaço poroso no software LAS.

LAS Automatic Field Measurement Results

| Number | Images | Area Percent(%) | Area(µm ²) | Area Fraction | Area Fill | Perimeter(µm) | Mean Chord(µm) | Intercept H(µm) | Intercept V(µm) |
|--------|---------------------|-----------------|------------------------|---------------|-----------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| f | SG-III-10A-A-9.jpg | 23,035 | 1029574,980 | 0,23 | 0,239 | 220022,371 | 16,421 | 62456,417 | 78395,057 |
| f | SG-III-10A-A-1.jpg | 23,832 | 1055542,673 | 0,239 | 0,235 | 170855,673 | 23,359 | 45610,190 | 59557,239 |
| f | SG-III-10A-A-10.jpg | 24,113 | 1073590,954 | 0,241 | 0,238 | 216745,971 | 18,15 | 53950,438 | 73361,077 |
| f | SG-III-10A-A-11.jpg | 18,4 | 819242,928 | 0,184 | 0,225 | 160539,773 | 16,506 | 44270,238 | 54256,739 |
| f | SG-III-10A-A-12.jpg | 17,942 | 798021,166 | 0,179 | 0,219 | 185300,312 | 16,049 | 43772,399 | 63401,117 |
| f | SG-III-10A-A-13.jpg | 25,006 | 1102505,537 | 0,25 | 0,249 | 221949,971 | 10,999 | 60982,399 | 79533,637 |
| f | SG-III-10A-A-14.jpg | 22,922 | 1021670,288 | 0,229 | 0,237 | 219495,691 | 17,797 | 57375,718 | 76521,437 |
| f | SG-III-10A-A-15.jpg | 30,116 | 1305383,634 | 0,301 | 0,452 | 169921,012 | 27,124 | 51074,399 | 63987,677 |
| f | SG-III-10A-A-16.jpg | 20,640 | 919330,942 | 0,206 | 0,26 | 197533,472 | 17,374 | 52314,478 | 66569,097 |
| f | SG-III-10A-A-17.jpg | 11,853 | 529505,219 | 0,119 | 0,136 | 156472,394 | 12,314 | 41257,538 | 53010,058 |
| f | SG-III-10A-A-18.jpg | 15,121 | 672332,457 | 0,151 | 0,178 | 170194,133 | 14,447 | 46800,499 | 58109,259 |
| f | SG-III-10A-A-19.jpg | 24,108 | 1073353,013 | 0,241 | 0,308 | 209306,372 | 19,037 | 56392,138 | 71431,537 |
| f | SG-III-10A-A-2.jpg | 21,731 | 967549,974 | 0,217 | 0,278 | 208236,312 | 17,141 | 56446,059 | 70947,737 |
| f | SG-III-10A-A-20.jpg | 19,172 | 853514,091 | 0,192 | 0,237 | 180251,573 | 17,522 | 49716,499 | 60449,510 |
| f | SG-III-10A-A-21.jpg | 17,498 | 778917,934 | 0,175 | 0,212 | 163390,513 | 17,519 | 44267,419 | 55291,719 |
| f | SG-III-10A-A-22.jpg | 21,395 | 952570,214 | 0,214 | 0,272 | 194994,472 | 19,109 | 49826,219 | 63027,937 |
| f | SG-III-10A-A-23.jpg | 26,592 | 1163506,599 | 0,266 | 0,362 | 210952,242 | 21,647 | 54673,219 | 69547,777 |
| f | SG-III-10A-A-24.jpg | 22,559 | 1014400,419 | 0,226 | 0,291 | 210394,992 | 19,667 | 53909,538 | 69179,257 |
| f | SG-III-10A-A-25.jpg | 20,295 | 902273,929 | 0,203 | 0,254 | 185953,332 | 17,469 | 51652,399 | 67236,137 |
| f | SG-III-10A-A-26.jpg | 18,951 | 843777,947 | 0,19 | 0,234 | 141550,314 | 22,749 | 37091,459 | 49736,259 |
| f | SG-III-10A-A-27.jpg | 20,467 | 912330,15 | 0,205 | 0,267 | 187601,432 | 19,219 | 50014,579 | 64095,777 |
| f | SG-III-10A-A-28.jpg | 23,146 | 1030630,956 | 0,231 | 0,301 | 197595,092 | 19,323 | 53336,538 | 67210,457 |
| f | SG-III-10A-A-29.jpg | 27,959 | 1244912,325 | 0,28 | 0,399 | 216336,071 | 21,337 | 56341,099 | 74453,177 |
| f | SG-III-10A-A-3.jpg | 19,396 | 863102,5 | 0,194 | 0,24 | 179097,213 | 19,312 | 47134,419 | 59999,379 |
| f | SG-III-10A-A-30.jpg | 22,194 | 994959,019 | 0,221 | 0,294 | 206262,312 | 17,732 | 55501,359 | 69591,377 |
| f | SG-III-10A-A-4.jpg | 21,29 | 947441,719 | 0,213 | 0,27 | 191746,672 | 19,432 | 51402,019 | 65099,417 |
| f | SG-III-10A-A-5.jpg | 19,024 | 846399,732 | 0,19 | 0,235 | 179782,453 | 17,371 | 49797,799 | 61951,459 |
| f | SG-III-10A-A-6.jpg | 26,496 | 1178367,097 | 0,265 | 0,36 | 222749,911 | 19,391 | 60795,259 | 76193,137 |
| f | SG-III-10A-A-7.jpg | 23,85 | 1061678,594 | 0,238 | 0,313 | 198229,132 | 19,992 | 53407,379 | 67993,177 |
| f | SG-III-10A-A-8.jpg | 26,982 | 1193999,09 | 0,269 | 0,367 | 216990,511 | 20,397 | 59894,459 | 75142,257 |

Fonte: Este trabalho

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA POROSIDADE COM O USO DA LINGUAGEM PYTHON

De acordo com os objetivos previamente definidos referentes a quantificação da porosidade, a linguagem Python foi escolhida para a avaliação estatística dos dados adquiridos a partir das imagens digitais. Desta forma, em decorrência da presença de todas as funcionalidades necessárias, o ambiente de desenvolvimento integrado *Spyder* (5.2.2) *IDE* constituiu a plataforma utilizada para a execução dos códigos em Python. A figura 34 ilustra uma parcela do código confeccionado para a execução da análise do volume de poros.

Link para o código completo (*Google Colab*):

<https://colab.research.google.com/drive/1GGKiSVKFMb0VxU3QLzaTtrPUAtmOpZXb?usp=sharing>

Figura 34. Porção do código utilizado para a confecção da análise estatística.

```

17 import pandas as pd
18 from pandas import DataFrame
19 import numpy as np
20 import matplotlib.pyplot as plt
21 import seaborn as sns
22 import scipy
23 from scipy import stats
24 from scipy.stats import norm
25 from scipy.stats import chi2
26
27 Am_12a=[15.077,21.706,15.536,19.28,085,19.092,24.681,17.295,16.174,24.795,22.661,15.437,19.123,21.589,24.287,19.238,25.526,17.048,17.696,24.276,22.209,17.594,
28 Am_28a=[36.378,43.085,27.36,36.961,38.056,40.426,38.427,36.351,39.121,33.617,33.865,34.049,41.595,39.685,34.069,34.796,29.429,35.095,36.175,33.645,32.452,32.846
29 Am_98a=[18.578,14.843,11.822,11.252,17.658,16.642,15.923,22.165,29.559,24.117,22.144,21.084,14.018,19.47,19.019,15.822,18.953,20.211,20.649,16.776,21.431,19.162,1
30 Am_13a=[11.935,20.732,24.112,16.009,17.242,25.889,22.922,11.186,20.648,11.493,15.122,24.209,17.731,19.172,17.439,23.299,26.582,22.259,20.268,16.791,20.487,20.148
31 Am_158a=[6.952,34.189,38.416,35.852,27.709,15.389,38.519,15.809,15.352,14.051,17.104,45.911,31.159,38.916,19.899,21.463,21.059,17.012,25.489,19.325,15.378
32 Am_16a=[36.104,41.352,28.721,34.829,38.288,31.378,32.176,38.415,26.283,35.131,31.587,25.27,38.873,31.01,35.579,31.045,31.433,34.244,28.491,31.778,36.781,33.77,
33
34 A=[1,4,5]
35 print(type(A))
36
37 Values=np.concatenate((Am_12a,Am_28a,Am_98a,Am_13a,Am_158,Am_16a))
38 Samples=len(Am_12a)*len(Am_12a)+len(Am_28a)*len(Am_28a)+len(Am_98a)*len(Am_98a)+len(Am_13a)*len(Am_13a)+len(Am_158)*len(Am_158)+len(Am_16a)*len(Am_16a)
39
40 df=pd.DataFrame({'Samples':Samples,'Values':Values})
41
42 plt.figure(22)
43 plt.title('Porosidade')
44 sns.boxplot(x=df.Values,y=df.Samples)
45 plt.xlabel('Porosidade (%)')
46 plt.ylabel('Sample')
47
48 #plt.show()
49
50 Todas= Am_28
51 plt.figure(1)
52 sns.distplot(Todas,bins=)
53
54 print(f'Média e erro padrão da média= (np.round(np.mean(Todas),3))+-(np.round(sem(Todas),3))')

```

Fonte: Este trabalho

Os dados inseridos na planilha Excel para cada amostra foram importados no ambiente de análise de dados (*Spyder*), o que permitiu a elaboração de gráficos para a melhoria da análise interpretativa. No contexto dos reservatórios siliciclásticos, a quantificação de porosidades acima de 20% pode indicar uma área de grande potencial exploratório (Monicard, 1980), o que define essa

propriedade como um aspecto petrofísico essencial para avaliação de reservas de petróleo, gás e água.

Apesar de ser amplamente utilizada, a análise microscópica apresenta incertezas intrínsecas no decorrer de seu processo metodológico. O cálculo de estimadores estatísticos (e.g. média, desvio padrão, variância) para amostras pequenas pode apresentar maior grau de incerteza. Nesta perspectiva, a utilização de ferramentas de reamostragem estatística configura-se como uma das alternativas disponíveis para a diminuição do erro associado aos estimadores e contornar os problemas associados ao número reduzidos de amostras disponíveis. Dentre as técnicas, o Bootstrap se destaca pela sua ampla utilização na esfera corporativa para a resolução de problemas das mais variadas áreas do conhecimento. No contexto associado a este trabalho, a técnica foi utilizada para avaliar o efeito do número de imagens sobre a quantificação do volume poroso, buscando justificar o número de imagens obtidas para cada lâmina.

4.3 ANÁLISE TEXTURAL EM ARENITOS

De maneira complementar aos processos conduzidos para a quantificação do espaço poroso, a análise textural também se institui como uma metodologia aplicada ao estudo de análogos de reservatórios. Apesar de serem dedicadas ao entendimento de parâmetros de microescala, ao serem diretamente integrados aos dados de meso e macroescala, tais métodos denotam-se essenciais para uma avaliação completa a respeito das propriedades petrofísicas presentes em bacias sedimentares com potencial exploratório para a produção de petróleo e gás, o que certamente configura a metodologia aplicada no mercado corporativo.

