

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
CURSO DE GEOLOGIA**

**JANAÍNA PEREIRA DUARTE**

**CARACTERIZAÇÃO DA POROSIDADE E PERMEABILIDADE EM ARENITOS DA  
FORMAÇÃO MONTE ALEGRE, CARBONÍFERO DA BACIA DO AMAZONAS**



**CURITIBA**

**2017**

**JANAÍNA PEREIRA DUARTE**

**CARACTERIZAÇÃO DA POROSIDADE E PERMEABILIDADE EM ARENITOS DA  
FORMAÇÃO MONTE ALEGRE, CARBONÍFERO DA BACIA DO AMAZONAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Geologia da Universidade Federal do  
Paraná como requisito parcial à obtenção do grau  
de Bacharel em Geologia.

Orientador(a): Prof. Fernando Mancini

**CURITIBA**

2017

Mãe, pai e irmão sem vocês nada disso seria possível.

Obrigada pelo apoio, carinho e compreensão!

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Fernando Mancini, pela orientação neste Trabalho de Conclusão de Curso, pelo incentivo, atenção e disposição durante todo o ano.

À PETROBRAS pelo financiamento do Projeto Caracterização Tectono-Estrutural da Bacia do Amazonas (CATEA) nos anos de 2007-2010, via PROFEX, que permitiu o acervo de amostras.

Ao LAMIR-DEGEOL pelas análises de microtomografia computadorizada de raios X, pela disposição de equipamentos e recursos e principalmente aos técnicos e funcionários que lá trabalham, cujo apoio e ajuda foram fundamentais.

Ao LAPEM-DEGEOL pela disponibilidade dos microscópios.

À Prof<sup>a</sup>. Dra. Liliane Janikian (UNIFESP) pelo empréstimo do permeâmetro e ao Prof. Dr. Carlos Conforti Guedes (UFPR) por viabilizar o empréstimo.

Aos meus colegas de curso e principalmente às minhas companheiras de equipe na disciplina de mapeamento geológico, Bianca Rocha e Taís Muniz, pela amizade, companheirismo, incentivo e inúmeros auxílios acadêmicos durante essa jornada geológica.

À minha família pelo suporte emocional durante os 5 anos de universidade, pelo companheirismo e compreensão.

## RESUMO

A Bacia do Amazonas é uma sinéclise intracratônica que se desenvolveu na porção setentrional do continente Sul-Americano, possui uma área de 500.000 km<sup>2</sup> e se localiza no norte do Brasil abrangendo os estados do Amazonas e do Pará. A Formação Monte Alegre compõe a porção basal do Carbonífero Superior da Bacia do Amazonas, e é composta por conglomerados basais cobertos por arenitos de granulação média com estratificação cruzada de médio porte. O presente trabalho tem como objetivo a caracterização comparativa de porosidade e permeabilidade dos arenitos das áreas Monte Alegre e Médio Tapajós da Formação Monte Alegre com a utilização de diferentes técnicas analíticas. São elas: a microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT) a descrição macroscópica e em lupa das amostras, a descrição petrográfica e a média quantitativa da permeabilidade através da injeção de ar. O micro-CT é uma técnica não-destrutiva, de alta resolução que permite a obtenção de imagens tridimensionais das amostras estudadas, bem como a quantificação da área, volume total e volume de vazios. A análise petrográfica em microscópio óptico é uma técnica de visualização bidimensional em seção delgada utilizada para descrição de determinados componentes, que fornece uma estimativa imprecisa da porosidade. O permeâmetro de ar foi utilizado nas amostras de mão para obtenção de permeabilidade relativa dessas, também é considerada uma técnica barata e rápida. Com a aplicação destas técnicas, observou-se diferenças permo-porosas entre os arenitos da Formação Monte Alegre. Os arenitos da área Médio Tapajós apresentam valores de permeabilidade e porosidade elevados, poros grandes e alargados e empacotamento aberto. Enquanto na área Monte Alegre os arenitos apresentam valores de permeabilidade e porosidade consideravelmente menores, e um empacotamento fechado. Estas diferenças texturais, mineralógicas e de porosidade e permeabilidade podem ser explicadas por alguns fatores: localização paleogeográfica das amostras na bacia, influência do Magmatismo Penatecaua e exposição a processos telodiagenéticos.

**Palavras chave:** Sedimentologia, Rochas reservatórios, Rochas sedimentares.

## ABSTRACT

The Amazon Basin is an intracranic basin developed in the northern portion of the South American continent, covers an area of 500,000 km<sup>2</sup>, located in the north of Brazil covering the states of Amazonas and Pará. The Monte Alegre Formation comprises the basal portion of the Upper Carboniferous of the Amazon Basin, and is composed of basal conglomerates covered by medium sized sandstone cross-bedding stratification. The present paper aims to characterize the porosity and permeability of the sandstones of the Monte Alegre and Middle Tapajós areas of the Monte Alegre Formation using different analytical techniques. They are: the micro computed tomography (micro-CT), the quantitative petrography and the quantitative average of the permeability through the injection of air. The micro-CT is a non-destructive, high resolution technique that allows the acquisition of 3D images of the studied samples, as well as the quantification of the area, total volume and volume of voids. Petrographic analysis under optical microscopy is a thin section two dimensional visualization technique used to describe certain components, which provides an imprecise estimate of porosity. The air permeameter was used in hand samples to obtain relative permeability of these, it is also considered a cheap and fast technique. With the application of these techniques, it was observed permo-porous differences between the sandstones of the Monte Alegre Formation. The sandstones of the Tapajós Middle area present high permeability and porosity values, large and wide pores and open packing. While in the Monte Alegre area the sandstones have considerably lower permeability and porosity values, and a closed packing. These textured, mineralogical and porosity and permeability differences can be explained by some factors: paleogeographic location of the samples in the basin, influence of Penatecaua Magmatism and exposure to telodiagenetic processes.

*Keywords:* sedimentology; reservoir rocks; sedimentary rocks.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Figura de localização das áreas de estudo no Estado do Pará, a área do Médio Tapajós é indicada pela letra A, enquanto a área Monte Alegre pela letra B. (CPRM 2005). .....	2
Figura 2: Carta cronoestratigráfica da Bacia do Amazonas, modificada de Cunha et al. (2007). .....	4
Figura 3: Corte transversal de um meio poroso (Medeiros 2015). .....	9
Figura 4: Imagem esquemática da conectividade entre os poros em uma rocha permeável (Medeiros 2015). .....	10
Figura 5: Imagem esquemática do experimento realizado por Henry Darcy que consistia no cálculo do fluxo de água através de um filtro de areia (Retirado de Rosa et al. 2006). .....	11
Figura 6: Esquema de etapas para aquisição de imagens tridimensionais no tomógrafo de raios X (Palombo, 2017). .....	13
Figura 7: Fluxograma dos métodos e técnicas aplicadas. ....	14
Figura 8: Área definida para determinação de porosidade em fotomicrografias de seções delgadas. ....	16
Figura 9: Equipamento Tiny Perm II fabricado pela empresa New England Research. 1) Bico de borracha que é posicionado na superfície a ser analisada; 2) Seringa; 3) Microcontrolador com display para monitorar o volume de ar na seringa e o pulso de vácuo transitório na superfície da amostra (Retirado de New England Research). .....	17
Figura 10: Gráfico em escala logarítmica para calibração dos valores de permeabilidade obtidos através do equipamento Tiny Perm II (New England Research, manual do fabricante). .....	18
Figura 11: A) Quartzo arenito de cor branca acastanhada, com granulação fina a média e grãos arredondados a sub-arredondados, amostra MA-15; B) Fotomicrografia da amostra MA-15 em nicóis paralelos. Notar contatos planos a concavo-convexo entre os cristais e poucas alterações ferruginosas na matriz; C) Fotomicrografia da amostra MA-15 em nicóis cruzados. Notar presença de grãos de quartzo, matriz siltico argilosa e cimentação incipiente. ....	20
Figura 12: A) Quartzo arenito de cor branca com superfície de alteração de cor cinza escuro, macroscopicamente tem-se granulação fina a média e grãos arredondados a sub-arredondados, amostra MA-18; B) Fotomicrografia da amostra MA-18 em nicóis paralelo. Notar contatos predominantemente planos entre os cristais, e empacotamento	

