



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PETROGRAFIA E DIAGÊNESE DE ARENITOS DA
FORMAÇÃO MONTE ALEGRE, BACIA DO AMAZONAS E
IMPLICAÇÕES PARA QUALIDADE DO RESERVATÓRIO**

Trabalho apresentado por:

TALITA PACHECO ESTEVES

Orientador: Prof. Dr. Anderson Conceição Mendes

Belém-Pará

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PETROGRAFIA E DIAGÊNESE DE ARENITOS DA FORMAÇÃO MONTE ALEGRE, BACIA DO AMAZONAS E IMPLICAÇÕES PARA QUALIDADE DO RESERVATÓRIO

Discente: Talita Pacheco Esteves

Orientador: Prof. Dr. Anderson Conceição Mendes

Belém-Pará

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

E79p Esteves, Talita Pacheco.

Petrografia e diagênese de arenitos da formação Monte Alegre, bacia do Amazonas e implicações para qualidade do reservatório / Talita Pacheco Esteves. — 2023.

x, 30 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Anderson Conceição Mendes Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2022.

1. Petrogênese. 2. Diagênese. 3. Qualidade de reservatório. 4. Formação Monte Alegre. I. Título.

CDD 552.0098115



INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

**PETROGRAFIA E DIAGÊNESE DE ARENITOS DA
FORMAÇÃO MONTE ALEGRE, BACIA DO AMAZONAS E
IMPLICAÇÕES PARA QUALIDADE DO RESERVATÓRIO**

Apresentado por:

TALITA PACHECO ESTEVES

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em Geologia, linha de pesquisa
Geologia Sedimentar**

Data da Aprovação: 22/12/2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Anderson Conceição Mendes
(Orientador – UFPA)

Prof. Dr. José Bandeira Cavalcante da Silva Júnior
(Membro- UFPA)

Prof. Ma. Moeme da Silva Máximo Ramos
(Membro – UFRR)

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer primeiramente a Deus, pela minha vida, por me ajudar a ultrapassar obstáculos encontrados ao longo da jornada.

Aos meus pais, Patrícia e Rosevelth, por tudo que fizeram e fazem por mim a cada momento e meu irmão gêmeo Rosevelth Jr que sempre esteve comigo e é meu grande incentivador a seguir em frente e ser mais forte.

Ao meu noivo Aldry Lorrán, meu parceiro de vida, que cuidou e se dedicou para que nos momentos difíceis eu enfrentasse com mais leveza, determinação e seriedade.

Meu agradecimento especial ao meu orientador Anderson Mendes, que incentivou e orientou nesta jornada de conhecimento, compartilhando e possibilitando o aperfeiçoamento do trabalho realizado.

Ao Instituto de Geociências pela oportunidade de participação e realização final para seguir a formação profissional.

“Sentir medo diante de um novo obstáculo faz parte, mas não deixe que impeça você de prosseguir. Coragem!”

(Lune Dioro)

RESUMO

Na Bacia do Amazonas, a Formação Monte Alegre é uma formação que aflora nas bordas norte e sul da bacia. Trabalhos anteriores classificaram os arenitos nas bordas norte sul, entretanto, pouco se relacionou com a diagênese e como isso afetou a qualidade das rocas reservatório. Assim, o objetivo foi classificar os arenitos da Formação Monte Alegre na parte central da bacia e na borda sul da Bacia do Amazonas, entender como a diagênese afetou estas rochas e a influência para a qualidade do reservatório Monte Alegre. Os arenitos da parte central, próximo a cidade de Monte Alegre, foram classificados em subarcósios, finos, bem selecionados, arcabouço fechado, com cimento de sílica e atingem até 5.4% de porosidade, enquanto na borda sul, os arenitos variam de subarcósios até quartzo-arenitos, finos à grossos, moderadamente selecionados, arcabouço aberto e cimento de quartzo e ferro, além de matriz com porosidade máxima de 17.7%. Observou-se que na parte central foi atingido estágio de eo a mesodiagenético, enquanto na borda sul, ocorreu telodiagenese o que propiciou a grande quantidade de cimento de ferro e matriz, geração de porosidade secundária e abertura do arcabouço da rocha. Essas variações afetaram diretamente a qualidade do reservatório Monte Alegre, levando a uma variação de porosidade correlacionada com a posição geográfica na bacia bem como ambientes e fácies sedimentares.

Palavras-chave: petrogênese; diagênese; qualidade de reservatório; Formação Monte Alegre.

ABSTRACT

The Monte Alegre Formation outcrops, Amazonas Basin, occur on the north and south basin edges. Previous work classified sandstones on the north-south edges, however, little was related to diagenesis and how this affected the quality of reservoir rocks. Thus, the objective was to classify the sandstones of the Monte Alegre Formation in the central part of the basin and on the southern edge of the Amazonas Basin, to understand how diagenesis affected these rocks and the influence on the quality of the Monte Alegre reservoir. The sandstones of the central part, close to the city of Monte Alegre, were classified into fine, well selected, closed framework, with silica cement subarkose and reach up to 5.4% porosity, while on the south edge, the sandstones range from fine to- coarse, moderately selected, open framework subarkose to quartzarenites with quartz and iron cement, in addition to matrix with a maximum porosity of 17.7%. It was observed the eo to- mesodiagenetic diagenetic stage was reached in the central part, while in the southern edge, telodiagenesis occurred, which led to a large amount of iron cement and matrix, generation of secondary porosity and opening of the rock framework. These variations directly affected the quality of the Monte Alegre reservoir, leading to a porosity variation correlated with the geographic position in the basin as well as environments and sedimentary facies.

Keywords: petrogenesis; diagenesis; reservoir quality; Monte Alegre Formation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– A) Região Norte do Brasil, B-C-D) Exposições da Formação Monte Alegre nas bordas norte e sul da Bacia do Amazonas.	2
Figura 2- Perfis litoestratigráficos da Formação Monte Alegre nas áreas de estudo (rio Maecuru – centro da bacia e rio Tapajós e na BR - 230 (Rodovia Transamazônica) - borda sul) da Bacia do Amazonas.	6
Figura 3 - Classificação dos arenitos da Formação Monte Alegre para as três regiões de estudo. Adaptado de Folk (1974).	7
Figura 4- Aspectos gerais dos arenitos da Formação Monte Alegre, borda sul da bacia do Amazonas. a-.....	
	Erro! Indicador não definido.
Figura 5- Aspectos gerais dos arenitos da Formação Monte Alegre, parte central da bacia do Amazonas. a-b) aspectos gerais das amostras com micas deformadas; c) variação granulométrica observadas nos arenitos; d) tipos de contatos e grãos; e) grãos de feldspato com processo de sericitização; c) tipos de contatos concavo-convexo (C-Cc), retos (Sc) e Micas deformadas (Ms)...	
	Erro! Indicador não definido.
Figura 6- Tipos de poros identificados nos arenitos da Formação Monte Alegre. a) Poros intergranular - Ip; b) Poros intragranular - setas; c) Poros agigantado - Op; d) Poros de micro- fratura - seta.	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição modal dos arenitos da Formação Monte Alegre, borda Sul da Bacia do Amazonas. Valores em porcentagem (%).....	10
Tabela 2 - Composição modal dos arenitos da Formação Monte Alegre, porção central da Bacia do Amazonas. Valores em porcentagem (%).....	13
Tabela 3- Compilação de dados de porosidade obtidos em estudos anteriores nos arenitos da Formação Monte Alegre.	22

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE TABELAS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 CONTEXTO GEOLÓGICO	3
2.1 BACIA DO AMAZONAS.....	3
2.2 FORMAÇÃO MONTE ALEGRE.....	3
2.3 PETROFÍSICA DOS ARENITOS DA FORMAÇÃO MONTE ALEGRE.....	4
3 AMOSTRAGEM E MÉTODOS ANALÍTICOS	5
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	6
4.1 FÁCIES SEDIMENTARES.....	6
4.2 ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	7
4.2.1 Composição detrítica – Borda Sul da Bacia	7
4.2.2 Composição detrítica – Parte Central da Bacia	9
4.2.3 Porosidade	16
4.3 PROCESSOS DIAGENÉTICOS.....	17
4.3.1 Matriz	17
4.3.2 Compactação	18
4.3.3 Cimentação	19
<i>4.3.2.1 Sobrecrescimento de quartzo</i>	19
4.4 EVOLUÇÃO DIAGENÉTICA.....	20
4.5 CONTROLE DA DIAGÊNESE NA QUALIDADE DO RESERVATÓRIO MONTE ALEGRE.....	21
5 CONCLUSÕES	24
REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

A Formação Monte Alegre (Bacia do Amazonas) é representada predominantemente por rochas siliciclásticas depositadas em ambiente flúvio-eólico e de *wadis*, sobrepostas por carbonatos da Formação Itaituba (Cunha *et al.* 1994, Matsuda 2002, Matsuda *et al.* 2006, Cunha *et al.* 2007, Lima 2010). As configurações paleoambientais e deposicionais permitem o reconhecimento de um sistema petrolífero na qual, os folhelhos da Formação Barreirinha, são considerados rochas geradoras, enquanto os arenitos da Formação Monte Alegre apresentam as propriedades adequadas para atuarem como reservatório e os carbonatos da Formação Itaituba atuam como rochas selante (Torres 1989, Loboziak *et al.* 1997, Cunha 2000, Lima *et al.* 2008, Lima 2010, Mendes *et al.* 2019).

A diagênese em arenitos pode melhorar, preservar ou destruir a porosidade e a permeabilidade, sendo controlada por um conjunto complexo de parâmetros inter-relacionados (Stonecipher *et al.* 1984). Esses parâmetros variam desde a configuração tectônica, fácies deposicionais e condições paleoclimáticas (Morad 2000, Worden & Morad 2003) demonstrando a necessidade de unir técnicas uma vez que, prever a qualidade do reservatório não é fácil. Assim, é consenso que a qualidade deposicional do reservatório é controlada principalmente pela variação lateral na geometria das fácies, classificação, arranjo e tamanho de grão nos arenitos bem como pela história diagenética (Morad *et al.* 2012, Lawan *et al.* 2021).