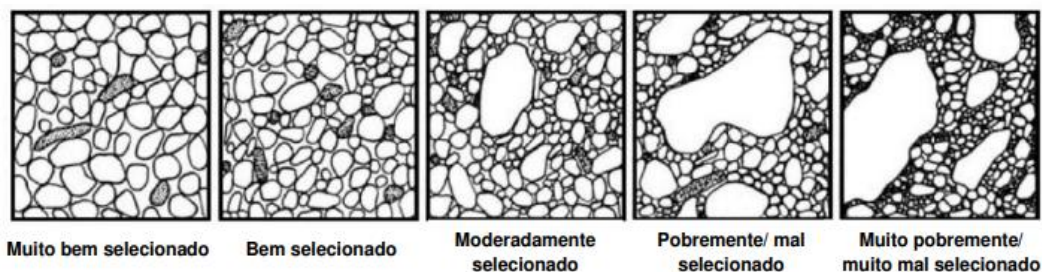
Apropriando-se da escala Udden–Wentworth (1922), Boogs (2009) classifica os sedimentos areníticos de acordo com a granulometria instituída entre o intervalo instituído entre 0,0625 e 2 mm. Deve-se pontuar que as características morfológicas e mineralógicas dos clastos que compõem as rochas areníticas possuem influência direta no seu arranjo estrutural, e

consequente, na distribuição de suas propriedades petrofísicas. Neste contexto, três aspectos texturais foram avaliados nas amostras de lâminas delgadas obtidas do afloramento da Formação Jaicós:

1. Grau de seleção granulométrica
2. Grau de arredondamento
3. Grau de esfericidade
4. Empacotamento

A identificação de propriedades texturais nas seis lâminas analisadas foi conduzida a partir da análise petrográfica. As tabelas de Compton (1962) fornecem o respaldo comparativo necessário para a classificação da textura das partículas presentes nas lâminas delgadas obtidas a partir do afloramento. Neste trabalho, o principal objetivo estabelecido foi a busca de caracteres qualitativos sobre as lâminas delgadas, sugerindo a influência de processos pré e pós-deposicionais sobre as propriedades aferidas. A seguir são apresentadas as figuras utilizadas como referência para avaliação do grau de seleção (Figura 35) e do grau de esfericidade e arredondamento dos grãos (Figura 36).

Figura 35. Quadro utilizado para avaliação da seleção granulométrica



Fonte: Extraída de Fiuza (2015)

Figura 36. Quadro utilizado para a análise do grau de arredondamento e esfericidade

| | | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------------|----------------|-------------|----------|--------------|
| Alta circularidade | | | | | | |
| Baixa circularidade | | | | | | |
| | Bem arredondado | Arredondado | Subarredondado | Subanguloso | Anguloso | Bem anguloso |

Fonte: Extraído de Fiuza (2015)

O entendimento da influência dos estágios sedimentares (intemperismo, erosão, transporte, deposição, soterramento e diagênese) sobre as características do arcabouço rochoso configura-se como um dos principais objetivos do estudo de análogos de reservatórios, além de pontuar a correlação estabelecida entre os ambientes deposicionais sobre a disposição de fácies sedimentares na bacia. Ao serem integradas com a revisão bibliográfica fundamental, as análises descritas na metodologia forneceram o direcionamento necessário para a aquisição dos resultados obtidos no decorrer do estudo (seção posterior), permitindo a elaboração de inferências conclusivas.

4.4 ANÁLISE DAS TIPOLOGIAS DE POROSIDADE

Inserido no escopo dedicado ao entendimento da influência dos processos pré e pós-deposicionais sobre as propriedades dos arenitos do afloramento, as tipologias de porosidades foram identificadas a partir da análise microscópica das seis seções delgadas estudadas no trabalho. Ao tratarmos de um parâmetro petrofísico adimensional e sensível aos inúmeros processos físico-químicos posteriores a deposição dos grãos na bacia, os sistemas porosos podem adquirir uma grande variedade morfológica e estrutural. Aplicado ao estudo de rochas siliciclásticas, o espaço interpartículas configura-se como a tipologia de porosidade predominante (Rayana, 2015). De acordo pela forma como foi modelada na bacia sedimentar, a porosidade pode ser subdividida em primária ou secundária. A definição conceitual associada à divisão supracitada é descrita na tabela 6.

Tabela 6. Tipologias de porosidade

| Porosidade | Origem |
|-----------------------------|--|
| Primária (ou Singenética) | <ul style="list-style-type: none"> - Gerada a partir da sedimentação dos grãos na bacia (preservação dos espaços intergrãos durante a deposição), ou preservando a porosidade intragrãos originais. - Pode ser inter ou intragranular |
| Secundária (ou epigenética) | <ul style="list-style-type: none"> - Formada a partir da atuação de processos pós-deposicionais (eventos diagenéticos) sobre a bacia sedimentar, tais como a percolação de fluidos que podem gerar dissolução, fraturamento ou outros processos pós-deposicionais |

Gerada a partir da permanência do espaço intergranular, ou como fruto da preservação do espaço intragranular inerente ao grão transportado, a porosidade primária (singenética) é moldada a partir de processos atuantes durante a deposição dos sedimentos na bacia sedimentar. De outro modo, a porosidade secundária (epigenética) pode ser interpretada como fruto da atuação de eventos pós-deposicionais sobre a bacia, o que certamente corrobora para uma remodelagem do espaço poroso no arcabouço.

Assim como os poros intergranulares, o espaço poroso intragranular também pode ser modelado a partir de eventos diagenéticos, tais como a dissolução parcial dos grãos como consequência da percolação de fluidos. Característico de rochas carbonáticas, os poros intragranulares configuram-se como propriedade inerente aos sedimentos presentes nesse tipo de arcabouço e contribuem diretamente para o incremento do volume poroso. Em complemento aos conceitos teóricos apresentado na tabela 6, a tabela 7 ilustra uma classificação mais detalhada a respeito das tipologias de porosidade.

Tabela 7. Classificação de porosidade descrita por Murray (1960).

| | Tipo | Origem |
|---|--|---|
| A. Primária ou singenética (sindeposicional) | <ul style="list-style-type: none"> a) intergranular ou interpartículas b) intragranular ou intrapartículas | Sedimentação |
| B. Secundária ou epigenética (pós-deposicional) | <ul style="list-style-type: none"> a) intercristalina b) fenestral (janelas) | Cimentação |
| | <ul style="list-style-type: none"> c) de molde d) vesicular e) de fratura | Dissolução, movimentação tectônica, compactação ou desidratação |

Fonte: Extraído de Suguio (2003).

A partir da observação analítica dos espaços porosos, uma caracterização descritiva foi elaborada para cada lâmina analisada, buscando encontrar associações entre as tipologias de poros, aspectos texturais e volume poroso para cada seção delgada.

5. RESULTADOS

O estudo de análogos de reservatórios de hidrocarbonetos envolveu tanto análises bibliográficas sobre estudos de afloramentos, quanto análise de fácies e de atributos físicos de amostras coletadas de um afloramento da Formação Jaicós (Grupo Serra Grande), situado no município de São Benedito (Ceará). A partir de todas as análises efetuadas no procedimento experimental, esta seção busca apresentar os resultados obtidos no intuito de elaborar as inferências conclusivas a respeito das propriedades do afloramento estudado.

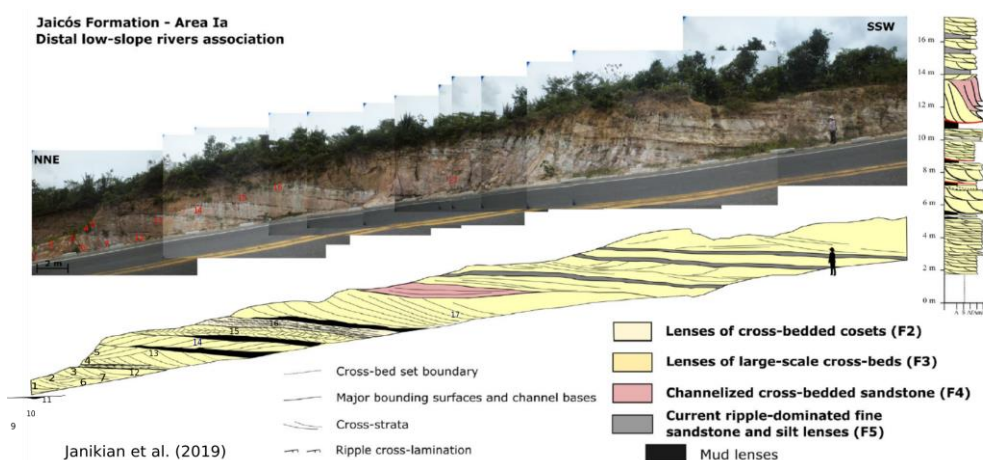
5.1. Caracterização descritiva dos arenitos da Formação Jaicós na localidade de São Benedito (Bacia do Parnaíba, Ceará)

O estudo do afloramento envolveu a análise de mesoescala das fácies sedimentares (incluindo a compreensão dos processos formadores), e análises de microescala, com o estudo das características texturais além da tipologia e volume de poros para as fácies sedimentares estudadas.

5.1. a) Análise das Fácies Sedimentares

O afloramento estudado localiza-se no município de São Benedito (Ceará), e pertence à Formação Jaicós do Grupo Serra Grande (Bacia do Parnaíba).

Figura 37. Formação Jaicós, ladeira da lapa (CE).



Fonte: Este trabalho

A tabela 5 apresenta as características descritivas a respeito das fácies da qual cada lâmina foi extraída.

Tabela 8. Dados das amostras da Formação Jaicós (São Benedito, CE). Em destaque as amostras analisadas.

| Dados das amostras da Formação Jaicós (município São Benedito, CE) | | | |
|--|--|---|---|
| Amostra | Fácies | OBS | |
| SG-III-01 | arenito fino a médio, com estratificação cruzada acanalada (pequeno a médio porte) | Séries de camadas 1, 2 e 3 passam lateralmente as fácies das amostras 6, 7 e 12 respectivamente (correspondendo a fácies sedimentares diferentes) | As amostras pertencem ao Elemento Arquitetural F3 * Amostra SG-16 pertence ao Elemento Arquitetural F2* (* Janikian et al., 2019) |
| SG-III-02 | arenito fino a médio, com estratificação cruzada acanalada (pequeno a médio porte) | | |
| SG-III-03 | arenito fino a médio, com estratificação cruzada acanalada (pequeno a médio porte) | | |
| SG-III-04 | arenito grosso com estratificação cruzada (grande porte), com níveis milimétricos esbranquiçados e oxidados intercalados | Mesma série da camada da amostra 5 (amostra 4 é a porção basal desta camada). Continuação lateral da fácies da amostra 13 | |
| SG-III-05 | arenito grosso, com estratificação cruzada (grande porte), gradando para o topo para arenito muito grosso com grânulos | | |
| SG-III-06 | arenito grosso com estratificação cruzada acanalada de médio porte | Mesma camada da amostra 12 | |
| SG-III-07 | arenito grosso com estratificação cruzada acanalada de médio porte | Mesmo intervalo dos pto 6 e 12 | |
| SG-III-08 | arenito médio siltooso, com estratificação | amostra 8 - próximo à amostra 9 | |
| SG-III-09 | arenito médio siltooso, com estratificação cruzada acanalada (médio porte) | | |
| SG-III-10 | arenito médio siltooso, com estratificação cruzada acanalada (médio porte) | Mesma série de camada da amostra 11 (amostra 10 está posicionada na base) | |
| SG-III-11 | arenito fino oxidado siltooso, com estratificação cruzada acanalada (médio porte) | Mesmo série de camadas com cruzadas acanaladas (de médio porte) das amostras 6 e 12 (amostra 11 está posicionada abaixo das fácies 6 e 12) | |
| SG-III-12 | arenito fino siltooso, com grânulos, com estratificação cruzada acanalada de médio porte | Fácies de topo da camada da amostra 3 | |
| SG-III-13 | arenito médio, siltooso, com estratificação cruzada acanalada (grande porte) | Fácies de topo da camada das amostras 4 e 5 | |
| SG-III-14 | arenito grosso com estratificação cruzada acanalada acanalada (grande porte) | | |
| SG-III-15 | arenito fino, com estratificação cruzada acanalada (pequeno porte, talvez duna composta) | | |
| SG-III-16 | arenito médio, com estratificação cruzada acanalada (pequeno porte, talvez duna composta) | | |
| SG-III-17 | arenito médio, com estratificação cruzada acanalada, de grande porte (acima de 2 metros) | | |