fechado; C) Fotomicrografia da amostra MA-18 em nicóis cruzados. Notar presença de grãos de biotita e ausência de matriz na amostra. ....	21
Figura 13: A) Quartzo arenito de cor amarelo acastanhado levemente intemperizada, macroscopicamente apresenta-se com granulação fina e grãos arredondados a sub-arredondados, amostra TPJ-28A; B) Fotomicrografia da amostra TPJ-28A em nicóis paralelos. Notar contatos planos e pontuais entre os cristais, os grãos são pouco selecionados variando de granulação fina a grossa e o empacotamento é aberto com boa quantidade de poros e cimento ferruginoso; C) Fotomicrografia da amostra TPJ-28A em nicóis cruzados.....	23
Figura 14: A) Quartzo arenito de cor amarelo acastanhado levemente intemperizada, macroscopicamente têm-se com granulação média e grãos arredondados a sub-arredondados, amostra TPJ-29A; B) Fotomicrografia da amostra TPJ-29A em nicóis paralelos. Notar contatos planos e pontuais entre os cristais, os grãos são pouco selecionados variando de granulação média a grossa e o empacotamento é aberto com boa quantidade de poros e cimento ferruginoso; C) Fotomicrografia da amostra TPJ-29A em nicóis cruzados.....	24
Figura 15: A) Quartzo arenito de cor amarelo acastanhado levemente intemperizada, com granulação fina a média e grãos sub-arredondados, amostra TPJ-29B; B) Fotomicrografia da amostra TPJ-29B em nicóis paralelos. Notar contatos planos e pontuais entre os cristais, os grãos são pouco selecionados variando de granulação fina a média e o empacotamento é aberto com boa quantidade de poros e cimento ferruginoso; C) Fotomicrografia da amostra TPJ-29B em nicóis cruzados.....	25
Figura 16: Classificação para arenitos de Folk (1980). Os pontos vermelhos indicam as amostras da área de Monte Alegre e os pontos verdes as amostras do Médio Tapajós, ambos os conjuntos são classificados como quartzarenitos. ....	26
Figura 17: A, B e C) Imagens tridimensionais das amostras TPJ-28A, TPJ-29A e TPJ-29B, respectivamente.....	28
Figura 18: Cortes bidimensionais na amostra TPJ-28A da Área do Médio Tapajós. Nota-se o empacotamento moderado, com quantidade razoável de poros e poros alargados caracterizando uma porosidade móldica, porém a conectividade entre estes poros é limitada. Os constituintes da amostra são representados em escalas de tons de cinza, sendo cinza médio e escuro, os grãos de quartzo e cimentação silicosa e a cimentação ferruginosa ocorrem em tons de cinza clara a branco; os minerais opacos se apresentam com alta luminescência e na cor branca. ....	29

Figura 19: Cortes bidimensionais na amostra TPJ-29 A pertencentes a área do Médio Tapajós. Nota-se o empacotamento moderado a aberto, com quantidade razoável de poros, entre estes poros grandes e alargados caracterizando uma porosidade móldica, com conectividade moderada entre os poros. Os constituintes da amostra são representados em escalas de tons de cinza, sendo cinza médio e escuro, os grãos de quartzo. A cimentação silicosa e a ferruginosa ocorre em grande quantidade e se apresentam em tons de cinza claro a branco; os minerais opacos se apresentam com alta luminescência e na cor branca. ....30

Figura 20: Cortes bidimensionais na amostra TPJ-29 B pertencentes a área Tapajós. Nota-se o empacotamento moderado, com poros relativamente conectados, de tamanhos médios. Os constituintes da amostra são representados em escalas de tons de cinza, sendo cinza médio e escuro, os grãos de quartzo. A cimentação silicosa e a cimentação ferruginosa são reduzidas e se apresentam em tons de cinza claro a branco; os minerais opacos se apresentam com alta luminescência e na cor branca. ....31

Figura 21: Mapa de isópacas da Formação Monte Alegre, detalhe para as áreas de estudo em vermelho. Retirada de Neves (1990) .....36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos dados de permeabilidade e porosidade obtidos em estudos anteriores nos arenitos da Formação Monte Alegre. ....8

Tabela 2: Relação entre os tipos e tamanho de poros (modificado de Medeiros 2015). .9

Tabela 3: Classificação quanto ao tipo de porosidade, modificada de Palombo (2017).  
..... 10

Tabela 4: Relação dos parâmetros utilizados na obtenção das imagens tridimensionais no tomógrafo. .... 17

Tabela 5: Valores de porosidade obtidos através da quantificação de área em lâmina petrográfica.....26

Tabela 6: Relação de volume total e de poros das amostras analisadas pelo tomógrafo.  
.....32

Tabela 7: Síntese dos dados analíticos obtidos. ....35

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Gráfico em escala logarítmica na base 10 ilustrando a relação entre as permeabilidades dos arenitos das áreas Monte Alegre e Médio Tapajós. ....	33
Gráfico 2: Gráfico ilustrando a variação entre os valores de permeabilidade (variando de dezenas a milhares de milidarcys), apresentado em uma escala linear.....	33
Gráfico 3: Correlação entre a permeabilidade obtida diretamente pelo equipamento Tiny Perm II e os valores obtidos pela equação da reta fornecida pelo fabricante para correção dos valores diretos do equipamento.....	34

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. JUSTIFICATIVA .....	2
1.2. OBJETIVOS .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA .....	3
2.2.1 Formação Monte Alegre .....	5
2.2.2 Formações Itaituba e Nova Olinda.....	6
2.2.3 Formação Andirá .....	7
2.2 MAGMATISMO PENATECAUA.....	7
2.3 POROSIDADE E PERMEABILIDADE DOS ARENITOS DA FORMAÇÃO MONTE ALEGRE: TRABALHOS ANTERIORES.....	7
2.4 POROSIDADE E PERMEABILIDADE: REVISÃO CONCEITUAL.....	8
2.5 MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA.....	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA .....	15
3.2 PETROGRAFIA QUANTITATIVA .....	15
3.3 MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X .....	16
3.4 PERMEÂMETRO DE AR PORTÁTIL.....	17
4. RESULTADOS .....	19
4.1 PETROGRAFIA .....	19
4.1.1 Área de Monte Alegre .....	19
4.1.2 Área do Médio Tapajós.....	21
4.2 ANÁLISE DE POROSIDADE EM LÂMINA PETROGRÁFICA .....	26
4.3 ANÁLISE DE POROSIDADE EM IMAGENS TRIDIMENSIONAIS.....	27
4.4 ANÁLISE DE PERMEABILIDADE.....	32
4.5 VISÃO GERAL DOS DADOS DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE .....	34
5. DISCUSSÃO .....	35
5.1 COMPARAÇÃO PETROGRÁFICA .....	35

5.2 CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE POROSIDADE, PERMEABILIDADE E PETROGRAFIA .....	36
5.3 PALEOGEOGRAFIA, DIAGÊNESE E GERAÇÃO DE POROSIDADE .....	38
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	41
REFERÊNCIAS.....	43
APENDICE I: Fichas petrográficas.....	46

## 1. INTRODUÇÃO

Rochas reservatórios são importantes fontes de armazenamento de recursos energéticos como petróleo e gás. Estes recursos ocupam espaços vazios, chamados de poros, nestas rochas. Com isso, o conhecimento da morfologia destes poros, suas conectividades e relações espaciais são de primordial importância para a indústria petrolífera (Reis Neto et al. 2011).

Atualmente diversos ensaios analíticos são utilizados na investigação quantitativa e qualitativa de porosidade e permeabilidade, entre eles, pode-se citar métodos de baixo custo como a injeção de gás ou mercúrio em picnômetros e análises de lâminas petrográficas. Porém todas estas técnicas apresentam erros e restrições. O uso de picnômetros não permite a visualização do arcaço poroso e as análises petrográficas permitem somente a visualização em duas dimensões (Vergés et al. 2011).

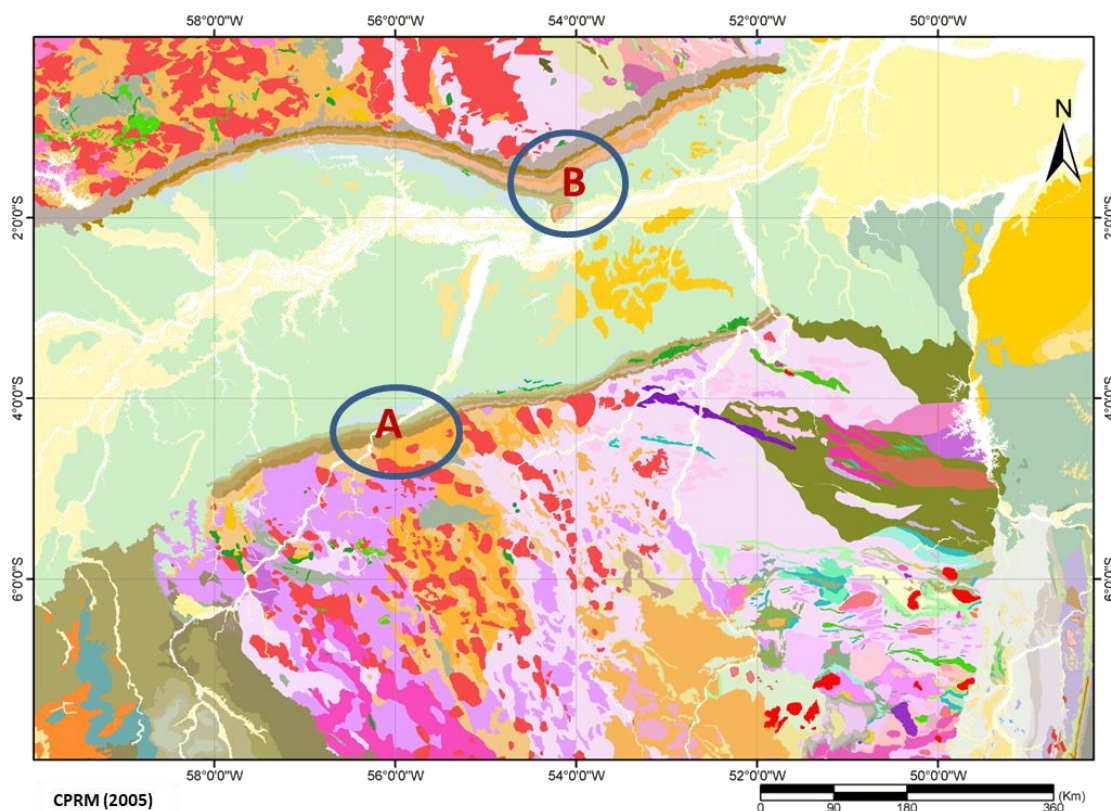
As técnicas com maior grau de sofisticação como a microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT) na análise de porosidade e permeabilidade visa suprir as deficiências destas outras técnicas analíticas, e permite a visualização tridimensional das estruturas internas da amostra, além do cálculo de volume de poros (Lopes et al. 2012).