Boas exposições da Formação Monte Alegre ocorrem nas bordas norte, centro e sul da Bacia do Amazonas permitindo o reconhecimento de várias fácies sedimentares que propiciam boa oportunidade para estudos de arenitos e diagênese. A caracterização petrográfica de rochas sedimentares siliciclásticas é uma técnica corriqueira e de simples aplicação que permite extrair informações importantes acerca da história deposicional destas rochas.

Na borda sul da Bacia do Amazonas, os arenitos da Formação Monte Alegre foram estudados nas margens do rio Tapajós e ao longo da BR-230 (Transamazônica), enquanto na parte central, estas rochas afloram às margens do rio Maecuru, na cidade de Monte Alegre (Figura 1). Assim, este trabalho teve como objetivo principal a caracterização petrográfica bem como elucidar os estágios

diagenéticos pelos quais os arenitos desta Formação foram submetidos, e compreender se essas modificações podem ter influenciado na qualidade do reservatório Monte Alegre.

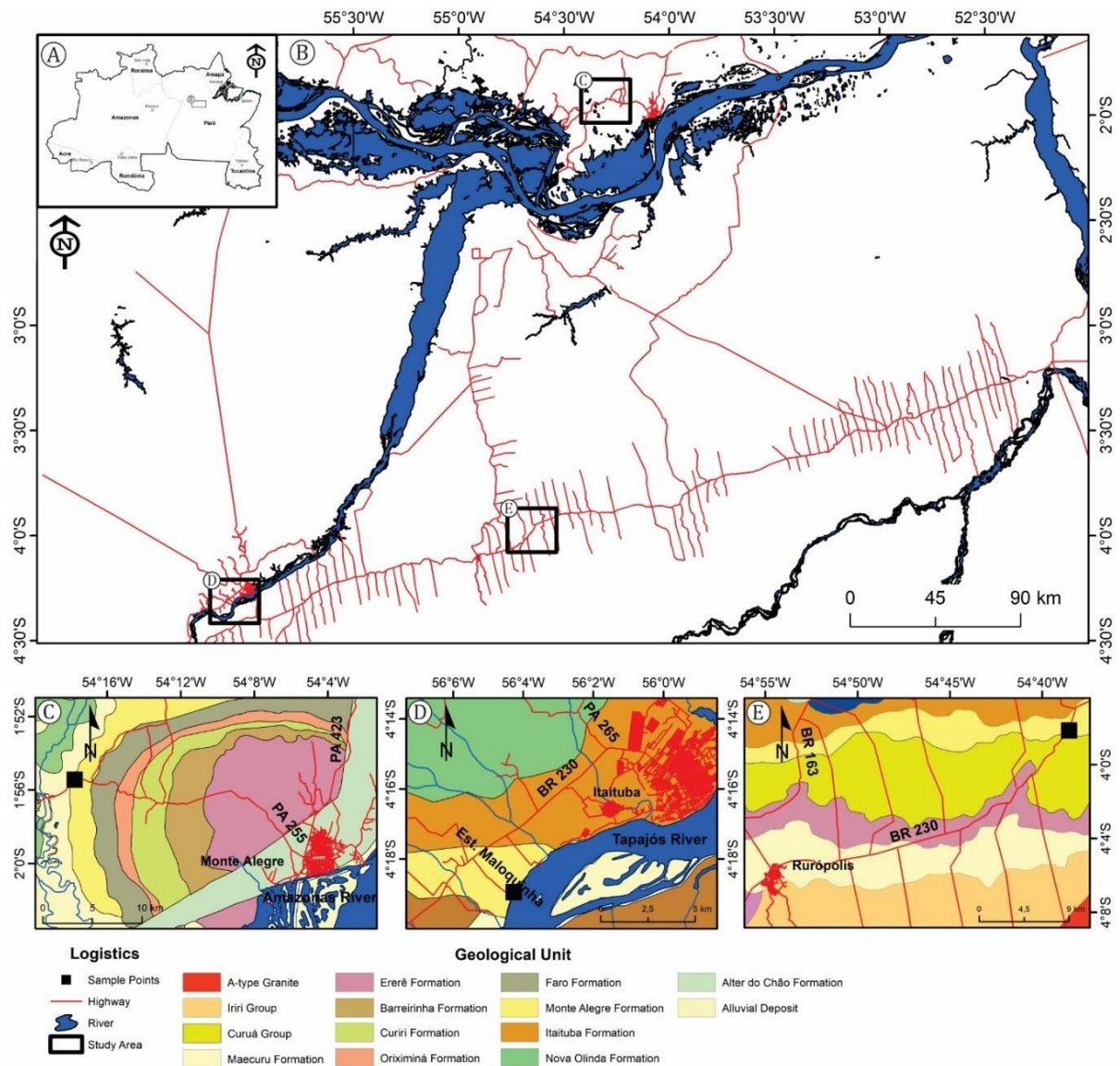


Figura 1– A) Região Norte do Brasil, B-C-D) Exposições da Formação Monte Alegre nas bordas norte e sul da Bacia do Amazonas.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 BACIA DO AMAZONAS

A Bacia do Amazonas, de idade paleozoica, abrange os estados do Pará, Amazonas e Amapá, com área de aproximadamente 500.000 Km² limitada a oeste com a Bacia do Solimões separada pelo arco de Purus, a leste, com a Bacia do Marajó separada pelo arco de Gurupá, ao sul, com o escudo do Brasil Central e a norte com o escudo das Guianas (Cunha *et al.* 1994, 2007, Cunha 2000).

Diferente das demais bacias Paleozoicas, a Bacia do Amazonas não foi implantada sobre estruturas brasileiras, por alojar-se sobre o Cráton Amazônico (Cordani *et al.* 2000). O preenchimento sedimentar é marcado por conter registros de duas Megassequências de primeira ordem, sendo uma Paleozoica e a outra Mesozoica. A partir de interpretações empregando critérios da estratigrafia de sequência, dividiu-se a Megassequência Paleozoica em quatro sequências de segunda ordem, são elas: Ordovício-Devoniana, Devono-Tournaisiana, Neoviseana e Pensilvaniano-Permiana (Cunha *et al.* 2007).

2.2 FORMAÇÃO MONTE ALEGRE

A Formação Monte Alegre integra o Grupo Tapajós, formada por arenitos bimodais de granulometria média a fina com espessura variando de 70 a 150 metros (Caputo *et al.* 1971, Cunha *et al.* 1994, Matsuda 2002, Mendes *et al.* 2019). Possui idade Neobashkiriana (Playford & Dino 2000, Melo & Loboziak 2003) e ampla distribuição geográfica na Bacia do Amazonas, exceto nas áreas mais a Leste nas proximidades do arco de Gurupá (Caputo *et al.* 1971).

Boas exposições foram observadas às margens das rodovias, dos rios (nos períodos de estiagem), e em minas de extração mineral (Santos *et al.* 1975, Pastana 1999, Lima 2010). Pesquisas paleoambientais remetem a um ambiente deposicional costeiro com influência fluvial, onde o canal do rio possivelmente cortava os campos de dunas (Costa & Selbach 1981, Costa 1984, Lima 2010, Costa *et al.* 2022).

Na região de Itaituba e Monte Alegre, os arenitos ocorrem associados a depósitos eólicos remetendo a um sistema desértico (Lima 2010, Costa *et al.* 2022).

Do ponto de vista petrográfico a Formação Monte Alegre possui a melhor competência para o acúmulo de óleo e/ou gás e água na Bacia, podendo conter porosidade de até 25% do volume intergranular e permeabilidade acima dos 100 mD (Torres 1989).

2.3 PETROFÍSICA DOS ARENITOS DA FORMAÇÃO MONTE ALEGRE

Estudos petrofísicos para determinação de porosidade e permeabilidade já foram realizados em várias áreas na bacia do Amazonas. Estudos realizados em plugs de testemunhos, na área do rio Autaz-Mirin (localizado no estado do Amazonas) observou-se dois *trends* (Costa 1983). Para o primeiro *trend* a variação de porosidade foi de 8 a 17%, enquanto a permeabilidade de 10 a 100 mD, no segundo *trend* a variação de porosidades foi de 2 a 12% e permeabilidade menores que 0.3 mD.

Dados gerais de porosidade e permeabilidade fornecidos pela ANP (2015) para a Formação Monte Alegre, demonstraram variação de porosidade entre 20-25% e permeabilidade entre 150-380 mD. Dados petrográficos próximos a Itaituba indicaram valores de porosidade variando de 0 - 25% (Torres,1989) e 10 – 13% (Mendes *et al.* 2019).

No estudo de Duarte (2017), tal que neste apresentado aqui, foi estudado a borda norte e sul. Na borda Norte, próximos a cidade de Monte Alegre, os arenitos apresentaram porosidade entre 2.4 – 3% e na borda Sul, próximo a Itaituba indicaram valores de porosidade entre 11 até 17%.

3 AMOSTRAGEM E MÉTODOS ANALÍTICOS

Para o posicionamento das amostras foi realizada análise de fácies de acordo com as propostas de Maill (1991, 1994) e Walker (1992), agrupadas em associações de fácies. Ao total, foram coletadas trinta e cinco amostras nas três regiões, sendo vinte na borda sul (nas margens do rio Tapajós em Itaituba e ao longo da BR – 230 em Placas) e quinze na porção central da bacia (as margens do rio Maecuru em Monte Alegre) (Figura 1).

A análise modal quantitativa foi realizada pela contagem de 300 pontos (Galehouse 1971, Zuffa 1985) em cada lâmina delgada sob microscópio petrográfico, determinando o volume dos constituintes detríticos e classificando os arenitos (Folk 1974), e processos diagenéticos (Schmidt & McDonald 1979, Milliken & Olson 2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 FÁCIES SEDIMENTARES

A sucessão sedimentar foi descrita em três áreas com espessura variando entre 2,5 e 6,5 metros nos afloramentos, representado um sistema deposicional de dunas e interdunas eólicas, associados com lençol de areia (Figura 2) (Lima 2010, Mota & Mendes 2016). Nestas áreas estudadas, estes autores individualizaram nove fácies sedimentares agrupadas em duas associações de fácies que representam campo de dunas eólicas e lençol de areia transportado por rios efêmeros (Mota & Mendes 2016).