Com exceção da amostra SG-III-16 (pertencente ao elemento arquitetural F2), descritos por Janikian et al (2019), todas as lâminas analisadas são pertencentes à arquitetura F3 (Figura 37). Deve-se pontuar que as fácies estudadas apresentam estratificação cruzada acanalada, sendo particularizadas por variações na granulometria de seus grãos.

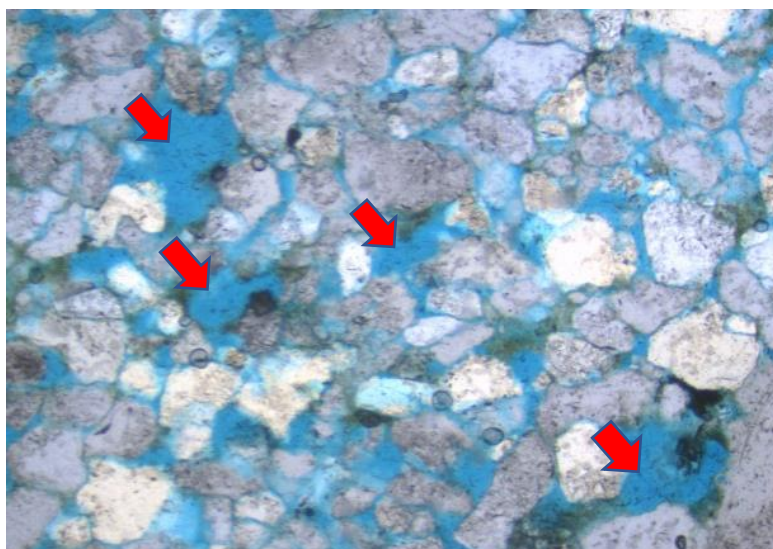
5.1.b) Análise das tipologias de porosidade

A atuação de processos diagenéticos foi denotada em todas as lâminas analisadas. Por se tratar de um parâmetro sensível a quaisquer tipos de alterações no ambiente de sedimentação ou eventos pós-deposicionais, as tipologias de porosidade sugeridas são vistas como um reflexo da atuação de tais agentes de transformação. De acordo com a análise efetuada, foi denotado o predomínio de porosidade secundária intergrãos, na qual a percolação de fluidos foi sugerida como o principal fator responsável pela formação de tais tipologias, em função da dissolução parcial ou total de grãos e cimento, além da geração de fraturamentos (observados na amostra SG-III-15).

I. Amostra SG – III – 2

A aliarmos os aspectos texturais e a proporção média do espaço poroso aferido na amostra, sugere-se um grande potencial para o armazenamento de hidrocarbonetos. A tipologias de espaços porosos apontam para o predomínio da porosidade secundária possivelmente conectada a dissolução total das partículas na bacia (Figura 38).

Figura 38. Pontos de porosidade secundária na amostra SG-III-2. O formato e a presença de grãos ao redor do espaço poroso sugerem a dissolução a partir da percolação de fluidos sobre a organização dos grãos.

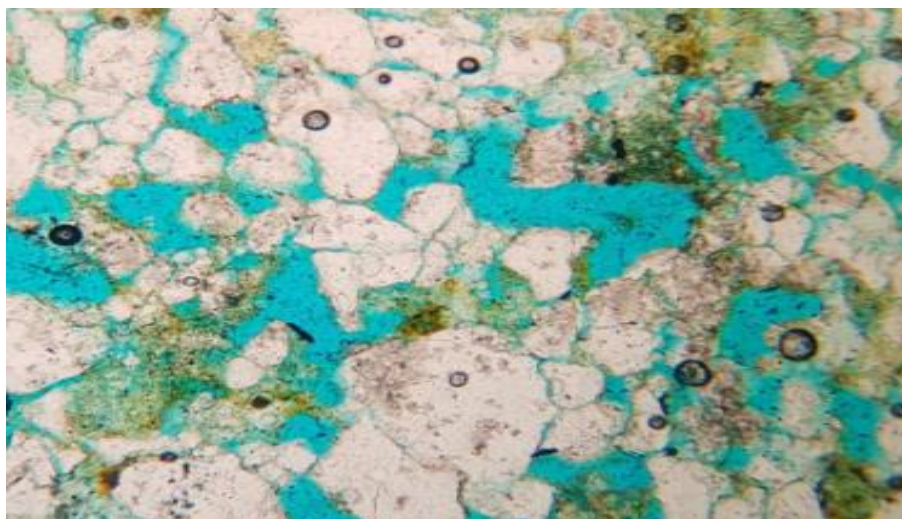


Fonte: Este trabalho

II. Amostra SG – III – 9

As consequências associadas a uma pobre seleção granulométrica foram pontuadas na amostra SG-III-9 que, por sua vez, apresentou um volume poroso reduzido. Apesar disso, também foi possível identificar o predomínio da porosidade causada pela dissolução parcial ou total dos grãos da fração areia. A presença de elementos esverdeados na figura 39 também ressalta vestígios de componentes argilosos no arcabouço.

Figura 39. Regiões de porosidade secundária presentes na amostra SG-III-9. A má seleção granulométrica é apresentada como um fator para a diminuição do espaço poroso aferido na amostra.

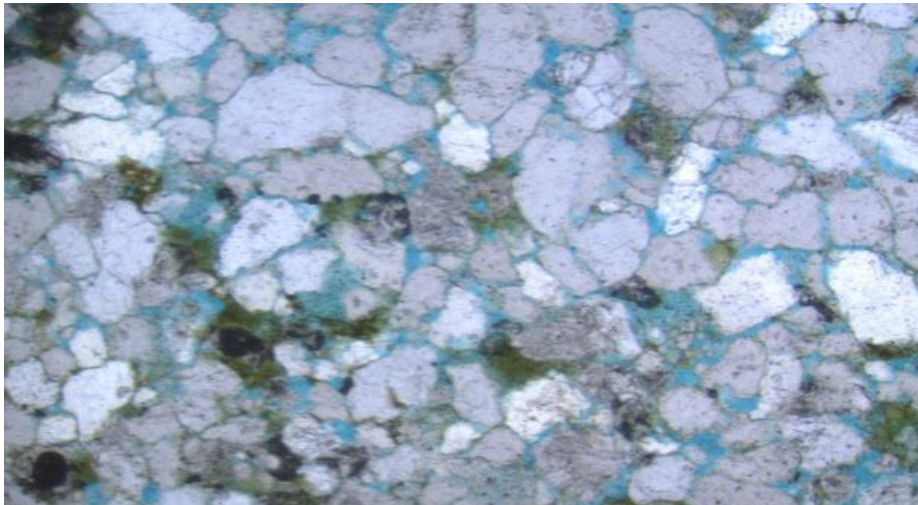


Fonte: Este trabalho

III. Amostra SG – III – 12

Ao aferirmos as tipologias de porosidade presentes na amostra, denota-se o predomínio de porosidade secundária associadas ao alívio de pressão sobre o arcabouço e a dissolução total ou parcial. A redução do volume poroso (descrito no item 5.1.d) pode estar associada com uma maior proximidade entre os grãos (Figura 40), sugerindo um maior contato entre as partículas que compõem o arcabouço.

Figura 40. O empacotamento moderado entre os grãos sugere a formação de porosidades secundárias a partir de um alívio de pressão sobre as partículas presentes na amostra.

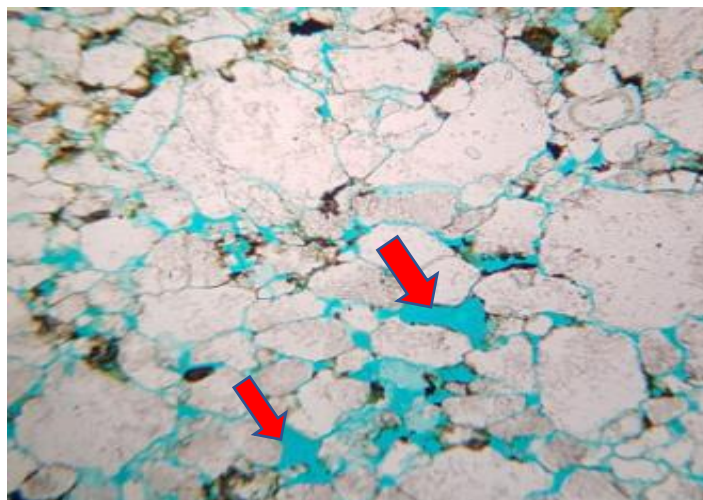


Fonte: Este trabalho

IV. Amostras SG – III – 13

A análise da amostra SG-III-13 indica o predomínio de porosidade secundária interpartículas, que também pode ser conectada com a percolação de fluidos sobre a organização dos grãos, corroborando para a dissolução total e parcial de clastos menos resistentes, indicados pela seta em vermelho (Figura 41).

Figura 41. Pontos de porosidade isolados podem sugerir dissolução de clastos que anteriormente preenchiam o espaço vazio.