Com isso, a comparação da efetividade e necessidade do uso de diferentes técnicas para análise de porosidade e permeabilidade de rochas reservatórios viabiliza a escolha de um ensaio analítico adequado, levando em consideração custo-benefício, praticidade e qualidade dos dados obtidos.

Para realizar tal comparação, o presente trabalho pretende caracterizar a porosidade e permeabilidade de arenitos pertencentes a Formação Monte Alegre, carbonífero superior da Bacia do Amazonas, por representar um intervalo deposicional com características permo-porosas e estratigráficas que o tornam um reservatório de interesse para a indústria petrolífera (Pereira et al. 2012).

Geograficamente, a área de estudo se localiza na porção norte do Estado do Pará e compreende duas localidades, a região de Monte Alegre e a região de Tapajós, sendo os arenitos obtidos nestas regiões ambos pertencentes à Formação Monte Alegre. Em termos paleogeográficos, os arenitos da região de Monte Alegre se

localizam no centro da Bacia do Amazonas, enquanto que os arenitos do Médio Tapajós se localizam na borda da bacia.



**Figura 1:** Figura de localização das áreas de estudo no Estado do Pará, a área do Médio Tapajós é indicada pela letra A, enquanto a área Monte Alegre pela letra B. (CPRM 2005).

### 1.1. JUSTIFICATIVA

A grande gama de ensaios analíticos possíveis para a determinação de porosidade e seus respectivos resultados, erros e restrições são a base para a elaboração deste projeto que visa a determinação da permeabilidade e porosidade dos arenitos da Formação Monte Alegre, e através desta determinação analisar a coerência e efetividade dos dados gerados pelas técnicas analíticas escolhidas.

Dessa forma, a proposta da pesquisa é caracterizar a permeabilidade e porosidade dos arenitos da Formação Monte Alegre, através da integração dos dados tridimensionais dos poros e cálculo de volume fornecidos pelo micro-CT; dos cálculos bidimensionais obtidos da contagem de pontos em lâminas petrográficas; e os dados de permeabilidade e porosidade obtidos pelo permeâmetro de ar portátil. E por fim,

efetuar uma avaliação comparativa entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos.

## **1.2. OBJETIVOS**

Essa monografia tem como objetivos a caracterização da porosidade e permeabilidade de arenitos em duas localidades da Formação Monte Alegre, os objetivos específicos são apresentados a seguir.

- Caracterização petrográfica da composição e textura dos arenitos da Formação Monte Alegre, abrangendo as áreas de estudo Monte Alegre e Tapajós.

- Análise de porosidade e permeabilidade através de diferentes técnicas analíticas, sendo elas: petrografia quantitativa (contagem de pontos), microtomografia computadorizada de raios-X e medição de permeabilidade com uso de permeâmetro portátil de ar.

- Integração dos resultados obtidos por estas técnicas analíticas e comparação da efetividade de cada método na caracterização de permeabilidade e porosidade de arenitos.

- Discussão acerca dos resultados obtidos e interpretações geológicas.

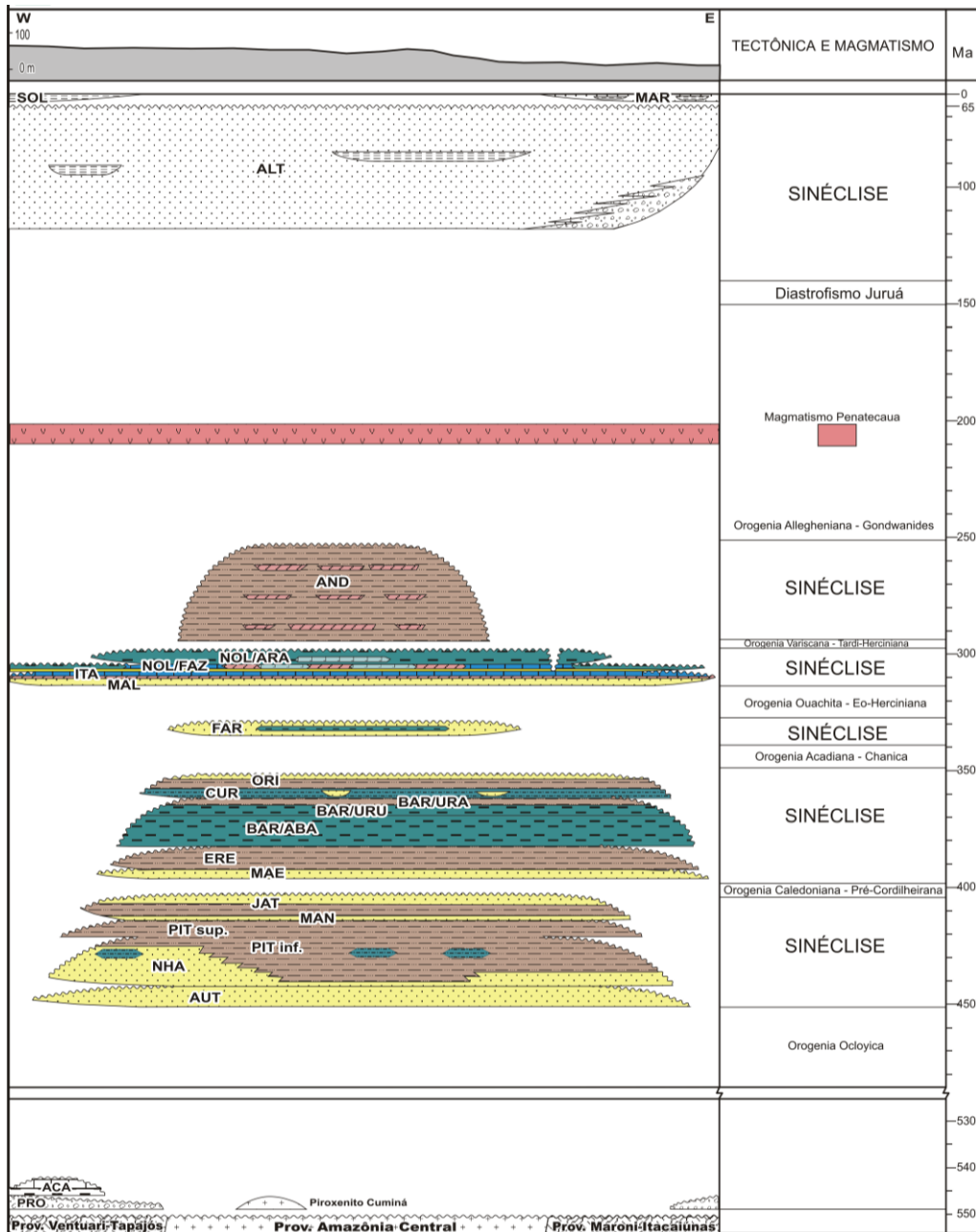
## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA**

A Bacia do Amazonas é uma grande sinéclise intracratônica que se desenvolveu na porção setentrional do continente Sul-Americano, possui uma área de 500.000 km<sup>2</sup> e se localiza no norte do Brasil abrangendo os estados do Amazonas e do Pará. O intervalo temporal de deposição de sequências sedimentares da bacia inicia no Ordoviciano e termina no Cenozóico (Figura 2) (Cunha et al. 2007). A evolução geológica da Bacia do Amazonas, descrita abaixo, está embasada principalmente nos conceitos expostos por Cunha et al. (2007), Cordani et al. (1984) e Caputo (1984).