O campo de dunas eólicas é composto por arenitos de estratificação cruzada tabular de médio a grande porte, plano paralela, laminação bimodal, arenitos finos com laminação cavalgante transladante subcrítica e arenito com acamamento ondulado irregular. Já os depósitos de lençol de areia transportado por rios efêmeros cortam os campos de dunas e apresentam arenitos grossos maciços e conglomerados poligômicos matriz suportados (Figura 2).

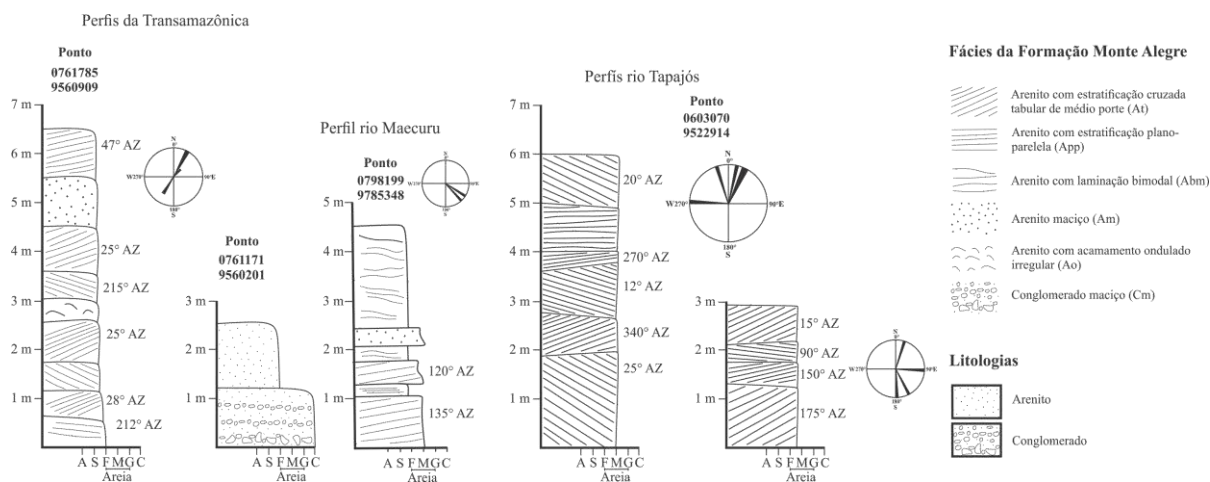


Figura 2- Perfis litoestratigráficos da Formação Monte Alegre nas áreas de estudo (rio Maecuru – centro da bacia e rio Tapajós e na BR - 230 (Rodovia Transamazônica) - borda sul) da Bacia do Amazonas.

4.2 ANÁLISE PETROGRÁFICA

4.2.1 Composição detrítica – Borda Sul da Bacia

Os arenitos da Formação Monte Alegre na borda sul da bacia ao longo do rio Tapajós, são quartzo-arenitos, bimodais, granulometria fina, bem selecionados, grãos arredondados, arcabouço normal e suporte por grãos e/ou matriz (Figuras 3 e 4). Possuem em média 96.5% de quartzo, 2.5% de feldspato e 1.5% de conteúdo lítico (Tabela 1).

Nestas rochas, o quartzo monocristalino é mais abundante em relação ao policristalino, com extinção homogênea e ondulante e sobrecrescimento de quartzo. Dos feldspatos, a microclina é mais comum, com o típico maclamento xadrez, por vezes, com porosidade intragranular. Os fragmentos de rochas, na maioria, são clastos pelíticos e *chert*. Como acessório ocorre turmalina, com predomínio dos grãos arredondados de coloração esverdeada. Também é observado grãos de micas contorcidas entre os demais grãos do arcabouço.

Nas exposições ao longo da BR-230, os arenitos todos são quartzoarenitos, com predomínio do segundo (Figura 3) e médias de 94.3% de quartzo, 4.9% de feldspato e 0.9% de fragmentos líticos (Tabela 1). São arenitos com variação granulometria desde areia muito fina até média, bem a moderadamente selecionados, com grãos subangulosos e empacotamento normal a aberto. Grãos de quartzo monocristalino predominam no arcabouço, seguido do policristalino e vulcânico. Ortoclásio é o feldspato mais abundante exibindo, por vezes, níveis mais severos de altos. Fragmentos de rochas são escassos, quando ocorrem são grãos de *chert*.

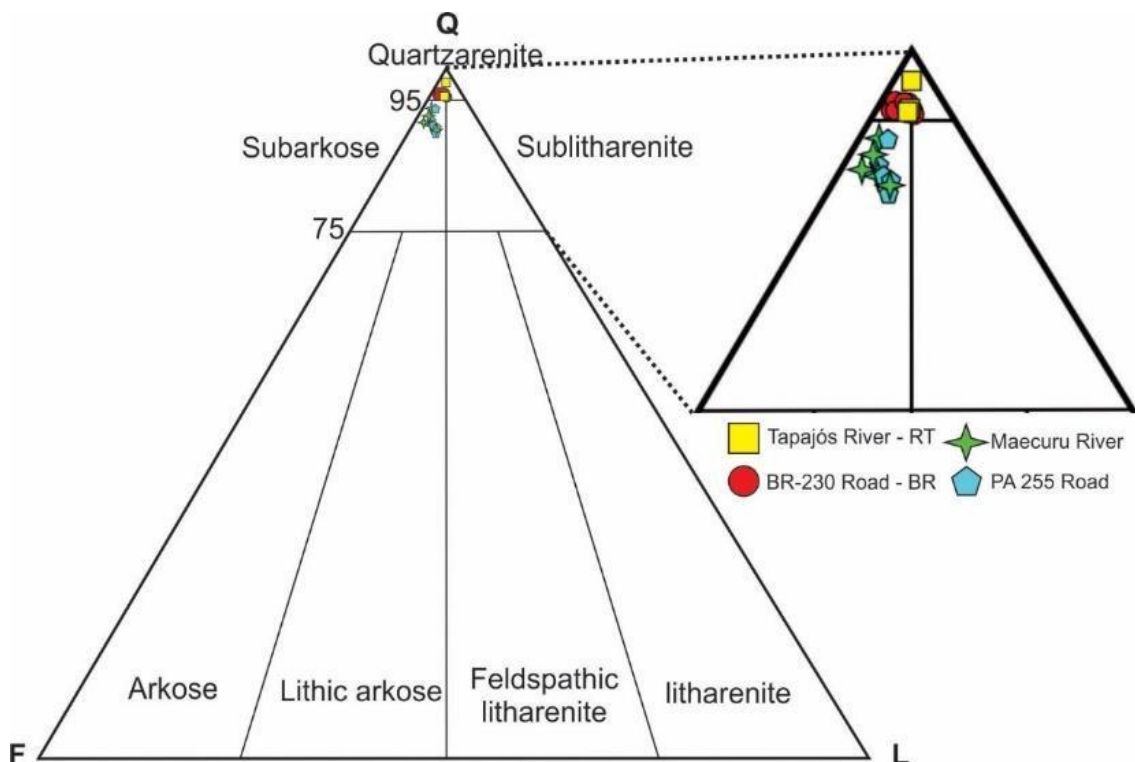


Figura 3 - Classificação dos arenitos da Formação Monte Alegre para as três regiões de estudo. Adaptado de Folk (1974).

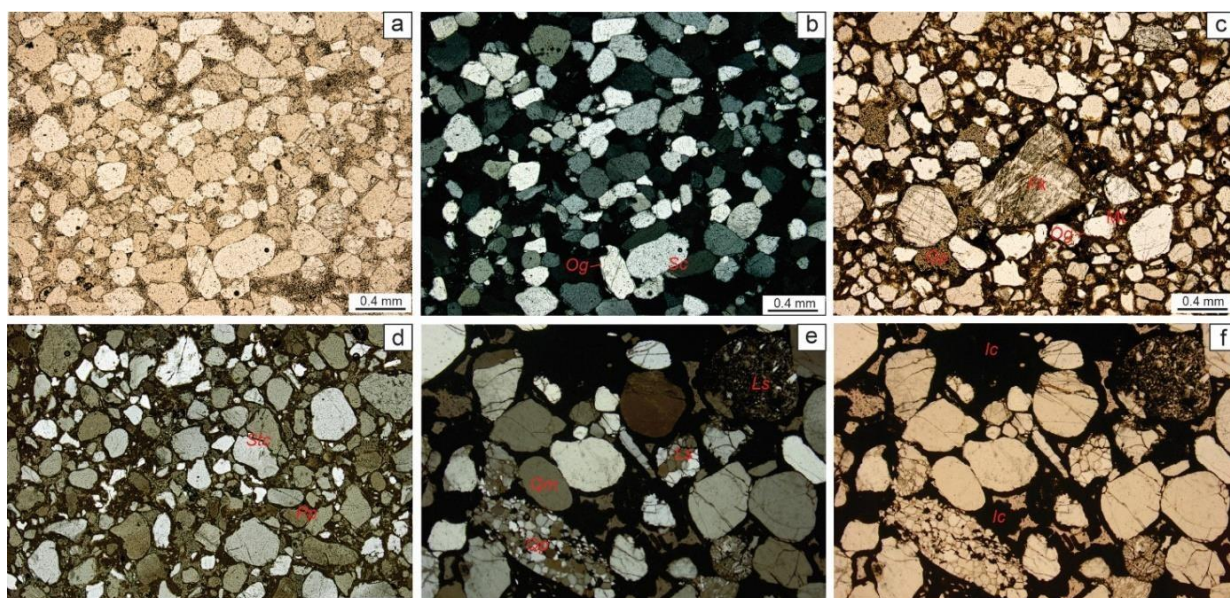


Figura 1- Aspectos gerais dos arenitos da Formação Monte Alegre, borda sul da bacia do Amazonas. a- b) Contato retos (Sc) e sobrecrescimento de quartzo (Og); c) Cimento de quartzo (Og), matriz (Mt), grãos de feldspato (Fk) e poros secundários agigantados (Op); d) arenitos bimodal; e) Grãos monocristalinos (Qm) e policristalinos de quartzo (Qp) além de fragmentos líticos sedimentares (Ls); f) Cimento de ferro preenchendo totalmente os poros.