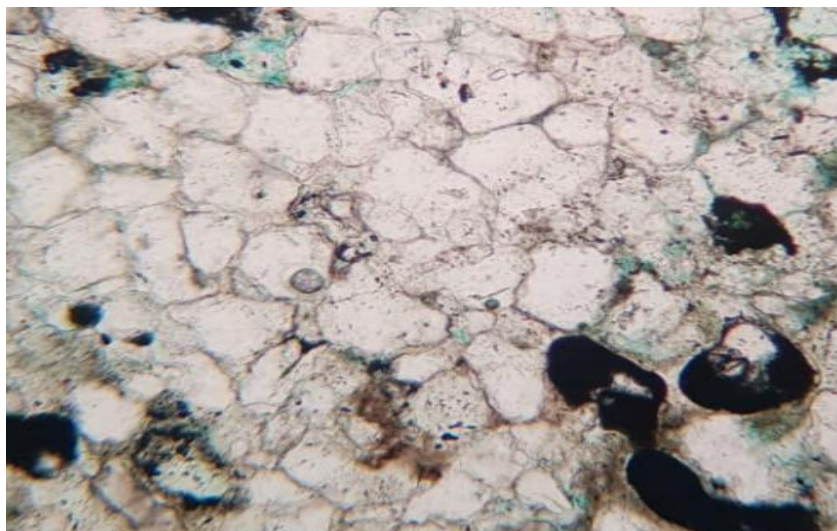


Fonte: Este trabalho

V. Amostra SG – III – 15

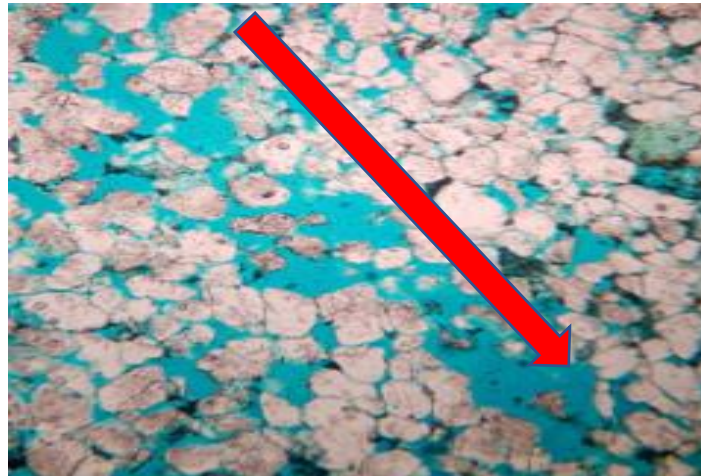
A partir da observação analítica, também se denota o predomínio da porosidade secundária sobre a amostra SG-III-15. A análise petrográfica mostra que há porções mais cimentadas na rocha (Figura 42), além de um alinhamento de espaço poroso que pode indicar um fraturamento (Figura 43). Essa feição, que pode indicar a ocorrência de uma fratura sobre o arcabouço granulométrico, possivelmente contribuiu para o incremento do volume poroso, de 27,029%. A constatação da aparição de cimento no arcabouço (Figura 42) também pode ser identificado como um vestígio da influência de eventos diagenéticos sobre os arenitos, não identificado nas demais lâminas em função da dissolução do cimento (além de alguns grãos) que estas sofreram.

Figura 42. Região onde se identifica o crescimento de cimento entre os grãos da amostra SG-III-15, o que certamente influiu sobre a proporção do espaço poroso aferido.



Fonte: Este trabalho

Figura 43. Rastro direcional de porosidade aferido da lâmina pode indicar um fraturamento pós-deposicional.

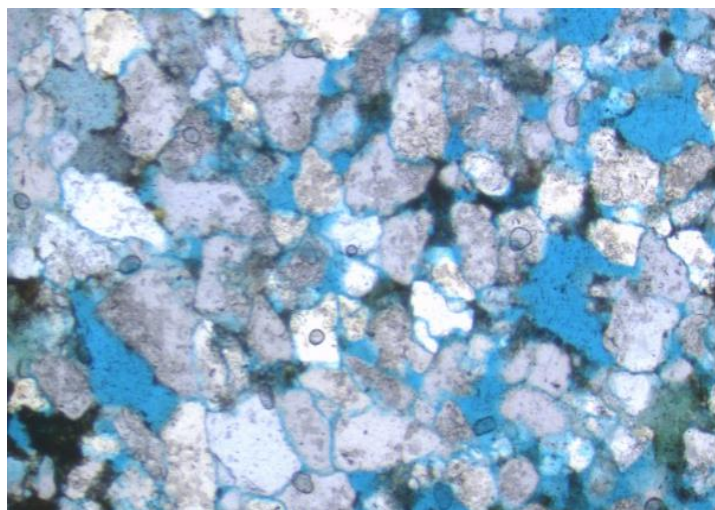


Fonte: Este Trabalho

VI. Amostra SG – III – 16

Finalmente, ao conectarmos os aspectos texturais e as tipologias de porosidade da lâmina SG-III-16, é possível justificar a elevada proporção do espaço poroso aferido no arcabouço. Nota-se o predomínio de porosidades secundárias associadas a dissolução parcial e total dos clastos (Figura 44).

Figura 44. Porosidades secundárias associadas a dissolução parcial e total na amostra SG-III-16.

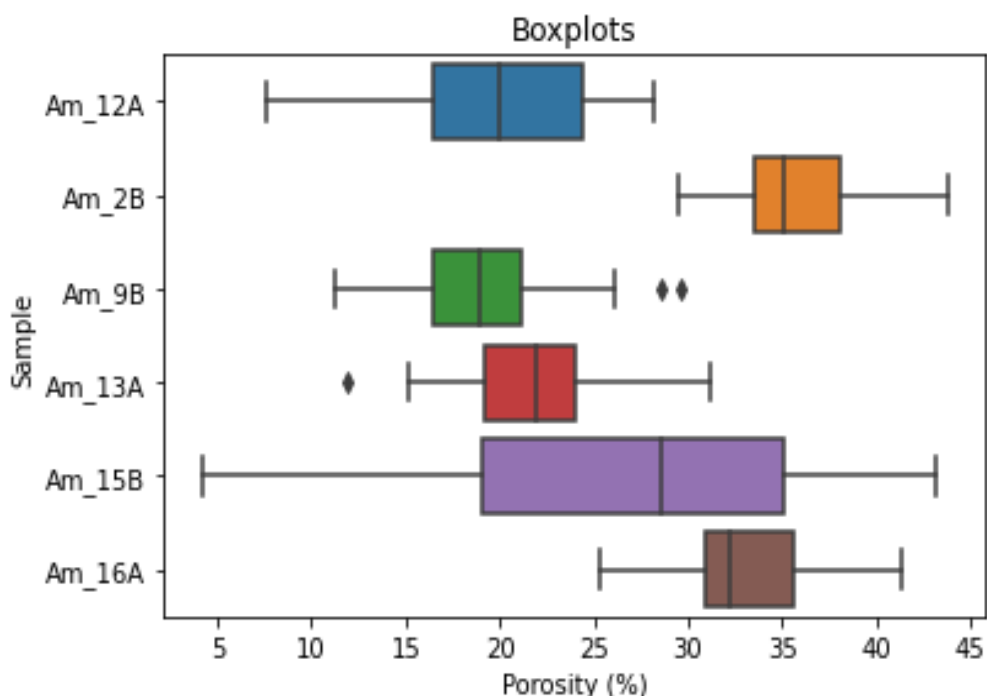


Fonte: Este trabalho.

5.1.c) Análise do Volume de Poro

Para cada uma das seis amostras analisadas, a porosidade foi quantificada a partir da segmentação de imagem efetuada no software LAS aplicado ao processamento digital. De modo inicial, foi denotado um volume considerável em todas as lâminas analisadas, em conformidade com as propriedades petrofísicas de reservatórios siliciclásticos. Através de um código em Python, os valores Boxplots de porosidade para cada amostra foram inseridos na figura 45.

Figura 45. Compilação dos boxplots de porosidade obtidos para cada amostra.



Fonte: Este Trabalho

Instituído como uma ferramenta estatística, o diagrama de caixas (*boxplot*) apresenta-se como forma de visualização gráfica para variáveis quantitativas. A interpretação desse tipo de diagrama está interligada à observação dos seguintes elementos:

- Mediana – Linha central que divide a distribuição em 50%
- 1º Quartil (Q1) e 3º Quartil (Q3)
- Limites máximo e mínimo

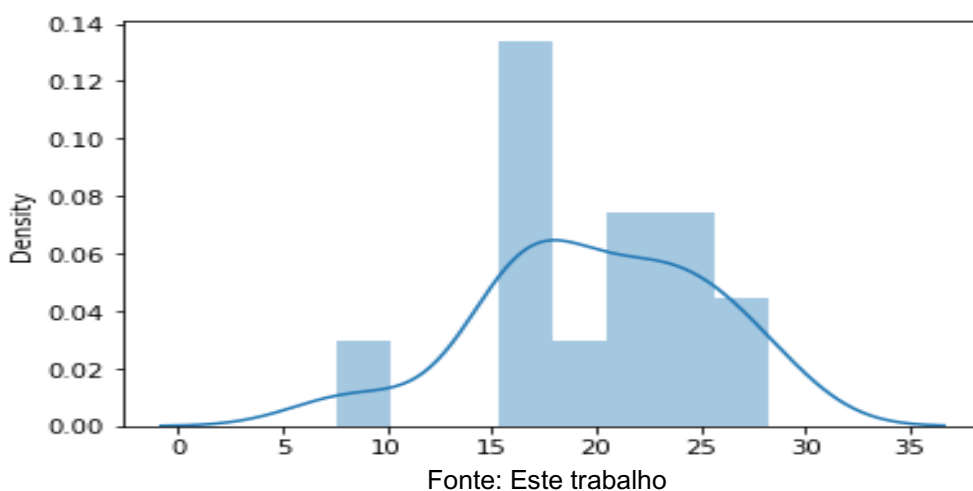
- Amplitude interquartil

A partir disso, é possível conectar as propriedades texturais e as tipologias de porosidade aferidas para cada lâmina com a proporção de espaço poroso quantificado em seu arcabouço. A seguir são apresentadas as curvas de distribuição da porosidade para cada amostra.

1. Amostra SG-III-12

Média +- Erro Padrão da Média = (19.983 +-1.053) %

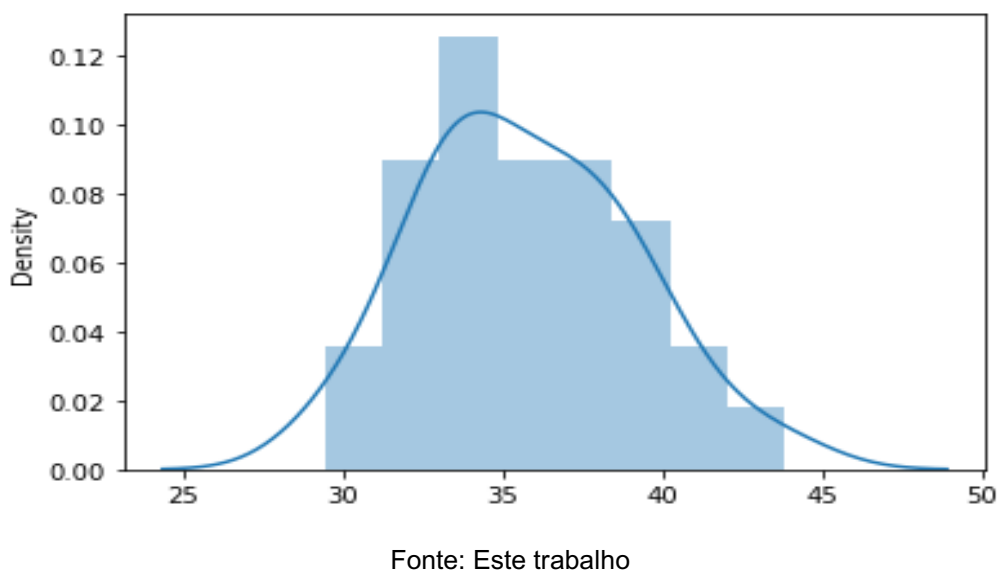
Figura 46. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-12.