Na década de 80, as bacias que se localizavam entre o Amazonas e o Pará eram conhecidas como Alto Amazonas, Baixo Amazonas e Médio Amazonas. A redefinição dessa divisão ocorreu com o avanço dos estudos geológicos nessa região

do país, e com isso, a bacia Alto Amazonas foi individualizada das outras duas por ter uma história evolutiva distinta, sendo denominada de Bacia Solimões, enquanto as bacias Baixo e Médio Amazonas passaram a se denominar Bacia do Amazonas (Cordani et al. 1984).



**Figura 2:** Carta cronoestratigráfica da Bacia do Amazonas, modificada de Cunha et al. (2007).

A bacia apresenta em seu depocentro em torno de 5.000m de espessura e tem seu eixo maior com direção E-W. No limite leste da bacia ocorre o Arco de Gurupá

separando-a da bacia tafrogênica do Marajó, e no limite oeste o Arco de Purus separando-a da Bacia do Solimões (Cunha et al. 2007).

O embasamento da Bacia do Amazonas foi discutido por Cordani et al. (1984, 2009), estabelecendo que sequências sedimentares da bacia se desenvolveram sobre rochas metassedimentares e metavulcânicas pertencentes a faixas móveis, Ventuari-Tapajós e Maroni-Itaicúnas e sobre rochas graníticas do núcleo cratônico denominado de Província Amazônia Central.

De acordo com Cunha et al. (2007) a Bacia do Amazonas pode ser dividida estratigraficamente em 4 sequências separadas por discordâncias, são elas: 1) Sequência Ordovício-Devoniana, reunindo sedimentos clásticos marinhos e truncada pela discordância decorrente da Orogenia Caledoniana; 2) Sequência Devon-Tournaisiana, que reúne sedimentos clásticos fluvio-deltaicos e em seu topo ocorre a discordância resultante da Orogenia Eo-Herciniana; 3) Sequência Neoviseana, que corresponde a sedimentos clásticos, carbonatos e evaporitos, esta sequência se encontra cortada pela discordância originada da Orogenia Gonduanide; 4) Sequência Pensilvaniano-Permiana, corresponde aos sedimentos clásticos fluvio-lacustres e teve sua sedimentação iniciada ao espaço criado com a Orogenia Andina.

Neste trabalho, será abordado em maior detalhe a Sequência Pensilvaniano-Permiana. Esta é constituída pelas formações Monte Alegre, Itaituba, Nova Olinda e Andirá que reunidas compõem o Grupo Tapajós (Caputo 1984).

O Grupo Tapajós é uma sequência sedimentar com 2,4km de espessura na porção central da bacia (Cunha et al. 1994).

### **2.2.1 Formação Monte Alegre**

A primeira denominação para a Formação Monte Alegre foi “Série Itaituba” cunhada por Hartt no ano de 1874, ao se referir aos arenitos, folhelhos e calcários de idade carbonífera. Somente no ano de 1957 que Freydank utilizou o termo Formação Monte Alegre ao se referir à mesma sequência sedimentar que Hartt. Desde então, o termo Formação Monte Alegre foi consagrado e generalizado (Costa 1983).

Descrita por Cunha et al. (2007), a Formação Monte Alegre é composta por conglomerados basais cobertos por arenitos de seleção média. Em subsuperfície

ocorrem arenitos de granulação fina a muito fina, bem selecionados; assim como intercalações de folhelhos e rochas carbonáticas, marcando o topo da unidade.

Segundo Caputo (1984), a Formação Monte Alegre tem sua deposição associada a um sistema flúvio-eólico, de acordo com características observadas em campo: estratificação cruzada de grande porte, distribuição bimodal da granulação dos grãos de areia e presença de areia fina a muito fina.

### **2.2.2 Formações Itaituba e Nova Olinda**

A denominação Itaituba foi primeiramente proposta no ano de 1874 por Hartt para definir a sequência de rochas calcárias de idade carbonífera observadas ao longo do Rio Tapajós e Cupari. Litologicamente, a Formação Itaituba compreende uma unidade heterogênea composta por calcário, dolomito, folhelhos, siltitos, arenitos e camadas de anidrita e rico conteúdo fossilífero (Caputo 1984).

De acordo com Caputo (1984), a Fm. Itaituba compreende um período de transgressão marinha que se iniciou durante a deposição das camadas superiores da Fm. Monte Alegre. A presença de anidrita nesta unidade representa um período de regressão marinha.

A Formação Itaituba apresenta um contato basal concordante com os arenitos da Formação Monte Alegre, e um contato igualmente concordante no topo com a Formação Nova Olinda (Caputo 1984).

A individualização das rochas que compõem as formações Itaituba e Nova Olinda não foram possíveis diante das similaridades composicionais, estruturais e texturais. Com isso, as duas foram agrupadas a porção inferior da unidade é composta por arenitos com intercalações de folhelhos, siltitos e calcários (Figueira 2012).

Mais tarde, o termo Nova Olinda foi cunhado por Kistler em 1954 para designar a sequência evaporítica que ocorre no topo da Formação Itaituba. Esta unidade é composta por camadas de halita e anidrita, com camadas delgadas de siltitos e arenitos finos. A Formação Nova Olinda ocorre em contato concordante na base e no topo com as formações Itaituba e Andirá, respectivamente (Caputo 1984).

### **2.2.3 Formação Andirá**

A Formação Andirá apresenta contato basal concordante com a Fm. Nova Olinda e o contato superior com discordância angular em baixos ângulos com as formações Alter de Chão e Almeirim (Caputo, 1984).

## **2.2 MAGMATISMO PENATECAUA**

O termo Penatecaua foi proposto por Issler em 1974 para designar o magmatismo toleítico que afetou a Bacia do Amazonas entre o Permiano e o Jurássico (Caputo 1984). Segundo Caputo (1984), o magmatismo compreende diabásios de assinaturas toleítica compostos por plagioclásio, piroxênio, ilmenita e magnetita. Estes litotipos se apresentam intrudidos nas rochas sedimentares da bacia na forma de diques e soleiras com espessuras variáveis.

De acordo com Costa (2012), a presença de altos estruturais na área seriam os principais controladores da intrusão destes diques e soleiras. Tectonicamente, estas intrusões ígneas são associadas a separação da África e América do Sul no início do Triássico, e se manifestaram nas bacias de Solimões, Acre, Amazonas e Parnaíba.

## **2.3 POROSIDADE E PERMEABILIDADE DOS ARENITOS DA FORMAÇÃO MONTE ALEGRE: TRABALHOS ANTERIORES**

Trabalhos anteriores realizados por Costa (1983) nos arenitos da Formação Monte Alegre tiveram como objetivo a caracterização faciológica de plugs de testemunhos com enfoque para a importância destes arenitos como rochas reservatórios, visando a obtenção da porosidade e permeabilidade destes plugs.

Para isto, a autora realizou análises petrofísicas para determinação da permeabilidade e porosidade com a utilização de porosímetros de Hélio e medidas de permeabilidade utilizando o permeabilímetro.

Os dados apresentados pela autora para cada uma das técnicas analíticas realizadas foram os seguintes: pela petrofísica obteve-se dois trends, o primeiro onde a porosidade varia de 8 a 17%, enquanto que a permeabilidade de 10 a 100 milidarcys; enquanto o segundo com porosidades em torno de 2 a 12% e permeabilidade menores que 0,3 milidarcys. E subordinadamente, um trend de menor proporção em que se observa alta porosidade e valores baixos de permeabilidade.

A presença destes dois trends principais de comportamento da porosidade e permeabilidade são interpretados pela autora como característicos de uma porosidade secundária. Ou seja, os arenitos com valores de porosidade e permeabilidade maiores apresentam a existência de uma porosidade secundária, e além disso, esta porosidade seria responsável por regenerar as porosidades primárias, consequentemente aumentando a comunicabilidade entre os poros. A ocorrência de trend com alta porosidade e baixa permeabilidade ocorre em arenitos com teores elevados de argilominerais na composição mineralógica.

Aliados a estes dados têm-se valores de porosidade e permeabilidade fornecidos pela ANP (2015) para a Formação Monte Alegre, com porosidade entre 20-25% e permeabilidade entre 150-380 milidarcys.

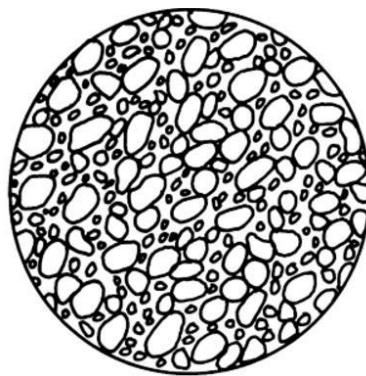
**Tabela 1:** Resumo dos dados de permeabilidade e porosidade obtidos em estudos anteriores nos arenitos da Formação Monte Alegre.