4.2.2 Composição detrítica – Parte Central da Bacia

Na porção central da Bacia do Amazonas, todos os arenitos da Formação Monte Alegre são classificados como subarcósios (Figura 3) com composição média em 91.4% de quartzo, 6.9% de feldspato e 1.6% de fragmentos de rocha (Figura 5 e Tabela 2). Os subarcósios encontram-se expostos às margens do rio Maecuru, no modo geral, apresentam granulometria fina, bem selecionados, arcabouço fechado e suportados por grão e cimento.

Nessas rochas predominam os grãos de quartzo monocristalinos com extinção homogênea seguida dos grãos com extinção ondulante. Os feldspatos são representados pela microclina e plagioclásio. A microclina apresenta maclamento xadrez típico, por vezes, com fraturas favorecendo a porosidade secundária. Os grãos de plagioclásio encontram-se, na sua maioria, corroídos e/ou atingidos pelo processo de sericitização. Os fragmentos líticos, na maioria, são clastos pelíticos deformados entre os demais grãos do arcabouço.

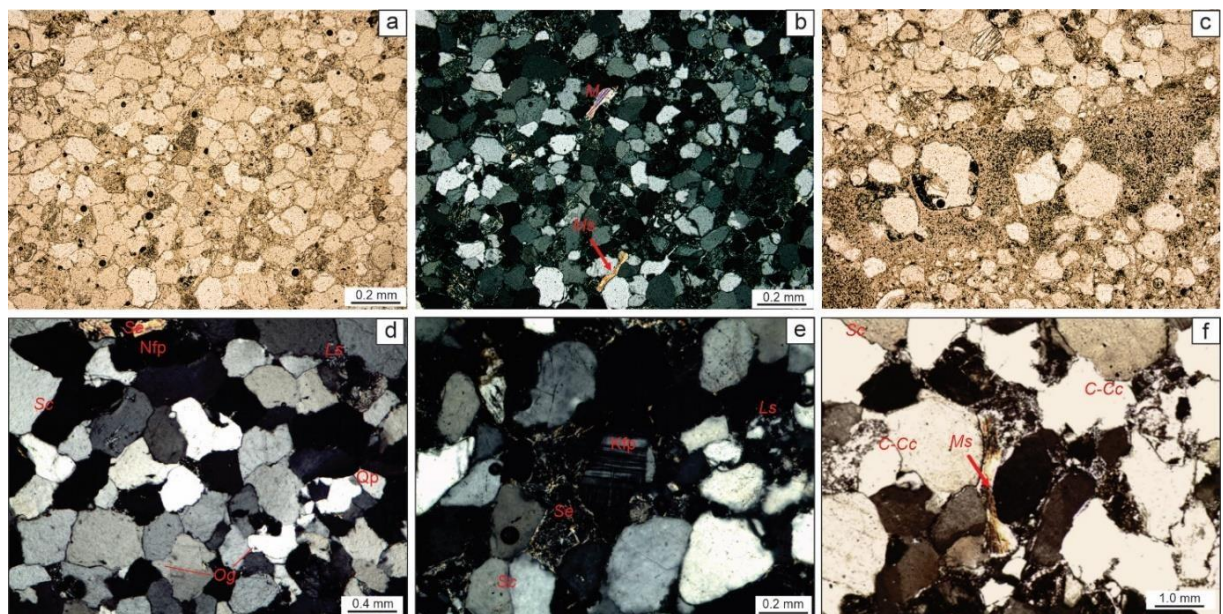


Figura 2- Aspectos gerais dos arenitos da Formação Monte Alegre, parte central da bacia do Amazonas. a-b) aspectos gerais das amostras com micas deformadas; c) variação granulométrica observadas nos arenitos; d) tipos de contatos e grãos; e) grãos de feldspato com processo de sericitização; c) tipos de contatos concavo-convexo (C-Cc), retos (Sc) e Micas deformadas (Ms).

Tabela 1 - Composição modal dos arenitos da Formação Monte Alegre, borda Sul da Bacia do Amazonas. Valores em porcentagem (%).

(continua)

Constituents (%)	Tapajós River - RT			BR-230 Road - BR												
	MA-1	MA-2	MA-3	MA-1	MA-2	MA-3	MA-4	MA-5	MA-6	MA-7	MA-8	MA-9	MA-10	MA-11	MA-12	MA-13
Detrital quartz	74.6	76.3	77.0	69.1	79.7	74.8	77.3	71.7	67.6	71.3	57.0	63.3	59.7	63.2	67.3	67.0
Monocrystalline - homogeneous extinction	56.5	62.8	71.8	58.1	77.7	67.1	71.7	66.2	58.4	65.7	49.5	48.4	47.3	53.8	55.2	58.6
Monocrystalline - undulatory extinction	12.1	9.5	4.2	4.0	2.0	3.6	3.8	2.5	5.5	3.8	4.5	6.3	7.3	5.5	4.6	5.1
Polycrystalline	6.0	4.0	1.0	6.0	0.0	3.6	1.5	1.3	3.2	1.2	1.2	6.6	3.0	2.6	6.1	2.3
Vulcanic	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.5	0.3	1.7	0.5	0.6	1.8	2.0	2.1	1.3	1.4	1.0
Feldspar	2.6	2.4	0.7	2.8	3.8	2.7	3.0	2.8	2.6	2.5	1.6	3.3	2.2	3.2	4.0	2.4
Orthoclase	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	1.6	1.9	1.6	0.8
Microcline	1.5	1.9	0.7	2.6	2.0	2.3	2.8	2.1	1.9	2.0	1.3	3.3	0.6	1.1	2.4	1.2
Plagioclase	1.1	0.5	0.0	0.2	0.8	0.4	0.2	0.6	0.2	0.5	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.4
Lithic fragments	1.3	1.1	0.2	0.0	0.4	1.9	1.4	0.8	0.7	0.0	0.7	0.0	0.3	0.0	1.1	0.0
Mudstone	0.4	0.6	0.0	0.0	0.4	0.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sandstone	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
Schist	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Chert	0.9	0.5	0.2	0.0	0.0	1.0	0.6	0.8	0.7	0.0	0.7	0.0	0.3	0.0	0.5	0.0
Diagenetic constituents	4.8	4.5	1.9	6.2	3.0	5.3	7.7	6.2	13.7	6.5	16.7	26.5	2.7	2.0	27.7	1.3
Syntaxial quartz overgrowth	2.3	3.0	1.3	3.2	1.1	3.4	3.0	3.2	5.3	4.0	3.1	1.0	1.0	1.5	1.0	0.3
Quartz cement	0.7	0.6	0.0	1.0	0.5	1.2	1.7	1.0	1.1	1.5	3.9	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0

(continuação)

	Tapajós River - RT			BR-230 Road - BR												
Iron oxide/hydroxide cement	1.8	0.9	0.6	2.0	1.4	0.7	3.0	2.0	7.3	1.0	9.7	25.0	1.7	0.0	26.7	1.0
Matrix	3.0	4.2	7.4	16.5	1.7	2.2	6.3	7.0	1.6	16.3	10.0	0.0	30.2	12.8	0.0	22.3
Mechanical infiltration - secondary	0.0	0.0	0.0	14.5	0.0	1.0	4.4	6.0	0.0	14.3	0.0	0.0	27.0	12.3	0.0	21.0
Primary deposition	2.5	3.6	6.4	0.0	1.2	0.0	0.4	0.0	1.6	0.0	9.0	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0
Pseudomatrix	0.5	0.6	1.0	2.0	0.5	1.2	1.5	1.0	0.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.5	0.0	1.3
Total porosity	12.0	10.9	12.8	4.6	8.9	12.3	4.6	11.1	13.6	3.2	13.7	6.5	4.0	17.7	0.3	6.9
Intergranular pore	9.6	10.1	10.2	4.0	8.4	11.7	3.7	10.2	11.1	3.0	13.0	2.1	1.5	14.0	0.0	6.0
Intragranular pore	1.3	0.5	1.4	0.0	0.0	0.0	0.3	0.8	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.2	0.2
Gigantic pore	0.8	0.3	0.6	0.6	0.1	0.5	0.0	0.0	0.9	0.0	0.6	3.0	2.0	0.0	0.0	0.5
Moldic pore	0.0	0.0	0.5	0.0	0.4	0.1	0.6	0.1	0.2	0.2	0.1	1.4	0.5	1.7	0.0	0.2
Microfracture pore	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Detrital mica	1.7	0.3	0.0	0.0	2.4	0.5	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Heavy minerals	0.0	0.3	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	0.2	0.4	0.3	0.4	0.5	0.0	0.0
Zircon	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Tourmaline	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.2	0.3	0.3	0.3	0.5	0.0	0.0
Q (Qtz Total)	95.0	95.6	98.8	96.1	95.0	94.2	94.6	95.2	95.3	96.6	96.1	95.0	96.0	95.2	93.0	96.5
F (Felds. Total)	3.3	3.0	0.9	3.9	4.5	3.4	3.7	3.7	3.7	3.4	2.7	5.0	3.5	4.8	5.5	3.5
Fr (F. Rocha Total)	1.7	1.4	0.3	0.0	0.5	2.4	1.7	1.1	1.0	0.0	1.2	0.0	0.5	0.0	1.5	0.0

(conclusão)

Tapajós River - RT				BR-230 Road - BR												
Grain size – Sand*	Fin	Fin	Fin	Fn	Vfin	Vf-Fn	F n	Fn- Md	Fn- Md	Vf- Fn	Fn	Fn	Fn-Md	Vf- Fn	Md- Cs	Fn- Md
Sorting**	Mod	We l	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel	Mod	Wel	Mod	Wel	Mod	Mod	Wel	Mod
Rounding***	Sub- r	Ro u	Rou	Sub- a	Sub- a	Sub-r	Sub-r	Sub-r	Rou	Sub-r	Sub-a	Sub- r	Sub-r	Sub- r	Rou	Sub-r
Packing****	Nor	No r	Nor	Op	Nor	Nor	Nor	Nor	Op	Op	Op	Op	O p	Op	Op	Op

* Grain size – Sand: Vf= Very fine; Fn= Fine; Md= Medium; Cs= Coarse

** Sorting: Mod= moderate; Wel= well; Poo= poorly;

*** Rounding: Rou=rounded; Sub-r= sub-rounded; Sub-a= Sub-angular; Ang= Angular

**** Packing: Nor= Normal; Op = Open; Clo= Closed

Tabela 2 - Composição modal dos arenitos da Formação Monte Alegre, porção central da Bacia do Amazonas. Valores em porcentagem (%).