2. Amostra SG-III-2

Média +- Erro Padrão da Média = (35,749 +-0.604) %

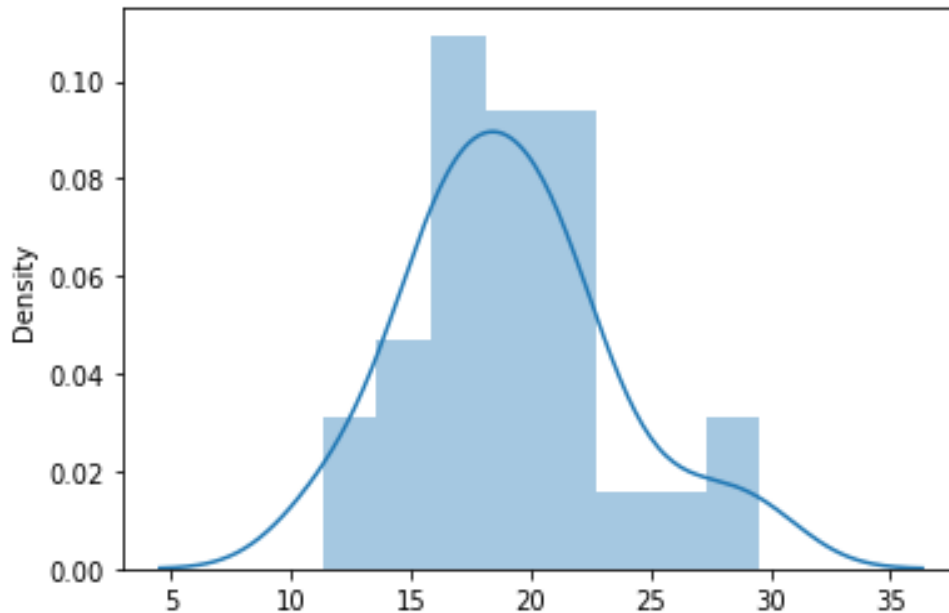
Figura 47. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-2.



3. Amostra SG-III-9

Média +- Erro Padrão da média = (19,181 +- 0,83) %

Figura 48. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-9.

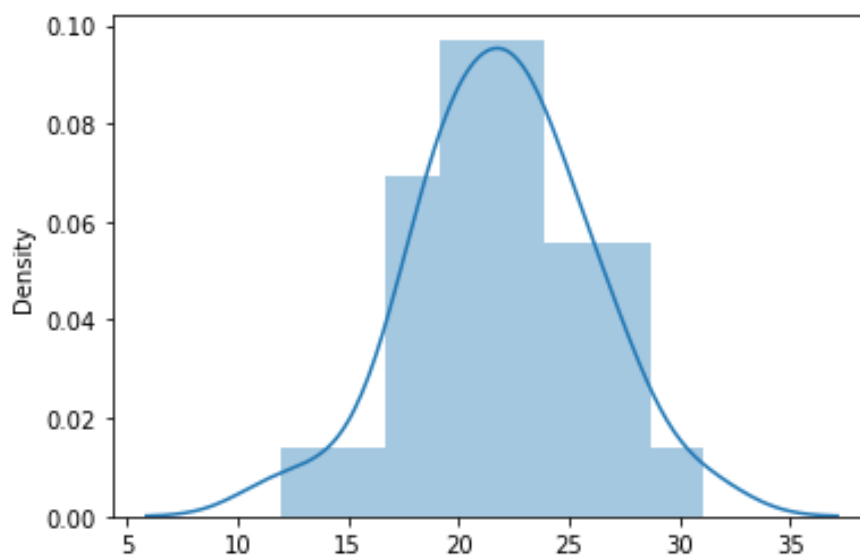


Fonte: Este trabalho

4. Amostra SG-III-13

Média = 21,927+-0.726 %

Figura 49. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-13

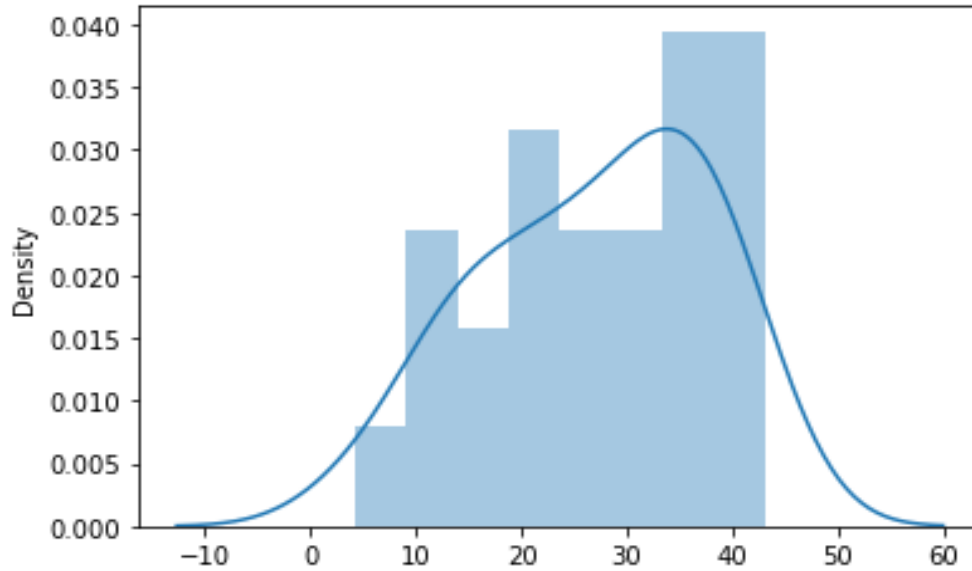


Fonte: Este trabalho

5. Amostra SG-III-15

Média +- erro padrão da média = (27.029 +- 2.113) %

Figura 50. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-15.

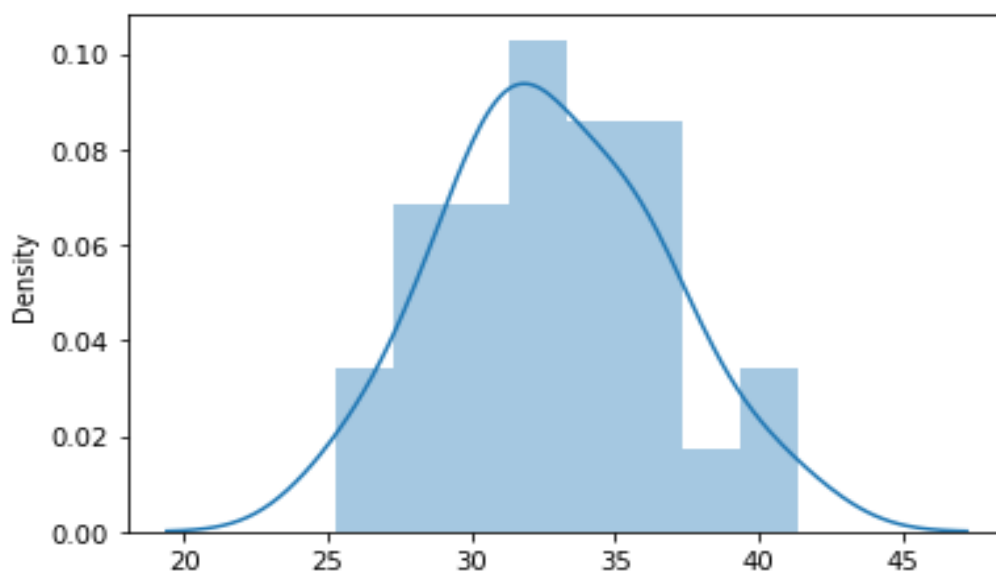


Fonte: Este trabalho.

6. Amostra SG-III-16

Média +- Erro Padrão da Média = (32.812+-0.71) %

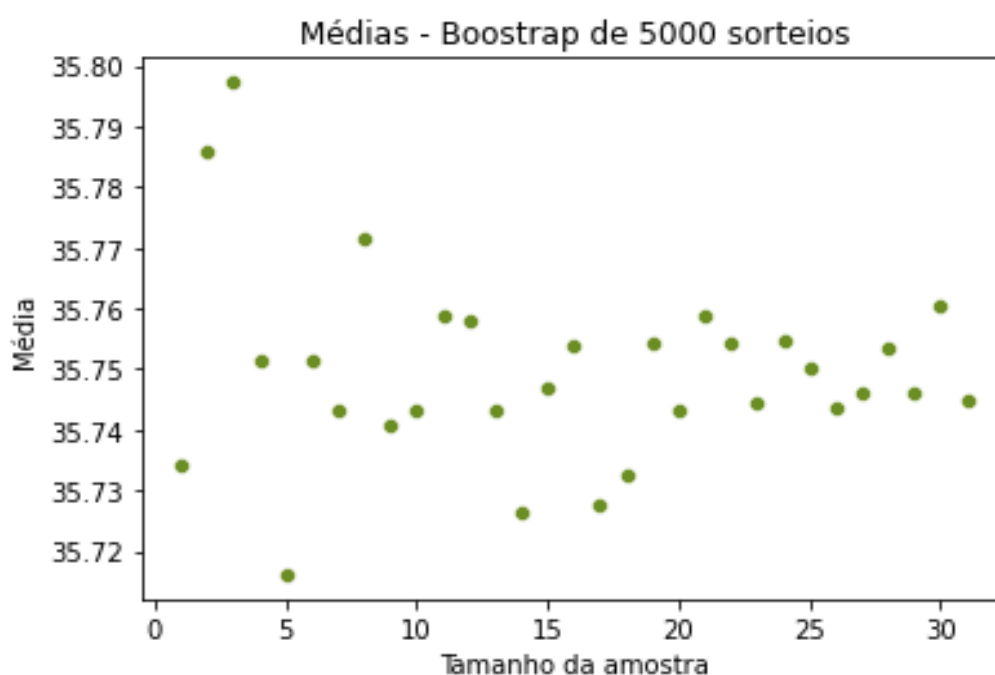
Figura 51. Distribuição geral de porosidade para a amostra SG-III-16.



Fonte: Este Trabalho

No intuito de avaliar o efeito do número de imagens sobre a quantificação do espaço, a técnica do bootstrap foi aplicada para realçar a confiança dos estimadores estatísticos obtidos. Em relação a amostra SG-III-2, o bootstrap para 5000 sorteios, tomando subconjuntos aleatórios de tamanho 5, indicou uma tendência de aproximação dos valores de média dos conjuntos sorteados com a média geral da distribuição.