Costa (1983)				ANP (2015)	
Trend 1		Trend 2			
$\phi$	K (mD)	$\phi$	K (mD)	$\phi$	K (mD)
8-17%	10-100	2-12%	<0,3	20-25%	150-380

## 2.4 POROSIDADE E PERMEABILIDADE: REVISÃO CONCEITUAL

A porosidade é uma propriedade física utilizada para medir a quantidade de espaços vazios (poros) de um material (Berryman e Wang 2000 apud Medeiros 2015) (Figura 3). Em termos matemáticos, a porosidade mede a relação entre o volume de poros e o volume total de um corpo sólido seguindo a equação 1. A porosidade é uma propriedade adimensional e pode ser apresentada na forma de porcentagem ou na forma decimal.

$$\phi_t = \frac{\text{volume de poros}}{\text{volume total}} \text{ (equação 1)}$$



**Figura 3:** Corte transversal de um meio poroso (Medeiros 2015).

A porosidade de uma rocha se dá devido a sua capacidade de conter e armazenar fluidos nos espaços vazios, os quais podem ser interconectados ou não. De acordo com a interconexão entre os poros, a porosidade pode ser absoluta (ou total) ou efetiva (Khan e Islam 2007 apud Medeiros 2015). Sendo assim, a porosidade efetiva ( $\phi_e$ ) compreende a razão entre o volume de poros que apresentam interconexão e o volume total do material, sendo expressa de acordo com a equação a seguir.

$$\phi_e = \frac{\text{volume de poros interconectados}}{\text{volume total}} \quad (\text{equação 2})$$

Além disso, a morfologia e estrutura dos poros podem ser classificadas, Allen (1997) estabeleceu uma classificação quanto aos tamanhos dos poros (Tabela 1).

**Tabela 2:** Relação entre os tipos e tamanho de poros (modificado de Medeiros 2015).

Tipos de poros	Tamanho dos poros
Macroporos	>50nm
Mesoporos	2-50nm
Microporos	0,6-2nm
Ultramicroporos	<0,6nm

Para caracterização de porosidade em rochas sedimentares, principalmente rochas reservatórios, deve-se levar em consideração determinadas variáveis que controlam a porosidade, são elas: cimentação, granulometria, arranjo e forma das

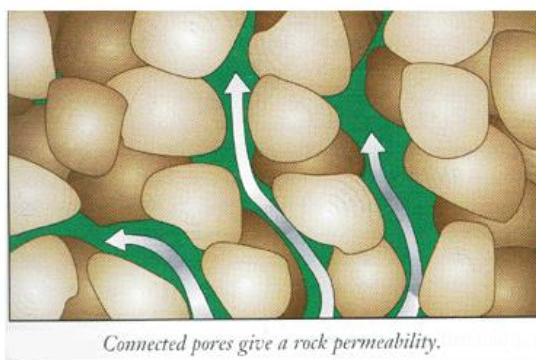
partículas. Outros aspectos como esfericidade e grau de empacotamento também afetam a porosidade (Rosa et al. 2006 e Silva 2014).

Além disso, a porosidade no estudo rochas reservatórios pode ser dividida em: porosidade primária que compreende aquela porosidade gerada no momento da sedimentação da rocha; e porosidade secundária que tem sua geração posterior a sedimentação devido a diagênese e tectônica (Silva 2014). Com isso, é possível subdividir cada uma destas porosidades, como observado na Tabela 2.

**Tabela 3:** Classificação quanto ao tipo de porosidade, modificada de Palombo (2017).

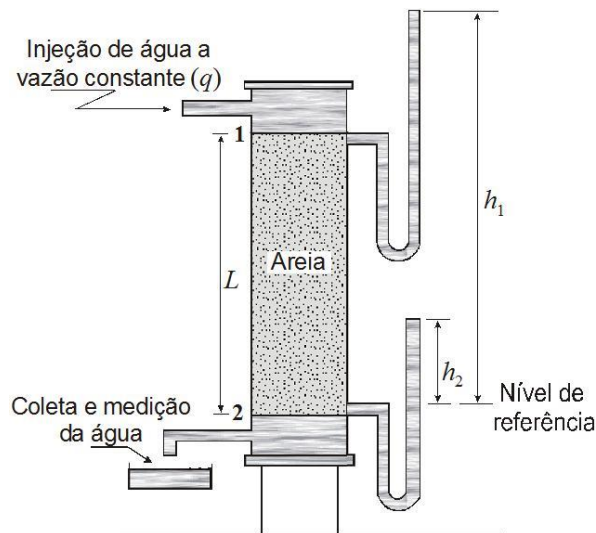
<b>Período de formação</b>	<b>Tipo</b>	<b>Origem</b>
Deposicional (ou primária)	Intergranular	Sedimentação
	Intercristalina	Cimentação
Pós-deposicional (ou secundária)	Vesicular	Dissolução
	Móldica	Dissolução
	De fratura	Movimentação tectônica, compactação ou desidratação

A permeabilidade é uma propriedade da rocha ou meio poroso que indica a capacidade deste meio permitir o escoamento de fluidos (Rosa et al. 2006). É uma propriedade intimamente dependente da porosidade efetiva, do tamanho dos poros e do arranjo geral do material (Figura 4).



**Figura 4:** Imagem esquemática da conectividade entre os poros em uma rocha permeável (Medeiros 2015).

De acordo com Rosa et al. (2006) a equação de Darcy é a mais utilizada para quantificar a permeabilidade em meios porosos homogêneos. A equação de Darcy foi formulada em 1856 pelo engenheiro francês Henry Darcy, que visava a purificação de águas através um sistema de escoamento utilizando leitos de areia (Figura 5).



**Figura 5:** Imagem esquemática do experimento realizado por Henry Darcy que consistia no cálculo do fluxo de água através de um filtro de areia (Retirado de Rosa et al. 2006).

A equação de Darcy revelou a proporcionalidade entre a vazão através de um meio poroso homogêneo, a área de fluxo de fluido e o gradiente de pressão. Já o comprimento do fluido e a viscosidade são inversamente proporcionais a esta vazão (Rosa et al. 2006). Matematicamente, observa-se essas proporções na equação 3.

$$q = k \frac{Ax\Delta P}{\mu xL} \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

q – Vazão do fluido através do meio poroso;

k – Permeabilidade absoluta (constante de permeabilidade);

A – Área transversal acessível ao fluxo;

$\Delta P$  – Perda de carga;

$\mu$  – Viscosidade do fluido;

L – Comprimento do leito poroso.

Na caracterização de reservatórios, a permeabilidade pode ser classificada como absoluta e efetiva. A permeabilidade absoluta ocorre quando a rocha está saturada em um único fluido, enquanto a permeabilidade efetiva ocorre quando a rocha está saturada por dois ou mais fluidos. No segundo caso, observa-se a interação e movimentação entre os diferentes fluidos através dos poros, o que faz com que as somas das permeabilidades efetivas de cada fase sejam menores do que a permeabilidade absoluta (Silva 2014).

A relação entre a permeabilidade absoluta e a efetiva de cada fase é denominada de permeabilidade relativa e é expressa matematicamente de acordo com a equação 4 (Silva 2014).

$$\text{Permeabilidade relativa (fase A)} = \frac{\text{Permeabilidade efetiva (fase A)}}{\text{Permeabilidade absoluta}} \quad (\text{equação 4})$$

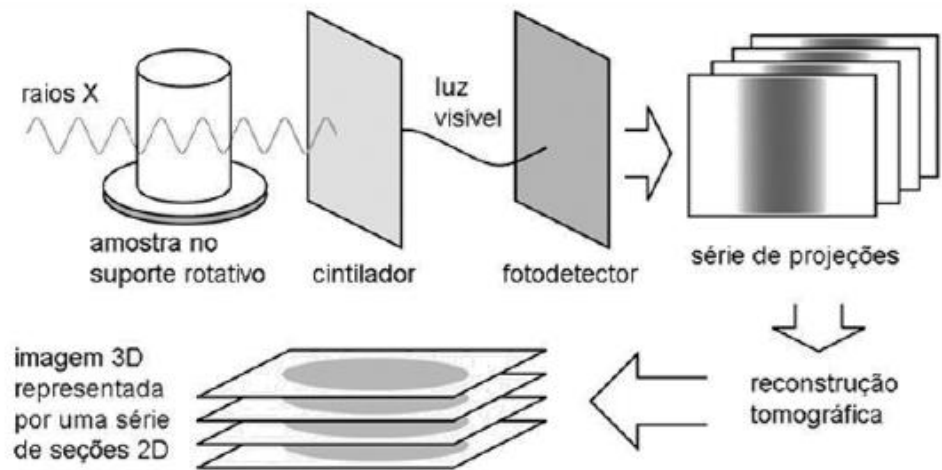
Existem determinados fatores que afetam a permeabilidade de rochas sedimentares e o conhecimento destes é de importância para o estudo de rochas reservatórios. O arranjo, forma e tamanho dos grãos tem influência nos valores de permeabilidade; a presença de minerais lamelares, como filossilicatos, diminuem a permeabilidade vertical; a cimentação reduz o espaço poroso, e como consequência interfere nos valores de permeabilidade; e o fraturamento e a percolação de fluidos atuam aumentando os valores de permeabilidade (Silva 2014).