(continua)

	Maecuru River					PA 255 Road				
Constituents (%)	P1 MA-1	P1 MA-2	P1 MA-3	P1 MA-4	P1 MA-5	P2 MA-1	P2 MA-2	P2 MA-3	P2 MA-4	P2 MA-5
Detrital quartz	88.8	85.8	85.8	84.7	81.6	87.1	85.2	82.4	83.4	82.6
Monocrystalline - homogeneous extinction	76.4	73.2	70.3	72.8	72.4	77.0	76.2	71.4	73.0	70.4
Monocrystalline - undulatory extinction	4.4	3.6	4.8	5.9	4.9	5.1	3.0	4.0	4.0	6.0
Polycrystalline	8.0	9.0	10.7	6.0	4.3	5.0	6.0	7.0	6.4	6.2
Vulcanic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Feldspar	4.9	6.2	4.0	7.4	7.3	5.5	6.6	6.3	8.3	7.6
Ortoclase	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2	0.8	0.4	0.1	0.3	0.1
Microcline	3.5	4.9	2.9	5.6	6.4	4.2	5.7	5.2	6.5	6.8
Plagioclase	1.2	1.1	1.0	1.5	0.7	0.5	0.5	1.0	1.5	0.7
Lithic fragments	0.7	1.3	2.0	1.3	2.0	0.7	1.1	2.0	1.8	2.2
Mudstone	0.5	0.8	1.3	1.0	1.5	0.3	0.5	1.3	1.0	1.5
Sandstone	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Schist	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.4	0.2	0.0	0.5	0.2
Chert	0.2	0.3	0.6	0.3	0.5	0.0	0.4	0.7	0.3	0.5
Diagenetic constituents	2.7	3.1	4.6	1.5	1.7	4.0	3.1	4.8	4.2	5.3
Syntaxial quartz overgrowth	2.2	2.8	4.2	1.5	1.5	3.2	2.6	4.5	3.4	4.5
Quartz cement	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.8	0.5	0.1	0.4	0.8
			0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0

(continuação)

Maecuru River						PA 255 Road				
		0.0	0.5	0.3	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mechanical infiltration - secondary	0.0	0.0	0.0	0.3	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Primary deposition	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pseudomatrix	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total porosity	2.5	2.9	2.5	3.9	5.4	2.1	2.5	2.2	2.0	1.5
Intergranular pore	2.2	2.0	1.6	2.8	3.3	1.9	2.3	1.8	2.0	1.3
Intragranular pore	0.3	0.9	0.7	0.8	0.4	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0
Constituents (%)	P1 MA-1	P1 MA-2	P1 MA-3	P1 MA-4	P1 MA-5	P2 MA-1	P2 MA-2	P2 MA-3	P2 MA-4	P2 MA-5
Gigantic pore	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Moldic pore	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Microfracture pore	0.0	0.0	0.2	0.3	0.2	0.2	0.0	0.1	0.0	0.2
Detrital mica	0.2	0.5	0.5	0.6	0.6	0.4	1.0	1.5	0.3	0.8
Heavy minerals	0.0	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	0.5	0.8	0.0	0.0
Zircon	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tourmaline	0.0	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	0.5	0.8	0.0	0.0
Q (Qtz Total)	94.1	92.0	93.5	90.7	89.8	93.4	91.7	90.8	89.2	89.4
F (Felds. Total)	5.2	6.6	4.4	7.9	8.0	5.9	7.1	6.9	8.9	8.2
Fr (F. Rocha Total)	0.7	1.4	2.2	1.4	2.2	0.8	1.2	2.2	1.9	2.4

(conclusão)

Maecuru River						PA 255 Road				
Grain size – Sand*	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin	Fin
Sorting**	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel
Rounding***	Sub-r	Sub-r	Sub-a	Rou	Sub-r	Sub-r	Sub-r	Rou	Sub-r	Sub-r
Packing****	Clo	Clo	Clo	Clo	Clo	Clo	Clo	Clo	Clo	Clo

* Grain size – Sand: Vf= Very fine; Fn= Fine; Md= Medium; Cs= Coarse

** Sorting: Mod= moderate; Wel= well; Poo= poorly;

*** Rounding: Rou=rounded; Sub-r= sub-rounded; Sub-a= Sub-angular; Ang= Angular

**** Packing: Nor= Normal; Op = Open; Clo=

Closed

4.2.3 Porosidade

Os arenitos da Formação Monte Alegre apresentam diversos tipos de porosidades (Figura 6) e variações percentuais tanto na parte central quanto na borda sul da bacia (Tabela 3) e a porosidade foi observada através de impregnação com corante de epóxi azul nas lâminas delgadas. A porosidade total apresenta os maiores percentuais na borda sul com destaque para porosidade intergranular podendo atingir até 14%. Na borda sul a porosidade é menor que 6% e destaque para porosidade intergranular que atinge até 3.3%. Assim, a porosidade de maior destaque nestes arenitos é a intergranular e, em menor proporção, ocorrem poros secundários intragranulares, agigantados e de microfatura.

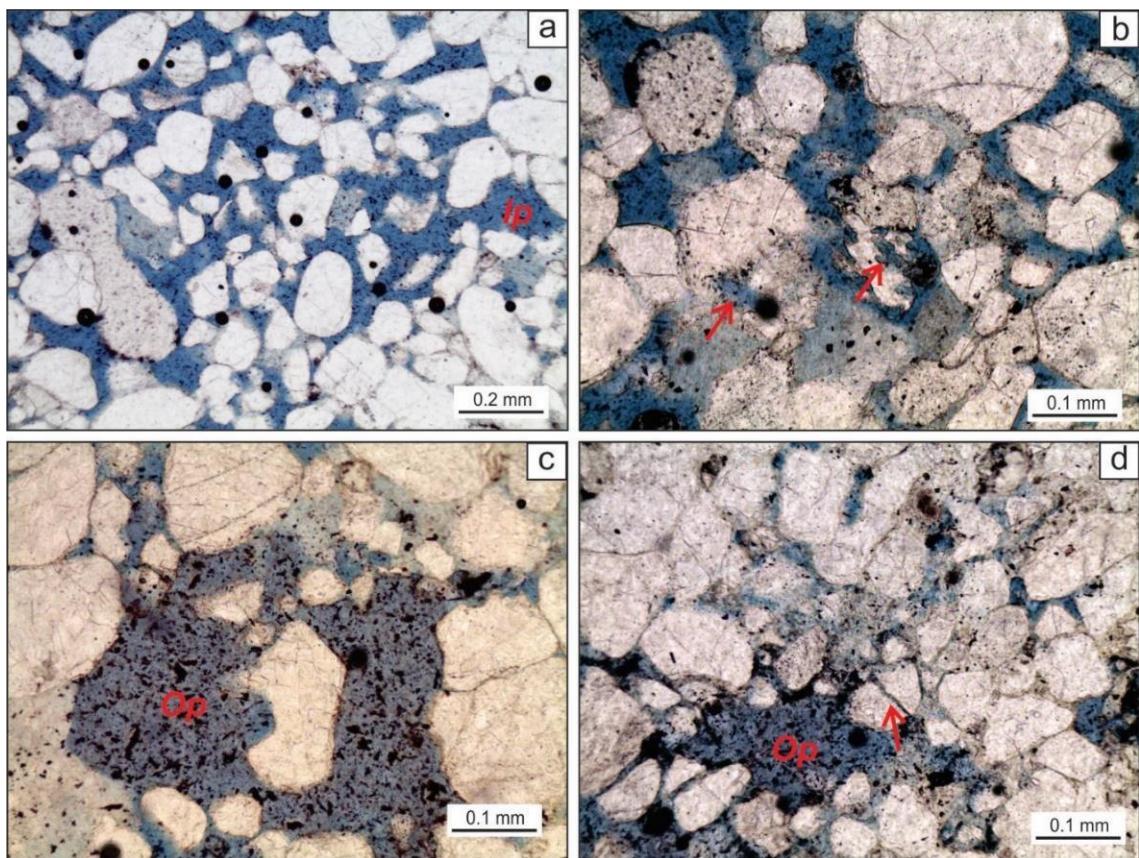


Figura 6- Tipos de poros identificados nos arenitos da Formação Monte Alegre. a) Poros intergranular - Ip; b) Poros intragranular - setas; c) Poros agigantado - Op; d) Poros de microfatura - seta.

O arcabouço dos arenitos na borda sul apresenta baixa variabilidade composicional e consistem basicamente em grãos de quartzo com várias formas e, subordinadamente, de feldspato e argilitos. Segundo a classificação de Folk (1974) e Pettijohn *et al.* (1987), os arenitos são quartzo-arenitos, na borda sul da bacia e

subarcósios na porção central da bacia.

Quartzo-arenitos são, em geral, produto de repetidos ciclos sedimentares e/ou deposição marinha rasa, eólica ou mesmo com forte influência de abrasão (Pettijohn *et al.* 1987). A diagênese é um fator determinante para a formação de quartzo-arenitos, pois ocorre principalmente dissolução dos clastos pelíticos e dos grãos de feldspato, podendo também ocorrer substituição por argilominerais e carbonatos (De Ros 1998).

Nos arenitos da Formação Monte Alegre, a posição das amostras entre a borda sul e central, pode ter relação com a evolução dos arenitos. Como indicado por Pettijohn *et al.* (1987) arenitos eólicos apresentam maturidade mineralógica elevada.

Se notarmos, os ambientes sedimentares eólico com incursões fluviais efêmeras proposto para Formação Monte Alegre (Mota & Mendes 2016, Lima *et al.* 2008, Matsuda 2010, Mendes *et al.* 2019, Costa *et al.* 2022) entre os arenitos da borda sul e central pode ser um dos controladores para geração de diferentes arenitos nesta Formação.

Outro fator que deve ser considerado é a grau de diagênese para causar modificação na maturidade textural e mineralógica destes arenitos. A ocorrência de diversos cimentos em conjunto com matriz, permite identificar que o processo não ocorreu de forma homogênea podendo ter relação com as fácies sedimentares da formação.