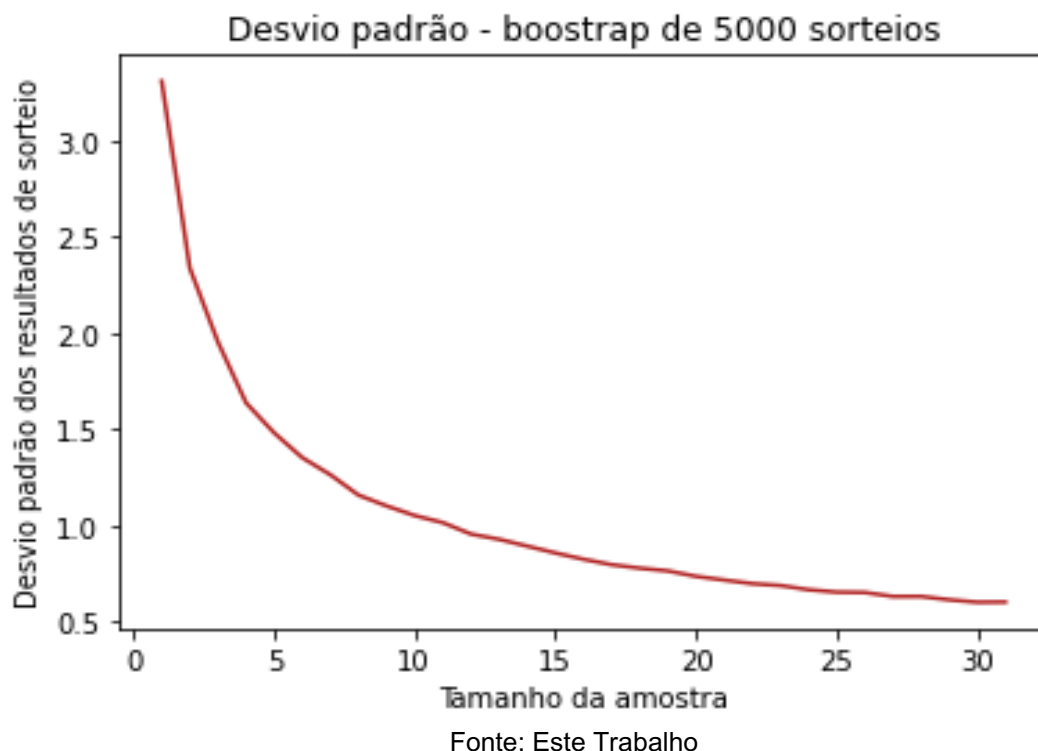
Figura 52. Bootstrap conduzido para a amostra SG-III-2.



Fonte: Este Trabalho

Essa tendência ocorreu de acordo com o aumento do número de amostras disponíveis para a quantificação. Além disso, foi notado uma redução expressiva do desvio padrão amostral em concomitância com o aumento do número de amostras (imagens). Neste caso, deve-se enfatizar os efeitos negativos associados ao estudo de um número reduzido de amostras para o entendimento de populações estatísticas. A mesma tendência foi observada em todas as lâminas analisadas durante a confecção do estudo, apresentando a fundamentação estatística complementar a metodologia adotada por Gesicki (2009).

Figura 53. Bootstrap conduzido para a amostra SG-III-2 (Avaliação do Desvio Padrão).



5.1.d) Análise Textural

Na busca pela identificação de aspectos físicos, de forma qualitativa, a granulometria de todas as amostras analisadas indica a sua origem associada a arenitos finos e médios, o que expõe as características das fácies sedimentares a partir da qual as lâminas foram elaboradas. No entanto, a presença de grãos de maior granulometria em determinadas porções das lâminas pode sugerir uma variação da energia associada ao elemento de transporte dos sedimentos até a bacia. Em conformidade com o respaldo visual fornecido pela figura 35, as lâminas delgadas apresentaram uma boa seleção granulométrica, com exceção da fácies SG-III-12. Deve-se pontuar que essa propriedade textural indica uma menor variação da granulometria dos grãos contidos no arcabouço rochoso, contribuindo diretamente com os aspectos de porosidade e permeabilidade de bacias sedimentares, caso não ocorram processos diagenéticos que suprimam a porosidade, como a cimentação.

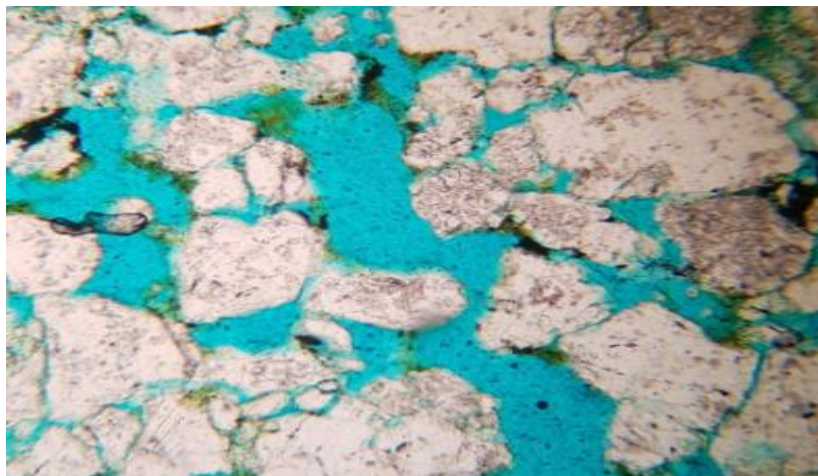
Em relação ao grau de arredondamento, notou-se um predomínio de clastos subarredondados e subangulosos sobre as lâminas avaliadas, permitindo inferir um tempo médio de transporte até a bacia. Por fim, aferiu-se uma alta esfericidade associada aos fragmentos detríticos presentes nas amostras coletadas, mas também foi destacado a presença de muitos grãos não esféricos sobre todas as lâminas, com predomínio na lâmina SG-III-12.

De acordo com a identificação de aspectos texturais - seleção granulométrica, arredondamento e esfericidade - foi possível pontuar a influência dos estágios sedimentares sobre os aspectos morfológicos nos grãos depositados. Somado a isso, a análise também permitiu pontuar a possível atuação de eventos diagenéticos e alterações nas características paleoambiente de sedimentação, destacando-se a presença de cimento, grãos de maior granulometria e porosidades secundárias. caso não ocorram processos diagenéticos que destruam a porosidade, como a cimentação.

A. Amostra SG – III – 2

A amostra SG-III-2 é pertencente ao elemento arquitetural F3, portador de arenitos finos a médios com estratificação cruzada acanalada de pequeno a médio porte. Ao tratarmos de seus aspectos texturais, denota-se o predomínio de clastos subarredondados e de boa esfericidade, designados por uma moderada seleção granulométrica (Figura 54). Deve-se pontuar que a amostra apresentou o maior valor percentual médio associado ao volume poroso (35,749%) um grande percentual de espaço poroso.

Figura 54. Porção da lâmina SG-III-2 fotografada durante a análise textural, no qual é possível identificar os aspectos descritos.

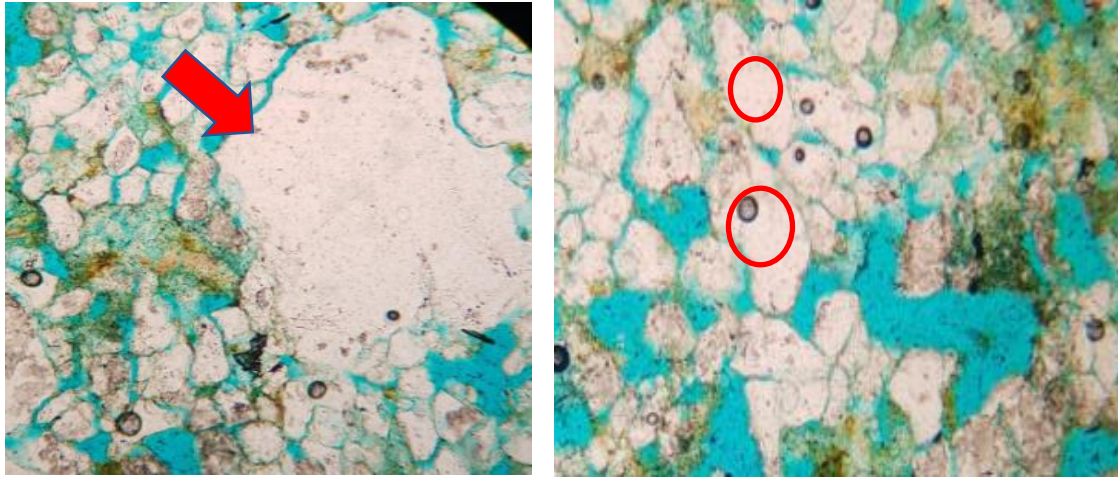


Fonte: Este Trabalho.

B. AMOSTRA SG – III – 9

A amostra SG-III-9 pertence ao elemento arquitetural F3. Sua fácies sedimentar é denotada pela presença de arenito médio siltoso, com estratificação cruzada acanalada, e com presença de grânulos. A observação de aspectos texturais demonstrou uma má seleção granulométrica entre os grãos, com o predomínio de clastos subangulosos e de esfericidade moderada (Figura 55). Nota-se que a presença de grânulos (não observada no afloramento) pode ser identificada na análise microscópica. Importante também destacar que a amostra apresentou o menor valor percentual médio associado ao volume poroso (19,1%), resultante da presença de material siltoso (ou argiloso - material escuro ou amarronzado, presente ao redor de alguns grãos e entre grãos), além da má seleção granulométrica.

Figura 55. Clasto de maior granulometria (fração de grânulos), identificado na lâmina SG-III-9, conforme descrito na análise mesoscópica demonstrando uma má seleção granulométrica no arcabouço (Esquerda), em conjunto com uma predominância de grãos alongados (Direita) e não esféricos.

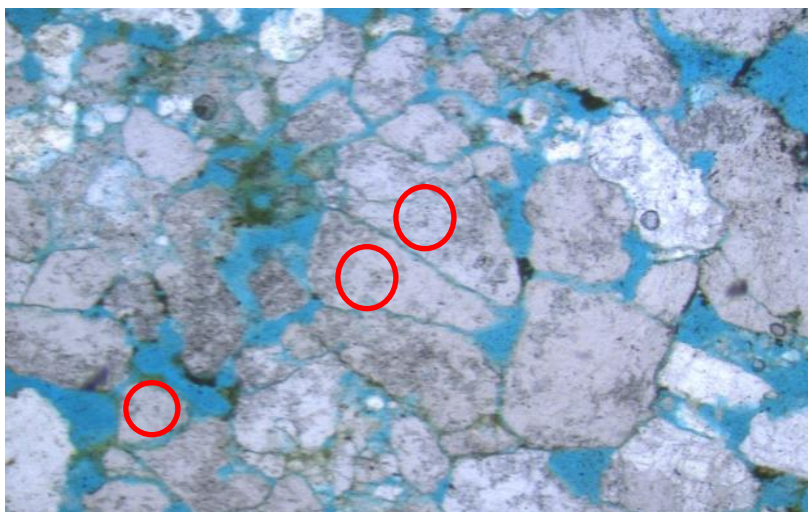


Fonte: Este trabalho

C. AMOSTRA SG – III – 12

Amostra pertencente ao elemento arquitetural F3. Fácies composta por arenito fino siltoso, com grânulos, dotada de estratificação cruzada acanalada de médio porte. Destaca-se o predomínio de clastos subarredondados e de esfericidade moderada, com grãos pobremente selecionados (Figura 56). Notou-se uma maior proximidade entre as partículas no decorrer da lâmina (predomínio de contato planar), demonstrando o alto grau de compactação mecânica que este depósito sofreu e, aparentemente, sem evidência de uma compactação química. O volume de espaço poroso, com 19,983%, pode estar associado tanto à presença de material siltoso (identificado tanto no afloramento quanto em lâmina), além da má seleção granulométrica, o que certamente corroborou para a diminuição do espaço poroso.