## **2.5 MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

A microtomografia computadorizada de raios X, também conhecida por tomografia computadorizada de raios X, é uma técnica não-destrutiva, de alta resolução que permite a visualização tridimensional de amostras, além da quantificação de área e volume (Reis Neto et al. 2011).

As imagens tridimensionais geradas pelo tomógrafo são produzidas a partir de uma série de projeções bidimensionais, utilizando imagens geradas por raios X (Figura 6). As radiografias do objeto de estudo são registradas em diferentes ângulos de rotação e, (totalizando 360°) com a utilização de processamento de imagens, são geradas as representações 3D do objeto. A figura 6 apresenta as etapas para a aquisição das imagens tridimensionais no tomógrafo. Primeiramente, a amostra é posicionada entre o detector e os feixes de raios X para que seja rotacionada

possibilitando a aquisição das imagens 2D. As capturas de imagens são realizadas a cada fração de ângulo rotacionado (Palombo 2017).



**Figura 6:** Esquema de etapas para aquisição de imagens tridimensionais no tomógrafo de raios X (Palombo, 2017).

Em termos técnicos, tomografia computadorizada tem como princípio básico a análise da equação de atenuação dos raios X. Esta equação estabelece a proporcionalidade entre a intensidade da radiação medida por um detector e o número de fótons presentes no feixe de radiação (Lopes et al. 2012).

Sabe-se que a intensidade de um feixe diminui ao atravessar a matéria, e é seguindo este padrão que o cálculo da atenuação é efetuado nas análises tomográficas. A redução da intensidade de materiais antes de chegar ao detector é medida através da equação 5 (Reis Neto et al. 2011).

$$I = I^0 e^{-\mu \cdot x} \quad (\text{equação 5})$$

Sendo,

$I$  = intensidade medida sem o elemento atenuador;

$I^0$  = intensidade medida com o elemento atenuador;

$\mu$  = coeficiente de atenuação linear;

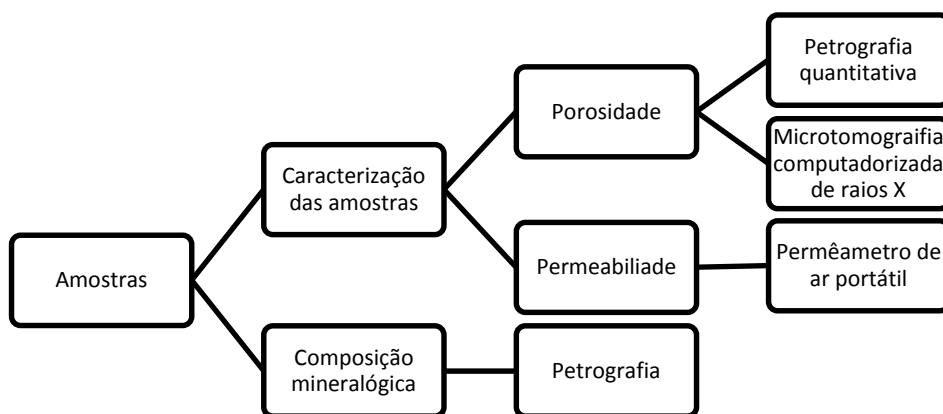
$x$  = espessura do objeto atenuador.

Diferentes materiais apresentam diferentes intensidades de atenuação, que dependem dos diferentes coeficientes de atenuação linear das fases distintas que estão sendo analisadas. O número atômico efetivo e a densidade da amostra a ser analisada, são os principais parâmetros determinativos do grau de absorção dos raios X (Reis Neto et al. 2011). Com isso, as imagens geradas são representadas de acordo com a escala de cinza associada àquele objeto de estudo (Palombo 2017).

A microtomografia quando aplicada a caracterização de reservatórios, apresenta resultados interessante. De acordo com Palombo (2017), os ensaios mais recentes de reservatórios utilizam o tomógrafo para identificar poros e fraturas nos materiais rochosos, e essa identificação é facilitada pois os coeficientes de atenuação em vazios apresentam escala de cinza diferentes do resto material rochoso.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, serão analisadas amostras da Formação Monte Alegre, obtidas na litoteca do Projeto Caracterização Tectono-Estrutural da Bacia do Amazonas (CATEA). As 5 amostras selecionadas foram submetidas a análise de microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT), análise de permeabilidade com uso de permeâmetro portátil de mão (injeção de ar) e descrição macroscópica e petrográfica em microscópio óptico (Figura 7). Todas as amostras, suas respectivas lâminas e pastilhas foram obtidas na litoteca do Projeto CATEA. Destas amostras, 2 delas são da região de Monte Alegre e 3 da região do médio Tapajós.



**Figura 7:** Fluxograma dos métodos e técnicas aplicadas.

A metodologia do projeto consiste em duas etapas: revisão bibliográfica e técnicas analíticas seguidas de interpretação dos dados obtidos.

O desenvolvimento da pesquisa e as análises de microtomografia de raios X foram realizadas com os equipamentos do Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR). As análises petrográficas em microscópio óptico foram realizadas no Laboratório de Pesquisa em Microscopia (LAPEM), e a contagem de pontos em lâminas petrográficas para determinação da porosidade foram realizadas no LAMIR. Para as análises de permeabilidade utilizou-se o permeâmetro portátil de ar cedido pela Profa. Dra. Liliane Janikian da UNIFESP.

Os métodos de aquisição de dados de cada uma das técnicas apresentadas acima, serão discutidos a seguir.

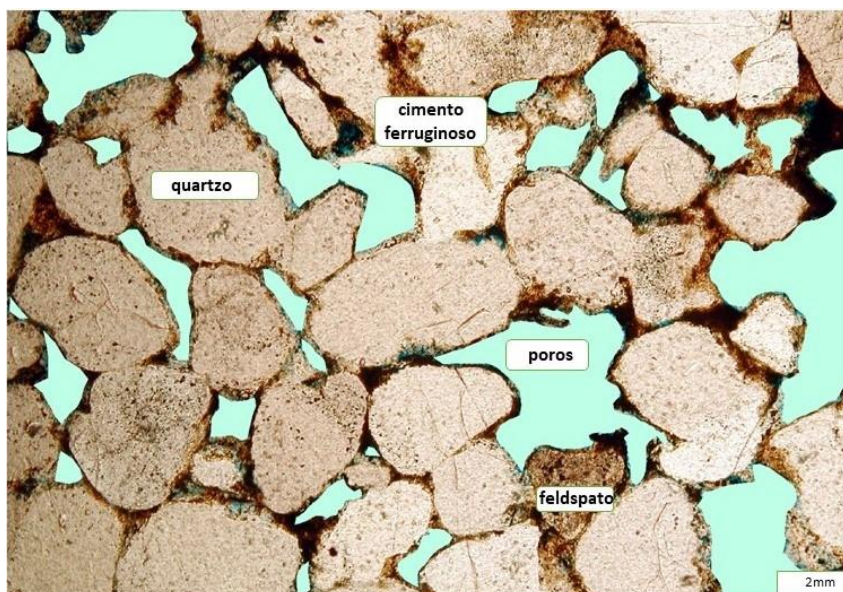
### **3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA**

No desenvolvimento da pesquisa foram consultados trabalhos sobre caracterização de porosidade e permeabilidade de outras formações e específicos na Formação Monte Alegre, destaca-se Costa (1983) e dados da Agencia Nacional de Petróleo (ANP). Para abordar aspectos de evolução, sedimentação e estratigrafia da Bacia do Amazonas foram consultados Caputo (1984), Cunha et al. (1994), Figueira (2008) e Cordani et al. (1984, 2009). Referências sobre aspectos conceituais de permeabilidade e porosidade podem ser encontradas nos trabalhos de Rosa et al. (2006), Berry e Wang (2000) e Silva (2014) utilização das técnicas analíticas de microtomografia computadorizada, foram consultados Reis Neto et al (2011), Lopes et al. (2012) e Vergés et al. (2011) e Palombo (2017).

### **3.2 PETROGRAFIA QUANTITATIVA**

Foram quantificadas 5 lâminas delgadas, preparadas de amostras extraídas de 5 afloramentos selecionados, através de impregnação com resina epoxi azul para facilitar a visualização dos poros. As lâminas foram analisadas com o uso de microscópios petrográficos de luz transmitida fornecidos pelo Laboratório Didático de Microscopia (LAPEM) do Departamento de Geologia da UFPR (DEGEOL). A quantificação inclui a caracterização mineralógica, textural, diagenética, tipos de poros e classificação da rocha.