4.3 PROCESSOS DIAGENÉTICOS

4.3.1 Matriz

A diagênese compreende os processos físicos, bioquímicos e químicos atuantes sobre os sedimentos após a deposição, em geral promovendo sua litificação, excluindo-se processos de metamorfismo (Morad 1991).

A ocorrência de matriz ocorre, em sua quase totalidade, nos arenitos da borda sul. Nestes, foram reconhecidos três processos responsáveis pela geração de matriz nos arenitos da Formação Monte Alegre: deposição primária simultânea, infiltração mecânica de argila e pseudomatriz.

A matriz por deposição simultânea encontra-se disseminada principalmente nas rochas ao longo do rio Tapajós, atingindo até 6.4% e, enquanto ao longo da BR-230 esse valor é de, no máximo, 3.2%. O processo de deposição simultânea em arenitos de

ambiente eólico, ocorre em função da disponibilidade de umidade na superfície dos grãos que aderem partículas lamosas durante a deposição ou nos esporádicos eventos tempestivos (De Ros & De Césaro 1986, Torres 1989).

A argila mecanicamente infiltrada, possui uma grande variação indo de 0 até 27% ocorrendo na forma de envelopando a superfície dos grãos ou preenchendo a totalidade de poros. A geração deste tipo de matriz está associada com depósitos atingidos por fluxos tempestivos que carregam uma grande carga de lama, e estas argilas percolam por entre os espaços porosos dos sedimentos e aderem na superfície dos grãos formando uma espécie de

cutícula (De Ros & De Césaro 1986). A dissolução de feldspato também deve ser considerada para a geração deste tipo de matriz (Pettijohn *et al.* 1987).

A pseudomatriz é produto da compactação dos fragmentos líticos ducteis que passa a ocupar os espaços porosos da rocha, sendo observado em percentuais de até 2.0% nos quartzos-arenitos da borda sul e 0.3% nos subarcósios da parte central. O forte grau de alteração grãos impossibilitou o reconhecimento de alguns grãos pelíticos.

4.3.2 Compactação

Os processos de compactação são divididos em duas etapas, na qual os efeitos físicos predominam na etapa inicial enquanto as interações químicas atuam em um segundo momento (Hiatt *et al.* 2007, Melzer & Budd 2008), estas etapas implicam na mudança da relação de contato entre grãos e na redução da porosidade (Cook *et al.* 2011).

Nos arenitos mais maduros a compactação física e química são os principais processos atuantes na diagênese (Cook *et al.* 2015). A compactação mecânica ocorre nos estágios iniciais da diagênese, provocando a diminuição da porosidade primária (Tucker 1992, Boggs Jr. 1992) e sua intensidade pode variar dependendo do teor de grãos dúcteis no arcabouço (Rittenhouse 1971).

Nas rochas analisadas, a compactação provocou a ocorrência de pseudomatriz, na borda sul, e micas contorcidas, principalmente nos subarcósios da parte central da bacia, entre os demais grãos do arcabouço (Figura 4). Nas análises petrográficas foram observados nas rochas relações de contato entre grãos, contato côncavo-convexo e suturado, diagnóstica de compactação química (Figura 4 e 5).

A variação entre os tipos de contatos dos grãos, principalmente nos subarcósios, podem ter relação com a compactação química que ocorre na transição do estágio eodiagenético para mesodiagenético, nas porções mais rasas a intermediárias deste estágio (Elias *et al.* 2004, Cook *et al.* 2011). O gradativo aumento da temperatura e pressão modifica as propriedades elásticas e inelásticas dos grãos (Schneider *et al.* 1996). Estes componentes alteram as características do grão, que passa a se comportar como um fluido viscoso, culminando em quadros de deformação irreversíveis (Fletcher 1982) como observado nos arenitos da Formação Monte Alegre.

4.3.3 Cimentação

Durante a evolução diagenética fatores químicos, físicos e biológicos, podem promover a precipitação química de minerais a partir da água de formação reservada nos poros da rocha, cimentando em parte ou totalmente nos interstícios (Ali 1981, Tucker 1991). Os quartzo-arenitos da Formação Monte Alegre, possuem principalmente cimento de sílica e de ferro (Figura 4) enquanto, nos subarcósios estes quase não estão presentes.

Os padrões de cimentação por sílica apontam para bacias mais profundas (De Ros 1998), como a Bacia do Amazonas com 5.000 metros de empilhamento sedimentar (Cunha *et al.* 1994). A cimentação de óxidos ferro pode ter relação direta com os processos da fase eodiagenética, em níveis mais rasos do soterramento, na interface sedimento-água-atmosfera (Burgess *et al.* 2016), ou na fase telodiagenética por meio da interação com fluidos meteóricos (Elias *et al.* 2004).

4.3.2.1 Sobrecrescimento de quartzo

As rochas analisadas apresentam grandes feições de sobrecrescimento sintaxial nos grãos de quartzo, que por vezes estabelecem uma relação de contato de compromisso. Os percentuais na borda sul variam entre 0,3 a 5,3% obtidos nos quartzo-arenitos (Tabela 1).

O sobrecrescimento sintaxial de quartzo tem relação intrínseca com o aumento de pressão (Banfield *et al.* 1991), no entanto este componente pode ser observado em qualquer fase da evolução diagenética sendo mais comum na mesodiagênese (Tucker 1992). A cimentação é o principal fator para a perda de porosidade primária (Battilani

et al. 1996), e este processo, demonstra a perda significativa nas rochas estudadas.

4.4 EVOLUÇÃO DIAGENÉTICA

A evolução diagenética dos arenitos da Formação Monte Alegre foi determinada a partir de relação textural entre os elementos diagenéticos com relação ao tempo de compactação (Schmidt & McDonald, 1979 Milliken & Olson 2017). Ocorrem pequenas variações na intensidade dos processos diagenéticos entre as três áreas de estudo, entretanto, é possível estabelecer um modelo geral para a evolução dessas rochas.

As evidências obtidas na petrografia, tais como grãos contorcidos, pseudomatriz, contatos côncavo-convexos e suturados, sugerem que a compactação foi o processo mais atuante na redução da porosidade.

No estágio eodiagenético ocorreu a deposição simultânea da argila, *coatings* de argila mecanicamente infiltrada recobrando os grãos e cimento de óxido-hidróxido de ferro. A estágio mesodiagenético é caracterizado pela compactação física e mecânica, pelo sobrecrescimento sintaxial de quartzo, pela dissolução de grãos de feldspato e pelo processo de sericitização. O

estágio telogenético é bem-marcado pela infiltração secundária de argila, o que gerou uma grande quantidade de matriz e porosidade.

Os fluxos episódicos de grande energia transportaram clastos de argila de maneira simultânea com os demais constituintes das rochas. Os *coatings* de argila em volta dos grãos regularam o avanço da cimentação inicial por óxido-hidróxido de ferro, no entanto, pode incrementar mais sílica no sistema durante a dissolução por pressão (Lynch *et al.* 1997).

Grãos contorcidos e deformados refletem a intensidade da compactação mecânica, sendo o principal fator pela diminuição da porosidade nos subarcósios da borda norte. Relações de contato côncavo-convexo e suturado indicam a atuação da compactação química. Sobrecrescimento sintaxial é a forma mais habitual da cimentação por sílica (Worden & Morad 2000). O desenvolvimento dessas feições ocorrer por três processos sequências no decorrer dos estágios diagenéticos: a) projeções prismáticas e romboédricas; b) coalescência das projeções; e c) formação de

cristais poliédricos (Cook *et al.* 2011). As feições prismáticas extrapolando e os contatos de compromisso sugerem que o crescimento ocorreu no início da mesodiagênese.

A interação dos grãos com a água de formação represada nos poros, provocam dissolução das bordas ou dissolução total dos grãos de feldspato, gerando porosidade secundária na forma de poros intergranulares ou módicos (Burley & Kantorowicz 1986). O teor de K e Al nessas águas gera condições para processos de neomorfismo (Worden & Burley 2009). Na Formação Monte Alegre este processo afetou mais intensamente os grãos de feldspato e de modo secundário as biotitas.

4.5 CONTROLE DA DIAGÊNESE NA QUALIDADE DO RESERVATÓRIO MONTE ALEGRE

A diagênese, incluindo compactação e cimentação, desempenha um papel significativo na qualidade de reservatórios por meio do rearranjo dos grãos e da dissolução e precipitação de componentes químicos (Islam 2009, Zhang *et al.* 2008, Ajdukiewicz & Lander, 2010, Morad *et al.* 2012, Al Gahtani 2017). Os eventos diagenéticos foram importantes fatores para redução de porosidade nos arenitos da Formação Monte Alegre e implicaram diretamente sobre as variáveis observadas ao longo desta Formação.

Para caracterização de porosidade em rochas consideradas rochas-reservatório, deve-se considerar o padrão do arcabouço dos arenitos e, além disso, o tipo de cimentação, granulometria, arranjo e forma das partículas. Esfericidade e grau de empacotamento também afetam a porosidade (Rosa *et al.* 2006, Silva 2014).

Nos arenitos da Formação Monte Alegre a porosidade total varia de 0.3 até 17.7% sendo a porosidade intragranular a mais representativa (Tabelas 2 e 3). Sendo os quartzo-arenitos da borda sul apresentam altas porosidades, superando os maiores valores até então conhecidos (Torres 1989, Lima 2010, Duarte 2017, Mendes *et al.* 2019) enquanto subarcósis do centro da bacia, a porosidade atinge até 5.4%.

A ocorrência de matriz e cimentos, principalmente de quartzo, por vezes, abundantes nos quartzo-arenitos da Formação Monte Alegre, resultaram no preenchimento dos poros e, assim, promoveram diminuição da porosidade primária do reservatório. Teoricamente, o cimento de quartzo é um causador importante de perda

de porosidade em muitos reservatórios de petróleo (Morad *et al.* 2012, Xi *et al.* 2015a, 2015b, Duo *et al.* 2018). Ademais, matriz também propícia o preenchimento ou obstrução de poros e, assim como o cimento, é considerada como um mecanismo de deterioração da qualidade do reservatório (Schmid *et al.* 2004, Xi *et al.* 2015a).