Figura 56. Porção fotografada da lâmina SG-III-12, denotando a presença de grãos alongados de maior granulometria (Pobrememente selecionados).

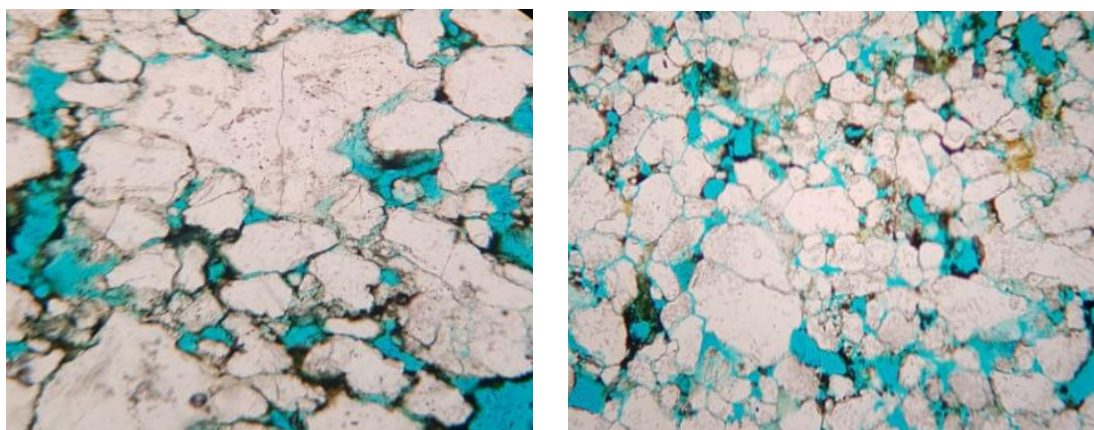


Fonte: Este trabalho

D. AMOSTRA SG – III – 13

A amostra SG-III-13 é integrante do elemento arquitetural F3. Sua fácies sedimentar é denotada por arenitos médios, siltosos, portadores de estratificação cruzada acanalada de grande porte. Observa-se também o predomínio do contato planar entre os grãos. A análise petrográfica demonstrou uma má seleção granulométrica entre os grãos que, em sua maioria apresentavam formas subangulosas e pouco esféricas (Figura 57). É possível também verificar a presença de cimentação em algumas porções da lâmina que, associada à presença de material siltoso ou argiloso (material escuro ao redor dos grãos, figura 57), confere um volume poroso de 21, 927%.

Figura 57. Áreas fotografada da amostra SG-III-13, demonstrando uma má seleção granulométrica entre os grãos, associado a presença de clastos alongados e subangulosos.

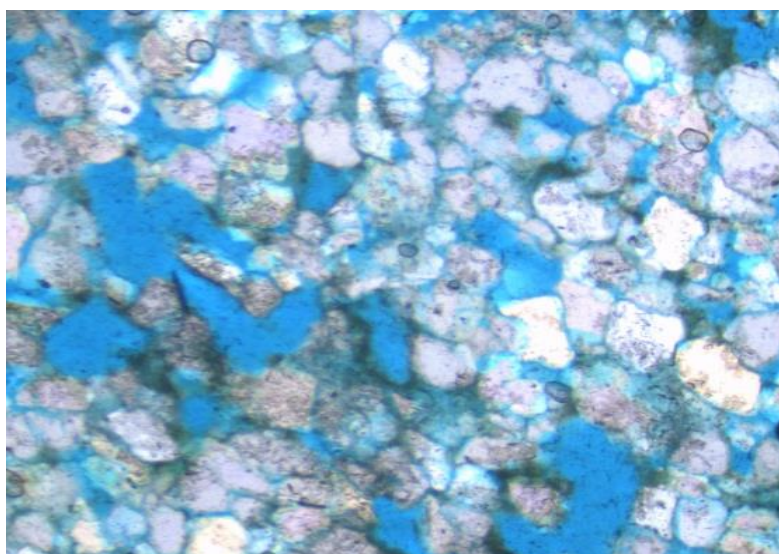


Fonte: Este trabalho

E. AMOSTRA SG – III – 15

A amostra SG – III – 15 também pertence ao elemento F3. Sua fácies está diretamente associada a presença de arenitos finos com estratificação cruzada acanalada. A análise da amostra permite a identificação de uma boa seleção granulométrica entre os clastos, com o predomínio de clastos subarredondados e de boa esfericidade. Mesmo apresentando uma granulometria fina e cimentação (Figuras 42 e 43), deve-se salientar uma boa proporção de espaço poroso intergrãos no conjunto analisado, de 27,029%, resultante do processo de fraturamento que sofreu (vide Figura 43).

Figura 58. Área fotografada da lâmina SG-III-15, no qual é possível identificar clastos subarredondados e esféricos.

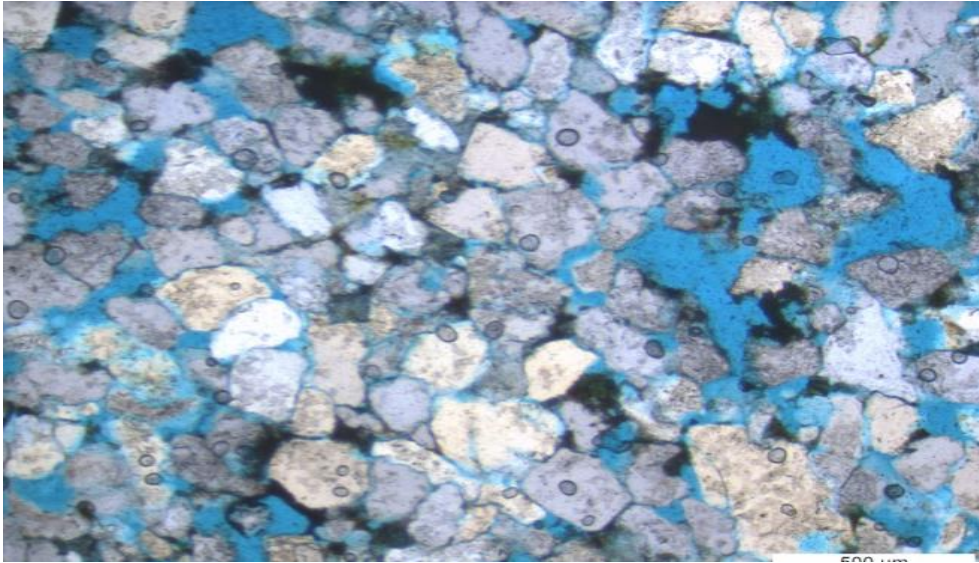


Fonte: Este trabalho

F. MOSTRA SG – III - 16

Por fim, destacam-se entre os caracteres petrográficos da amostra SG-III-16 como a única integrante do elemento arquitetural F2. Sua fácies é caracterizada pela presença de arenitos médios de estratificação cruzada acanalada de pequeno porte. A busca por aspectos texturais identificou a predominância de clastos subangulosos e esféricos sobre a lâmina, conectados a uma moderada seleção granulométrica e contato planar entre grãos (Figura 59). O volume poroso apresenta 32,812%.

Figura 59. Foto obtida a partir da lâmina SG-III-16, demonstrando o predomínio de clastos subangulosos e alongados sobre o arcabouço. Também é possível identificar uma moderada seleção granulométrica entre os grãos.



Fonte: Este trabalho

6. DISCUSSÃO

6.1 A IMPORTÂNCIA DA PERSPECTIVA HOLÍSTICA SOBRE O ESTUDO DE ANÁLOGOS DE RESERVATÓRIO

Em primeiro plano, deve-se destacar a importância de uma abordagem interdisciplinar sobre o estudo avaliativo de sistemas dinâmicos. Estabelecida como uma ciência dedicada ao estudo de bacia sedimentares, a sedimentologia é designada como uma área de aplicação do conhecimento construído em outros campos científicos destacando-se a biologia, matemática, estatística, física e química. Apesar disso, a sedimentologia também se apropria de conhecimentos específicos inseridos em diversos ramos do conhecimento, tais como a geofísica, paleontologia, geomorfologia e a mecânica dos fluidos (Figura 1). Deste modo, no intuito de estabelecer relações entre múltiplas variáveis por intermédio de perspectivas holísticas, denota-se a importância da adoção de uma abordagem transdisciplinar na caracterização descritiva de análogos de reservatório.

6.2 DEBILIDADES ASSOCIADAS AO ESTUDO DE PARÂMETROS PETROFÍSICOS ATRAVÉS DE ANÁLISE MICROSCÓPICA

Realçado pelos objetivos previamente definidos, este trabalho buscou compreender as conexões instituídas entre as propriedades físico-químicas de rochas siliciclásticas a partir da observação de parâmetros de microescala. Apesar de sua grande utilidade prática, uma das problemáticas associadas a confecção da análise petrográfica está inserido na determinação de propriedades tridimensionais (macroescala) a partir da análise de elementos bidimensionais (microescala). Aplicado ao estudo avaliativo completo sobre as características de reservatórios, no intuito de contornar a questão apresentada, propõe-se a integração entre dados quantitativos e qualitativos obtidos através de análise microscópica (aqui realizadas) e os métodos analíticos de meso e macroescala. Embora conte com um número reduzido de amostras, a implementação das análises sobre as seis lâminas permitiu aferir as principais características físicas de suas respectivas fácies sedimentares e identificar as

propriedades favorecem o espaço poroso em rochas terrigenas. Nesta perspectiva, deve-se salientar que a utilização de ferramentas estatísticas visuais (e.g. gráficos, tabelas) e de um software (LAS) dedicado à análise de imagem digital contribuíram diretamente para elaboração e interpretação dos produtos experimentais obtidos, o que de fato incrementou a fundamentação técnica do estudo realizado.

6.3 AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES TEXTURAIS E PETROFÍSICAS EM ARENITOS

Considerando as ferramentas científicas e tecnológicas disponíveis na atualidade, inúmeras metodologias podem ser aplicadas ao contexto de avaliação de propriedades petrofísicas em perspectiva microscópica. Certamente, o rigor metodológico associado a outros tipos de análise pode corroborar para um aumento da confiabilidade avaliativa do estudo e otimizar a descrição de aspectos qualitativos. Neste contexto, a indústria do petróleo busca otimizar a mobilização de ativos destinados ao descobrimento de novas reservas com elevada potencialidade de produção. De fato, os resultados obtidos foram condizentes com as características associadas aos arenitos que integram a Bacia do Parnaíba e reforçam o aumento das pesquisas dedicadas à avaliação do potencial exploratório de reservas de petróleo e gás na localidade.