A contagem modal foi realizada utilizando fotomicrografias de cada uma das lâminas petrográficas. As fotomicrografias foram tratadas no Arcgis, seguindo os seguintes passos: 1- Cálculo da área total da fotomicrografia; 2- Cálculo da área de cada poro observado nesta fotomicrografia; 3- Somatório das áreas de poros; 4- Cálculo de porcentagem simples para obter o valor (em porcentagem) de porosidade para aquela seção delgada (Figura 8).



**Figura 8:** Área definida para determinação de porosidade em fotomicrografias de seções delgadas.

Foram utilizadas as ferramentas Editor para desenhar os polígonos de cada poro, e a ferramenta “Calculate Geometry” para obtenção da área de cada um destes poros.

### 3.3 MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X

A técnica de microtomografia computadorizada foi aplicada em 3 amostras da área Tapajós, as análises foram realizadas no Laboratório de Rochas e Minerais (LAMIR-DEGEOL). O cálculo da porosidade foi realizado através de imagens tridimensionais geradas a partir da técnica de microtomografia computadorizada de raios-X, para tal, foram realizadas as seguintes etapas:

- a) preparação de pequenos tabletes com cerca de 20mm de altura das 3 amostras analisadas, todas elas pertencentes a região do Médio Tapajós.;
- b) aquisição das imagens utilizando o software *Skyscan 1172*;

- c) reconstrução dessas imagens de raios-X através do software *NRecon*;
- d) tratamento de dados com cálculo do volume total e de poros utilizando o software *CTAnalyser*. Os parâmetros utilizados durante a análises estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 4:** Relação dos parâmetros utilizados na obtenção das imagens tridimensionais no tomógrafo.

Parâmetros	Valores
Voltagem	89kV
Potência	7W
Tempo de coleta	35min/cada
Filtro	Al 0,5mm
Tamanho do pixel	5 $\mu$ m

### 3.4 PERMEÂMETRO DE AR PORTÁTIL

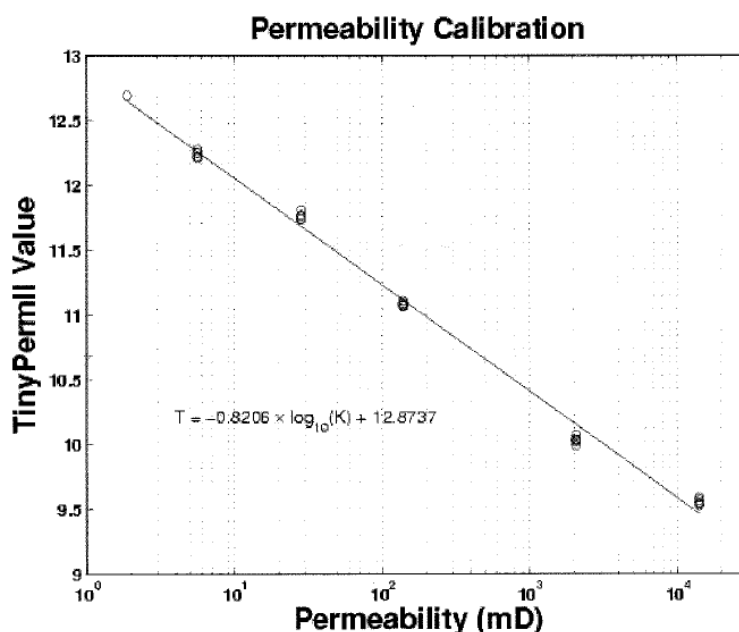
Para a análise de permeabilidade foi utilizado o equipamento *TinyPerm II*, um permeâmetro de ar portátil utilizado na medição de permeabilidade da matriz de rochas ou em aberturas de fraturas efetivas nos afloramentos (Figura 9). O equipamento utiliza os princípios da Lei de Darcy (Equação 3), no qual, existe a proporcionalidade entre o fluxo de fluido no meio poroso e a diferença de pressão por unidade de medida (Rosa et al. 2006).



**Figura 9:** Equipamento *Tiny Perm II* fabricado pela empresa New England Research. 1) Bico de borracha que é posicionado na superfície a ser analisada; 2) Seringa; 3) Microcontrolador com display para monitorar o volume de ar na seringa e o pulso de vácuo transitório na superfície da amostra (Retirado de *New England Research*).

De acordo com o fabricante *New England Research (manual do fabricante)*, o permeâmetro de ar portátil é projetado para ser usado no campo ou em laboratório como equipamento de permeabilidade em rochas e meios porosos. Para medir a matriz da rocha, a faixa de medição de permeabilidade varia de aproximadamente 10 milidarcys a 10 darcys. O equipamento funciona da seguinte maneira: operador pressiona um bico de borracha contra a amostra e retira o ar dela. À medida que o ar é retirado da amostra, uma unidade de microcontrolador monitora simultaneamente o volume da seringa e o pulso de vácuo transitório criado na superfície da amostra. A função de resposta do sistema de amostra/instrumento é calculada e as principais características da resposta são exibidas na tela do equipamento.

Os valores obtidos através do *TinyPerm II* precisam ser corrigidos para a obtenção do valor de permeabilidade. Esta correção é efetuada com a utilização do gráfico da equação de reta ilustrado na Figura 10, sendo o eixo das ordenadas os valores medidos direto no equipamento e o eixo das abscissas os valores de permeabilidade em milidarcy, ou de equações de reta obtidas a partir de padrões definidos por outros métodos (*New England Research*)



**Figura 10:** Gráfico em escala logarítmica para calibração dos valores de permeabilidade obtidos através do equipamento *Tiny Perm II* (*New England Research*, manual do fabricante).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 PETROGRAFIA

#### 4.1.1 Área de Monte Alegre

Os arenitos da área de Monte Alegre apresentam-se silicificados, com cor castanha amarelada, com granulação fina a média, com grãos arredondados a sub-arredondados e grau de seleção moderado a alto. Ao microscópio observou-se como principais componentes: quartzo, feldspato, minerais micáceos, além do cimento (Figuras 11 e 12). As fichas de descrições completas podem ser encontradas no Apêndice 1.

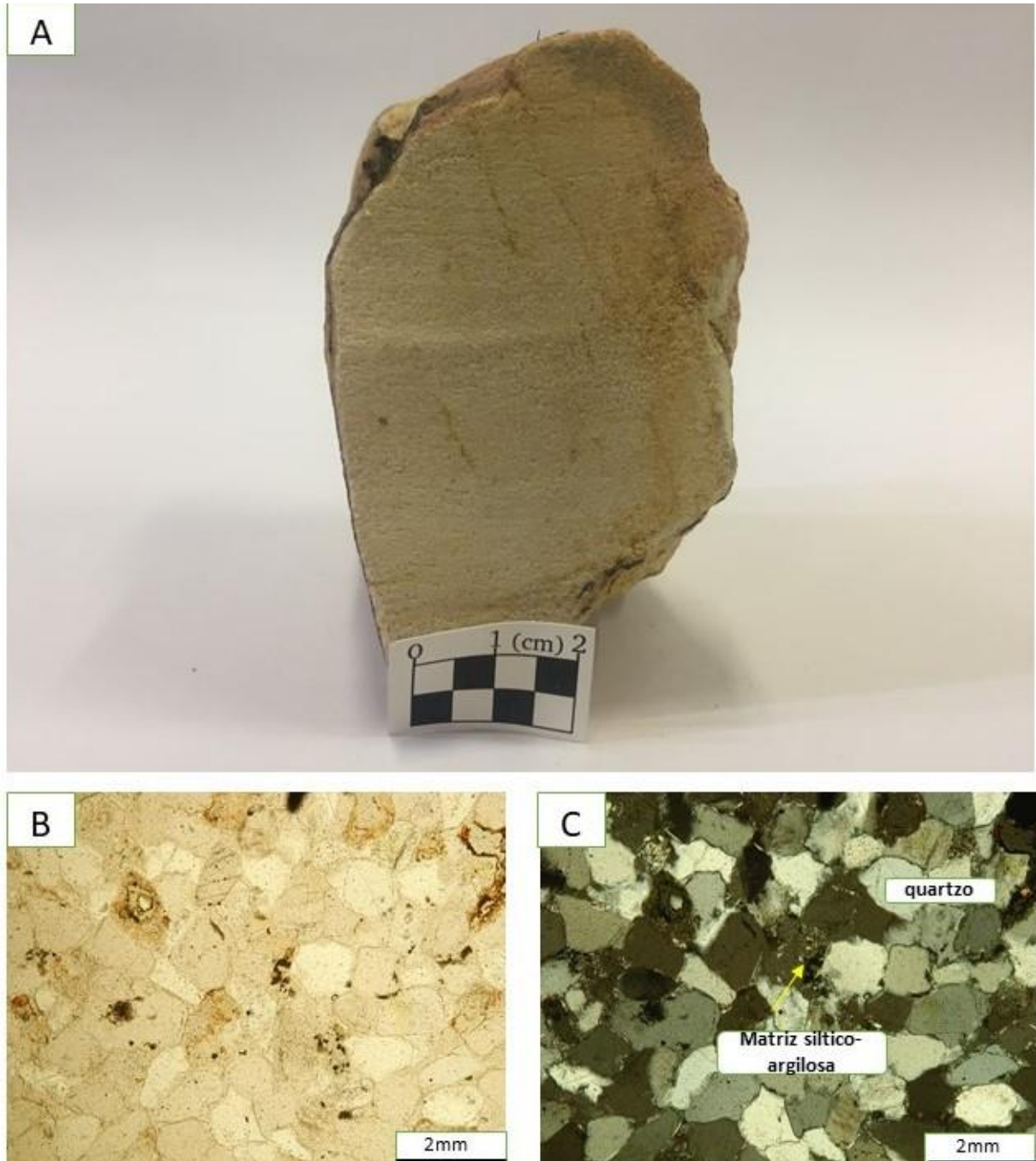
O quartzo, é o componente detrítico predominante nestes arenitos, se apresentam com indícios de corrosão, alguns grãos de quartzo estão internamente fraturados, com presença de extinção ondulante incipiente e formação de sub-grãos. Os grãos de quartzo são bem selecionados, com grau de esfericidade alto. Foram observados a ocorrência de duas variedades: o quartzo monocristalino e o quartzo policristalino.