É intrigante notar que quartzo-arenitos da Formação Monte Alegre possuam maior porosidade que subarcósios, sendo estes últimos rochas com menor maturidade mineralógica. Ao comparar os dados de porosidade deste trabalho com outras pesquisas (Tabela 3) pode-se observar que os arenitos, aqui analisados, possuem porosidade variando de boa a regular.

A avaliação da estimativa de perda de porosidade foi analisada a partir do empacotamento das rochas (Kahn 1956). Das vinte e seis amostras analisadas, todos os subarcósios do centro da bacia apresentaram arcabouço fechado, enquanto todos quartzo-arenitos da borda sul, apresentam arcabouço normal e aberto.

Ao notar o grau de seleção observou-se que os quartzos arenitos da borda sul apresentam uma seleção mais moderada se comparado com subarcósios do centro da Bacia. Mais uma vez, esse dado é intrigante, pois espera-se que quartzo-arenitos apresentem melhor seleção dado sua maturidade diagenética. Ao analisar as rochas da borda sul, é possível notar o elevado grau de maturidade mineralógica, porém imaturidade textural, dado a grande quantidade de matriz. Assim, a grande variedade nas características texturais, mineralógicas e diagenéticas modificaram a porosidade destes arenitos e conseqüentemente a qualidade do reservatório.

Tabela 3- Compilação de dados de porosidade obtidos em estudos anteriores nos arenitos da Formação Monte Alegre.

Trabalho	Local	Porosidade (ϕ) %
Costa (1983)	TREND 1	8 - 17
	TREND 2	2 - 12
Torres (1989)	Borda Sul - Itaituba	0 - 25
ANP (2015)	Valores gerais	20 - 25
Duarte (2017)	Monte Alegre	2.4 - 3
	Rio Tapajós	11 - 17
Neste Trabalho (2022)	Rodovia PA 255	1.5-2.2
	Rio Maecuru	2.5-5.4
	Rio Tapajós	10.9-12-8
	Rodovia BR-230	0.3-17.7

5 CONCLUSÕES

A análise petrográfica quantitativa é uma técnica que analisa os poros de forma bidimensional, rápida e de baixo custo. Os resultados obtidos coadunam com dados de outras pesquisas. No entanto, a técnica apresenta mais vantagens do que desvantagens, sendo uma boa opção para análises preliminares de porosidade em rochas reservatórios.

Os arenitos da Formação Monte Alegre foram analisados em três áreas distintas na bacia: área Monte Alegre (centro da bacia), Br-230 e área do Tapajós (borda sul da bacia). Os arenitos da área Monte Alegre foram classificados como subarcósios, com porosidades de até 5.4%, homogêneos, bem selecionados, com grãos arredondados a sub-arredondados e com cimentação silicosa. Na borda sul da bacia (área Tapajós e BR-230), os arenitos da área Monte Alegre foram classificados como quartzo-arenitos, com porosidades que atingem até 17.7%. São arenitos heterogêneos, moderadamente a bem selecionados, com grãos arredondados a sub-arredondados e cimentação ferruginosa e silicosa.

Existem diferenças entre o empacotamento e cimentação como aspectos importantes para as diferenças de porosidade observadas nos arenitos da Formação Monte Alegre. Sugere-se que o empacotamento fechado da área Monte Alegre e a cimentação silicosa tenha relação com possíveis influências da intrusão Magmática Penacateua, que acabou afetando a textura destes arenitos. Nesta área estas rochas estavam sob influência de eo até mesodiagênese.

Na borda sul, os arenitos da Formação Monte Alegre apresentam seleção dos grãos e textura da rocha, notando que ocorreu diagênese e compactação diferencial relacionadas à telodiagênese diferencial, mais atuante nas bordas da bacia.

REFERÊNCIAS

- Aase N. E., Bjørkum P. A., Nadeau P. H. 1996. The effect of grain coating microquartz on preservation of reservoir porosity. *AAPG Bulletin*, **80**: 1654–1673.
- Agência Nacional do Petróleo-ANP. 2015. Bacia do Amazonas: sumário geológico e setores em oferta. *In*: 13ª Rodada de Licitações. [S.l.], Agência Nacional do Petróleo (ANP), Gás Natural e Biocombustíveis. 17p.
- Ajdukiewicz J.M. & Lander R.H. 2010. Sandstone reservoir quality prediction: The state of the art. *AAPG Bulletin*, **94** (8): 1083–1091. DOI:10.1306/intro060110.
- Al Gahtani F. 2017. Petrology, diagenesis and reservoir quality in the Hawkesbury Sandstone, Southern Sydney Basin, Australia. *J Geol Geophys*, **6**:3. DOI: 10.4172/2381- 8719.1000283.
- Brookfield M.E 1991. Eolian systems. *In*: Walker R. & James N. (eds.) *Facies models – response to sea level change*. Ontario, Geological Association of Canadá. p. 143-156.
- Basu A. 1985. Influence of climate and relief on compositions of sands released at source areas. *In*: Zuffa G.G. (ed). *Provenance of arenites*. Dordrecht, D. Reidel, p 1–18.
- Battilani G.A., Gomes N.S., Guerra W.J. 1996. Evolução diagenética dos arenitos da Formação Morro do Chapéu, Grupo Chapada Diamantina, na região de Morro do Chapéu, Bahia. *Geonomos*, **4**: 81- 89.
- Boggs Jr. S. 2012. *Petrology of sedimentary rocks*. Cambridge, Cambridge university press, UK. 600 p.
- Burgess D.T., Kettler R.M., Loope D.B. 2016. The geologic context of wonderstone: a complex, outcrop scaled pattern of ironoxide cement. *Journal of Sedimentary Research*, **86**: 498-511.
- Burley S.D. & Kantorowicz D. 1986. Thin section and S.E.M. textural criteria for the recognition of cement-dissolution porosity in sandstones. *Sedimentology*, **33**: 587-604.
- Caputo M.V., Rodrigues R., Vasconcelos D.N.N.de. 1971. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: Histórico e atualização. *In*: SBG, 36º Congresso Brasileiro de Geologia, Natal, *Anais*[...], Natal, v. 3, p. 35-46.
- Caputo M.V. 1984. *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil*. PhD Theses, Pós-Doutorado, Santa Barbara, California University, 583 p.
- Cook J.E., Goodwin L. B., Boutt D.F. 2011. Systematic diagenetic changes in the grain-scale morphology and permeability of a quartz-cemented quartz arenite. *AAPG Bulletin*, **95** (6): 1067–1088. Doi:10.1306/11151010009.

- Cook J.E., Goodwin L. B., Boutt D.F., Tobin H.J. 2015. The effect of systematic diagenetic changes on the mechanical behavior of a quartz-cemented sandstone. *Geophysics*, **80** (2): d145–d160. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0026.1>.
- Cordani U.G., Sato K., Teixeira W., Tassinari C.C.G., Basei M.A.S. 2000. Crustal evolution of the South American Plataform. *In*: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds). *Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro, International Geological Congress, 31, p. 19-40.
- Costa. M. & Selbach H. 1981. *Estudo sedimentológico da Formação Monte Alegre na área de Autás-Mirin, Bacia do Amazonas, Relatório Interno*. Rio de Janeiro. Petrobrás/Deplex/Labor/Denor/Dinter, 83p.
- Costa M.G.F. 1984. *Fácies deposicionais e ambientes de sedimentação da Formação Monte Alegre (Neo-Carbonífero), na área de Autás-Mirim e adjacências – Bacia do Médio Amazonas*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação. Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Pernambuco, 90 p.
- Costa M.S., Oliveira R.S., Barbosa R.C.B., Mota C.B. 2022. Early Pennsylvanian fluvial - Aeolian interplay in the Amazonas Basin (central-western Gondwana) and its relation to marine transgression. *Journal of South American Earth Sciences*, **104**: 102857. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102857>.
- Cunha P. R. C. 2000. *Análise estratigráfica dos sedimentos eo-mesodevonianos da porção ocidental da Bacia do Amazonas sob a ótica da estratigrafia de seqüências no interior cratônico*. Dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 263 p.
- Cunha P.R.C., Gonzaga F.G., Coutinho L.F.C., Feijó F.J. 1994. Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras* **1**(8): 47-55.
- Cunha, P.R.C., Melo, J.H.G., Silva, O.B. 2007. Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, **2** (15): 227-251.
- De Ros L.F. & Césero P. 1986. Argilas em arenitos-bases para a interpretação petrogenética. *In*: 34º Congresso Brasileiro de Geologia, Goiânia, Goiás, *Anais [...]*, v.4, p. 1663-1670
- De Ros LF. 1998 Heterogeneous generation and evolution of diagenetic quartzarenites in the siluro-devonian Furnas Formation of the Paraná Basin, southern Brazil. *Sedimentary geology* 116: 99-128.
- Dou W., Liu L., Wu K., Xu Z., Feng X. 2018. Diagenesis of tight oil sand reservoirs: Upper Triassic tight sandstones of Yanchang Formation in Ordos Basin, China. *Geological Journal*, 53:707–724. DOI: 10.1002/gj.2922.
- Duarte J.P. 2017. *Caracterização da porosidade e permeabilidade em arenitos da Formação Monte Alegre, Carbonífero da Bacia do Amazonas*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, 68p.