A partir da análise interpretativa dos resultados obtidos é possível conectar todas as propriedades avaliadas nas seções delgadas. Em primeiro plano, nota-se que a presença de grãos pobremente selecionados corrobora diretamente para a diminuição do espaço poroso aferido na lâmina, tendência que pode ser observada nas amostras SG-III-9, SG-III-12 e SG-III-13. Somado a isso, deve-se pontuar a presença de material na fração silte nas três amostras supracitadas, o que também contribuiu para a redução do espaço poroso. Em segundo plano, a respeito das lâminas onde foram obtidas as maiores proporções de espaço poroso (SG-III-15, SG-III-2 e SG-III-16), deve-se destacar a predominância de uma granulometria moderadamente (observada na amostra SG-III-2) e bem selecionada (presente nas lâminas SG-III-15 e SG-III-16). Apesar da constatação do crescimento de cimento na lâmina SG-III-15, a

possível ocorrência de um fraturamento (vide Figura 43) sobre seu arcabouço (pós-deposicional) contribuiu para o aumento da porosidade do conjunto (27,029 %).

6.4 RELAÇÕES ESTABELECIDAS ENTRE A TIPOLOGIAS DE POROSIDADE, ASPECTOS TEXTURAIS E VOLUME DE POROS.

A fim de descrever as características físico-químicas dos arenitos que integram o afloramento e destacar a influência de processos pré e pós-deposicionais sobre suas fácies sedimentares, o estabelecimento de conexões entre as análises confeccionadas deve direcionar a coleta de informações sobre reservatórios formados em condições análogas na bacia. A tabela 8 compila a caracterização descritiva dos resultados obtidos em cada uma das lâminas analisadas, integrando os dados referentes às tipologias de porosidade, análise textural, volume de poros e os dados de mesoescala (fácies).

Tabela 9. Informações descritivas sobre as amostras analisadas.

| Amostra | Fácies | Descrição dos aspectos texturais | Porosidade Média (%) |
|----------------|--|---|-----------------------------|
| SG-III-2 | Arenito médio com estratificação cruzada acanalada de pequeno a médio porte. | <ul style="list-style-type: none"> - Moderada seleção granulométrica - Predomínio de clastos subangulosos e pouco esféricos. - Porosidade secundária causada por dissolução parcial e total de grãos. | 35,749 |
| SG-III-9 | Arenito médio siltoso com estratificação cruzada acanalada de médio porte. | <ul style="list-style-type: none"> - Grãos pobremente selecionados. - Clastos subangulosos e de baixa esfericidade. - Predomínio de porosidade secundária por dissolução total e parcial de grãos. - Predomínio do contato planar entre os grãos. | 19,181 |

| | | | |
|-----------|---|--|---------------|
| SG-III-12 | Arenito fino siltoso, com grânulos, com estratificação cruzada acanalada de médio porte | <ul style="list-style-type: none"> - Grãos pobremente selecionados - Clastos subarredondados e de relativa esfericidade. - Predomínio de porosidade secundárias causada por dissolução total e parcial de grãos. - Contatos planares entre os grãos sugere alto grau de compactação mecânica (sem ocorrência de compactação química). - A presença de material argiloso (ao redor dos grãos) em algumas regiões do arcabouço contribuiu para a redução do espaço poroso | 19,983 |
| SG-III-13 | Arenito médio, siltoso, com estratificação cruzada acanalada de grande porte | <ul style="list-style-type: none"> - Grãos pobremente selecionados. - Predomínio de clastos subangulosos e alongados (baixa esfericidade). - Porosidade secundária causada por dissolução total e parcial de grãos é predominante. - O contato planar entre os grãos sugere um alto grau de compactação mecânica na unidade sedimentar. - A presença de material argiloso (ao redor dos grãos), além de pouca cimentação, em algumas regiões do arcabouço contribuiu para a redução do espaço poroso. | 21,927 |
| SG-III-15 | Arenito fino com estratificação cruzada acanalada de pequeno porte (talvez duna composta) | <ul style="list-style-type: none"> - Granulometria bem selecionada. - Clastos subarredondados e de boa esfericidade. - Predomínio de porosidade secundária causada por dissolução, com a presença (local) de fraturamento. - Predominância de contato planar entre os clastos. - O crescimento de cimento em algumas regiões do arcabouço | 27,029 |

| | | | |
|-----------|--|--|---------------|
| | | contribuiu para a redução do espaço poroso. | |
| SG-III-16 | Arenito médio, com estratificação cruzada acanalada de pequeno porte (talvez duna composta). | <ul style="list-style-type: none"> - Boa seleção granulométrica. - Predomínio de clastos subangulosos e alongados (moderada a baixa esfericidade). - Porosidade secundária interpartículas é predominante no arcabouço. - Predomínio do contato pontual entre os grãos, o que sugere um menor grau de compactação mecânica. - Vestígios de componentes argilosos também estão presentes na amostra. | 32,812 |

7. CONCLUSÃO

Por intermédio da revisão bibliográfica, orientação para o prosseguimento de procedimentos experimentais e a aplicação de uma abordagem holística sobre o entendimento da temática apresentada, foi possível designar o complexo de interligações inseridas nos aspectos físicos e químicos do processo de estruturação de depósitos fluviais em bacias sedimentares. Neste contexto, a identificação da influência dos estágios sedimentares sobre as propriedades petrofísicas (e.g. volume e tipologias de porosidade, grau de arredondamento, seleção e esfericidade) dos depósitos areníticos que integram a Formação Jaicós formatam o objetivo do estudo.

Apesar de ter sido, em sua maioria, dedicado ao reconhecimento de aspectos em microescala, o trabalho em questão apropriou-se de uma extensa revisão bibliográfica, buscando identificar propriedades chave para fortalecimento da caracterização descritiva das seis lâminas analisadas. Os resultados obtidos permitem identificar as propriedades texturais que favorecem a estruturação do espaço poroso (observado nas lâminas SG-III-2, SG-III-15 e SG-III-16). Embora esteja diretamente atrelado à redução do volume poroso, a identificação de cimento na lâmina SG-III-15 contradiz os conceitos teóricos e indica a atuação de processos diagenéticos (fraturamento) na amostra. Deve-se salientar que a granulometria mal selecionada e a presença de material silteoso contribuiu diretamente para a diminuição do espaço poroso nas amostras SG-III-9, SG-III-12 e SG-III-13, confirmando as perspectivas conceituais fornecidas pela revisão bibliográfica.

Ademais, o reconhecimento de eventos pós-deposicionais (e.g. porosidades secundárias, crescimento de cimento, compactação mecânica) e possíveis alterações no paleoambiente colaboram para o incremento da credibilidade do estudo conduzido. O estudo das características de mesoescala (fácies sedimentares) presentes no afloramento, aliado à amplificação do conhecimento técnico-científico sobre suas particularidades e à identificação de propriedades petrofísicas de microescala, fornecem o respaldo introdutório para o direcionamento do estudo de bacias sedimentares formadas em condições análogas.

A aplicação de métodos estatísticos na tentativa de realçar as debilidades associadas à análise microscópica buscou identificar formas de incrementar a confiabilidade dos resultados obtidos. Apesar disso, foi possível denotar a influência dos processos de intemperismo, erosão, transporte, deposição e diagênese sobre todas as amostras analisadas. Também fica claro a importância da junção entre conhecimentos teóricos e a execução de processos práticos para a construção do conhecimento científico.

Instituído como um campo científico dedicado ao entendimento de sistemas dinâmicos e complexos, o estudo de análogos de reservatório pode ser designado pela sua importância econômica dentro do setor energético e no estudo dos paleoambientes de sedimentação. Fica evidente as particularidades presentes em estudos conduzidos a partir de uma abordagem interdisciplinar, sugerindo um modelo analítico inovador sobre novos trabalhos a serem desenvolvidos sobre a temática apresentada.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BOGGS, Jr.S, 2009. **Petrology of Sedimentary Rocks**. Cambridge University Press Second edition. 292p.
2. CUPERTINO, Daniel Fontoura. **Caracterização de propriedades do meio poroso em solo arenoso através de permo-porosímetro a gás** – Rio de Janeiro, 2005.
3. DANTAS, Henrique Vieira. **Aplicação de Técnicas Analíticas para Caracterização de Porosidade e Permeabilidade de Rochas Siliciclásticas**. TCC (Graduação - Bacharelado Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia do Mar) - Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo, 2021.
4. Dr. Mahesha & Prof.A. Balasubramanian. **Depositional Environments** - Centre for advanced studies in earth science university of mysore (2013).
5. EARLE, S. (2015). **Physical Geology**. Victoria, B.C.: BCcampus. Retrieved from <https://opentextbc.ca/geology/>.
6. FIUZA, Bernardo Oliveira. **Análise faciológica e petrografia de arenitos da Formação Macacu (Membro Porto das Caixas)** – Bacia do Macacu (RJ) / Bernardo Oliveira Fiuza – Rio de Janeiro: UFRJ, Instituto de Geociências, 2015.
7. FOLK, Robert L. **Petrology of Sedimentary Rocks**: 2. Ed. Austin, Texas: Editora Hemphill, 2002.
8. GESICKI, A.L.D.; et al. **Determinação quantitativa de parâmetros texturais de arenitos eólicos através de análise de imagens digitais de seções delgadas**. Revista Brasileira de Geociências, Vol.39, 2009.
9. HENRIQUE, P.J. **Geologia Geral**, 7ª edição. Rio de Janeiro, RJ: Grupo GEN, 2017.
10. MIALL A.D. 1990. **Principles of sedimentary basin analysis**. Springer-Verlag, New York, 2 ed., 668 pp.
11. MIALL A.D. 2000. **Principles of sedimentary basin analysis**. Springer-Verlag, New-York, 3 ed., 616 pp.
12. MIALL, A.D. 1996. **The Geology of Fluvial Deposits**. 1 ed. Berlin. Springer-Verlag. 582 p.
13. MONICARD, R.P. **Properties of Reservoir Rocks: core analysis**. Paris: Springer, 1980.
14. NICHOLS, G. 2009. **Sedimentology and stratigraphy** – second edition. Wiley Blackwell. 419p.
15. PRESS, F et al. 2006. **Para entender a terra**. Tradução de Rualdo Menegat. 656p.
16. RAYANA, Rosa Estrella de Pinho. **Variação da porosidade e da permeabilidade em coquinas da Formação Morro do Chaves (andar**

- Jiquiá), Bacia de Seripe-Alagoas:** Rayana Rosa Estrella de Pinho - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2015
17. READING H.G. 1986. Facies. In: H.G. Reading (Ed.), **Sedimentary Environments and Facies**, 2 ed., pp. 4–19.
 18. READING, H.G. **Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy**: 3.Ed. Oxford: Editora Blackwell, 1996.
 19. RODRIGUES, Y.C. **Inuditos como análogos de reservatório – Um exemplo nos depósitos gônduânicos triássicos do Gráben Arroio Mourão**, RS/ 2018.
 20. SANTOS, R.G et al. **An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods**. Laboratory of Miscible Displacement Methods. Center for Petroleum Studies, University of Campinas, 2013.
 21. Shreya Katre & Archana M. Nair, 2021. **Modelling the effect of grain anisotropy on inter-granular porosity**. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01332-w>
 22. SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**, 3ª Edição. São Paulo – SP: Editora Blucher, 2003.
 23. TEIXEIRA, Jonatã Barbosa. **Petrografia de rochas reservatório areníticas e relação com diferentes técnicas de obtenção de parâmetros petrofísicos** /Niterói : [s.n.], 2016.