- Elias A.R.D., Ros L.F., Mizusaki A.M.P., Anjos S.M.C. 2004. Diagenetic patterns in eolian/coastal sabkha reservoirs of the Solimões Basin, Northern Brazil. *Sedimentary Geology*, **169**: 191-217.
- Fletcher R.C. 1982. Coupling of diffusional mass transport and deformation in a tight rock. *Tectonophysics* **83**:275–291.
- Folk R. L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, TX., Hemphill's Pub., 182p
- Franks S.G. & Forester R.W. 1984. Relationships among secondary porosity, pore fluid chemistry and carbon dioxide, Texas Gulf Coast. In: McDonald D.A. & Surdam R.C. (eds.). *Clastic diagenesis*. [S.l.], American Association of Petroleum Geologists. (AAPG Memoir 37).
- Galehouse J. S. 1971. Sedimentation analysis. In: Carver R. R. (ed.). *Procedures in sedimentary petrology*. New York, Wiley-Interscience. p. 69–94.
- Hiatt E.E, Kurtis Kyser T. Mostafa F., Paulo P., Holk G.J., Riciputi L.R. 2007. Early quartz cements and evolution of paleohydraulic properties of basal sandstones in three Paleoproterozoic continental basins: Evidence from *in situ* $\delta^{18}\text{O}$ analysis of quartz cements. *Chemical Geology*, **238** (1–2): 19-37.
- Islam M.A. 2009. Diagenesis and reservoir quality of Bhuban sandstones (Neogene), Titus Gas Field, Bengal Basin, Bangladesh. *J Asian Earth Sci.*, **35**:89–100.
- Kahn J.S. 1956. The analysis and distribution of the properties of packing in sand-size sediments. *Jour. Geology*, **64**:385-395
- Lawan A.Y., Worden R. H., Utley J.E.P., Crowley S.F. 2021. Sedimentological and diagenetic controls on the reservoir quality of marginal marine sandstones buried to moderate depths and temperatures: Brent Province, UK North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, **128**. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104993>.
- Lima H. P., Nogueira A. C. R., Truckenbrodt W., Mendes A. C. 2008. Sedimentação Siliciclástica-carbonática do Carbonífero Inferior da Bacia do Amazonas, Monte Alegre-PA. In: SBG, 44º Congresso Brasileiro de Geologia, 2008, Curitiba. *Anais*[...].
- Lima H.P. 2010. *A sucessão siliciclásticas-carbonática neocarbonífera da Bacia do Amazonas, região de Itaituba e Monte Alegre (PA)*. Dissertation, Universidade Federal do Pará, Belém, 124p.
- Loboziak S., Melo J.H.G., Matsuda N.S., Quadros L.P. 1997. Miospore biostratigraphy of the type Barreirinha formation (Curuá Group, Upper Devonian) in the Tapajós River Area, Amazon Basin, North Brazil. *Bull Centre Rech. Elf. Explor. Prod*, **21** (1):187-205.
- Lynch F. L. 1997. Mineral/water interaction, fluid flow, and Frio sandstone diagenesis: Evidence from the rocks. *AAPG Bulletin*, **80**: 486–504

Miall A. 1991. Alluvial deposits *In*: Walker R.G. & James N.P. (eds). *Fácies models: response to sea level change*. First edition. [S.l.], Geological Association of Canada. p. 119-142.

Miall A.D. 1994. *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. New York, Springer-Verlag, 582p.

Matsuda N. 2002. *Carbonate sedimentation cycle and origin of dolomite on the Lower Pennsylvanian intracratonic Amazon Basin, Northern Brazil*. PhD Thesis, University of Tokyo, 231p.

Matsuda N.S., Góes A.T.M.O., Wanderley Filho J.R. 2006. *Relatório geológico do Paleozoico do Rio Tapajós, borda sul da Bacia do Amazonas, Pará*. 2ª ed. Manaus, Petrobrás, 87p.

Matsuda N. S., Winter W. R., Wanderley Filho W. R., Cacela A. S. M. 2010. The Paleozoic of Amazonas Basin south edge, Tapajós River –Pará State. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **18**(1): 123–152.

Melo J. H. G. & Loboziak S. 2003. Devonian-early Carboniferous miospore biostratigraphy of the Amazon Basin, northern Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology: An International Journal*, **124**: 131–202.

Melzer S.E & Budd D.A. 2008. Retention of high permeability during shallow burial (300 to 500 m) of carbonate grainstones. *Journal of Sedimentary Research*, **78**: 548–561. Doi: 10.2110/jsr.2008.060.

Mendes A.C., Silva E. F., Fonseca A. I., Nogueira A.C.R., Silva T.F., Nascimento J.S.S., Igreja H.F.E. 2019. Provenance of Upper Pennsylvanian siliciclastic-carbonate deposits from the Monte Alegre and Itaituba formations, North Brazil: an integrated study of sandstone petrography, heavy mineral analysis and garnet geochemistry. *Geological Journal*. DOI: 10.1002/gj.3676.

Milliken K.L & Olson T. 2017. Silica diagenesis, porosity evolution, and mechanical behavior in siliceous mudstones, mowry shale (cretaceous), rocky mountains, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*. **87** (4): 366–387. <https://doi.org/10.2110/jsr.2017.24>.

Morad S., Ketzer J. M., De Ros L. F. 2000. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology*, **47**: 95-120. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00007.x>

Morad S., Ketzer J.M, De Ros L.F. 2012. Linking diagenesis to sequence stratigraphy: an integrated tool for understanding and predicting reservoir quality distribution. *Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ.* **45**: 1–36.

Mota F. G. & Mendes A. C. 2016. Análise de fácies da Formação Monte Alegre, região de Monte Alegre e Itaituba, Estado do Pará. *In: 48° Congresso Brasileiro de Geologia, 2016, Porto Alegre. Anais[...].* São Paulo, p. 7487.

Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. 1987. *Sand and sandstones*. 2nd ed. New York, Springer-verlag, 533p.

Playford G. & Dino R. 2000. Palynostratigraphy of upper palaeozoic strata (Tapajós Group), Amazonas Basin, Brazil. *Palaeontographica. Abt. B. Palaeophytologie*, Stuttgart, **255**: 1-46.

Rittenhouse G. 1971. Mechanical compaction of sands containing different percentages of ductile grains: a theoretical approach. *AAPG Bull.* **5**(1): 92-96.

Rosa A.J., Carvalho R.S., Xavier J.A.D. 2006. *Engenharia de reservatórios de petróleo*. 1ª ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência.

Santos D.B. dos, Fernandes P.E.C.A, Dreher A.M., Cunha F.M.B., Basei M.A.S., Teixeira J.B.G. 1975. Geologia. *In: Brasil. Departamento Nacional da Produção Nacional. Projeto RADAM, Folha SB.21 Tapajós.* Rio de Janeiro, p. 15- 99. (Levantamentos de Recursos Naturais, 7).

Schmid S., Worden R. H., Fisher Q. J. 2004. Diagenesis and reservoir quality of the Sherwood sandstone (Triassic), Corrib field, Slyne Basin, west of Ireland. *Marine and Petroleum Geology*, **21**: 299–315.

Schmidt V. & McDonald D.A. 1979. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. *In: Scholle P & Schluger P.R. Aspects of diagenesis.* [S.l., s.n]. (Sepm Society for Sedimentary Geology, v.26).
<https://doi.org/10.2110/pec.79.26.0175>.

Schneider F., Potdevin J.L., Wolfi S., Faille I. 1996. Mechanical and chemical compaction model for sedimentary basin simulators. *Tectonophysics*, **263** (issues 1–4): 307-317. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(96\)00027-3](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(96)00027-3).

Silva P.A.S. 2014. *Paleoambiente e diagênese da Formação Itaituba, carbonífero da bacia do Amazonas, com base em testemunho de sondagem, região de Uruará, Pará.* Dissertation, Pós-Graduação de Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, xiv, 77p.

Stonecipher S.A., Winn JR. R.D., Bbishop M.G. 1984. Diagenesis of the frontier formation, moxa arch: a function of sandstone geometry, texture and composition, and fluid flux: part 3. Applications in exploration and production. *AAPG Special Volumes*, 289-316. (Spec. Pub. Type: memoir).

Stradioto M.R., Kiang C.H., Caetano-Chang C.H. 2008. Caracterização petrográfica e aspectos diagenéticos dos arenitos do Grupo Bauru na região sudoeste do Estado de São Paulo. *Rev. Esc. Minas*, **61** (4). <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672008000400005>

Torres A. M. & Truckenbrodt W. 1989. Características petrográficas e diagenéticas dos arenitos da Formação Monte Alegre na região do Rio Tapajós, Bacia do Amazonas. *In: 36 Cong. Bras. Geologia., Natal. In: SBG, 36º Cong. Bras. Geologia, Natal. Anais[...], v. 1. p. 360-373.*

Torres A.M. 1989. *Litofácies e evolução diagenética dos arenitos da Formação Monte Alegre na região do Rio Tapajós, Bacia do Amazonas.* Belém. UFPA. 147p. Dissertação de mestrado.

Tucker M.E. 1992. *Sedimentary petrology: an introduction.* 2nd ed. Blackwell scientific publications. 252 pp.

Walker R. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. *In: Walker R. & James N. (eds.) Facies models – response to sea level change.* Ontario, Geological Association of Canadá. p. 1-15.

Worden R. H. & Morad S. 2000. Quartz cementation in oil field sandstones: A review of the key controversies. *In: Worden R. & Morad S. (eds.). Quartz cementation in sandstones.* [S.l., s.n.], p. 1–20. (International Association of Sedimentologists Special Publication, 29).

Worden R.H. & Morad S. 2003. Clay minerals in sandstones: controls on formation distribution and evolution. *In: Worden R. H. & Morad S. (ed.). Clay mineral cements in sandstones.* Oxford, International Association of Sedimentologists Special Publication, Blackwell Publishing, p. 3-41.

Worden R. H. & Burley S. D. 2003. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. *In: Stuart D., Burley S. D., Richard H. W. (eds.). Sandstone diagenesis: recent and ancient.* Oxford: Blackwell-Sci Publication, p. 3–44.

Xi K. L., Cao Y. C., Jahan J., Zhu R., Bjørlykke K., Haile B. G., Hellevang H. 2015a. Diagenesis and reservoir quality of the Lower Cretaceous Quantou Formation tight sandstones in the southern Songliao Basin, China. *Sedimentary Geology.* <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.10.007>.

Xi K. L., Cao Y. C., Jahan J., Zhu R. K., Bjørlykke K., Zhang X. X., Hellevang H. 2015b. Quartz cement and its origin in tight sandstone reservoirs of the Cretaceous Quantou formation in the southern Songliao basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, **66**: 748-763.

Zhang J. L., Qin L. J., Zhang Z. J. 2008. Depositional facies, diagenesis and their impact on the reservoir quality of Silurian sandstones from Tazhong area in central Tarim Basin, western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **33**: 42–60

Zuffa G.G. 1985. Optical analyses of arenites: influence of methodology on compositional results. *In: Zuffa G.G. (ed.). Provenance of arenites, NATO-ISI.* Dordrecht, Reidel Publ. Co. P.165-189.