O feldspato é um componente detrítico relativamente escasso nas amostras, parcialmente intemperizados e alterados para argilominerais. É possível observar a presença de geminação tartan incipiente em alguns cristais, indicando se tratar de microclínio. Os minerais micáceos presentes nas amostras são biotita e muscovita, são componentes relativamente escassos e ocorrem com granulação fina a muito fina. Se apresentam são, sendo possível identificar a clivagem perfeita em uma direção.

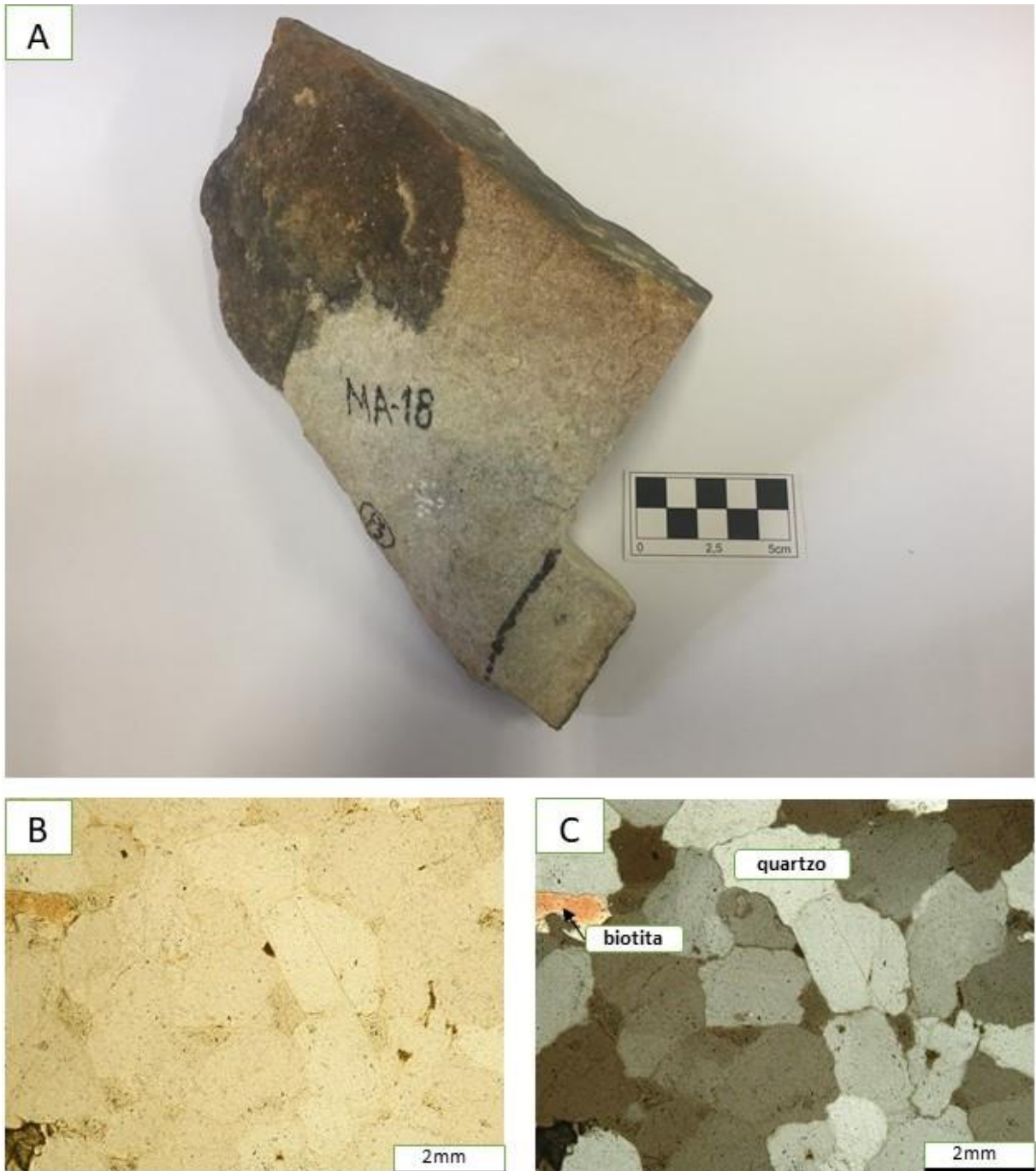
O cimento é constituído por argilominerais e sílica como película ao redor dos grãos (*coating*) e, por vezes, preenchendo espaços vazios. Enquanto o cimento silicoso se apresenta pelo crescimento de quartzo nos contatos dos grãos, os contatos em que se observa precipitação de quartzo apresentam-se turvos. Observa-se também uma alteração ferruginosa gerando óxido e hidróxido de ferro, de cor castanho avermelhado, que ocorre nos contatos dos grãos em porções localizadas das lâminas.

Nestes arenitos observa-se um empacotamento intensamente fechado, com contatos planares a côncavo-convexos. Por fim, as amostras em questão apresentam

uma maturidade mineralógica elevada, sendo considerados arenitos maduros a supermaduros (de acordo com a proporção de quartzo na amostra) e são classificados como quartzo-arenitos, segundo a classificação de Folk (1980).



**Figura 11:** A) Quartzo arenito de cor branca acastanhada, com granulação fina a média e grãos arredondados a sub-arredondados, amostra MA-15; B) Fotomicrografia da amostra MA-15 em nicóis paralelos. Notar contatos planos a concavo-convexo entre os cristais e poucas alterações ferruginosas na matriz; C) Fotomicrografia da amostra MA-15 em nicóis cruzados. Notar presença de grãos de quartzo, matriz siltico argilosa e cimentação incipiente.



**Figura 12:** A) Quartzo arenito de cor branca com superfície de alteração de cor cinza escuro, macroscopicamente tem-se granulação fina a média e grãos arredondados a sub-arredondados, amostra MA-18; B) Fotomicrografia da amostra MA-18 em nicóis paralelo. Notar contatos predominantemente planos entre os cristais, e empacotamento fechado; C) Fotomicrografia da amostra MA-18 em nicóis cruzados. Notar presença de grãos de biotita e ausência de matriz na amostra.

#### 4.1.2 Área do Médio Tapajós

Os arenitos da área do Médio Tapajós apresentam granulação fina a muito fina, de cor castanho avermelhado, com grãos arredondados a sub-arredondados, bem

selecionados. Em algumas amostras de mão, observa-se a presença de planos de estratificação paralela. As fichas de descrições completas podem ser encontradas no Apêndice 1. Ao microscópio os principais componentes são: quartzo, feldspato, minerais micáceos, zircão como mineral acessório, clorita secundária, além de matriz e cimento (Figuras 13, 14 e 15).

O quartzo é mineral detrítico mais abundante nas amostras, perfazendo cerca de 90% do arcabouço dos arenitos. Ocorrem como grãos arredondados a sub-arredondados e bem selecionados, na variedade monocristalina, e por vezes, policristalinas. Observou-se a presença de extinção ondulante e formação de sub-grãos. Em alguns grãos de quartzo, observou-se bordas de corrosão com contatos serrilhados que podem ter sido geradas por dissolução tardia.

A quantidade de feldspatos nestes arenitos é baixa. Ocorrem variedades do feldspato alcalino (microclinio e ortoclásio), assim como plagioclásios. Ambos se apresentam sericitizados e com indícios de alteração para argilominerais.

Os minerais micáceos ocorrem em quantidades relativamente baixas. São observados principalmente biotita, de granulação fina a muito fina, com clivagens preservadas. Esta biotita apresenta-se parcialmente intemperizada para clorita.

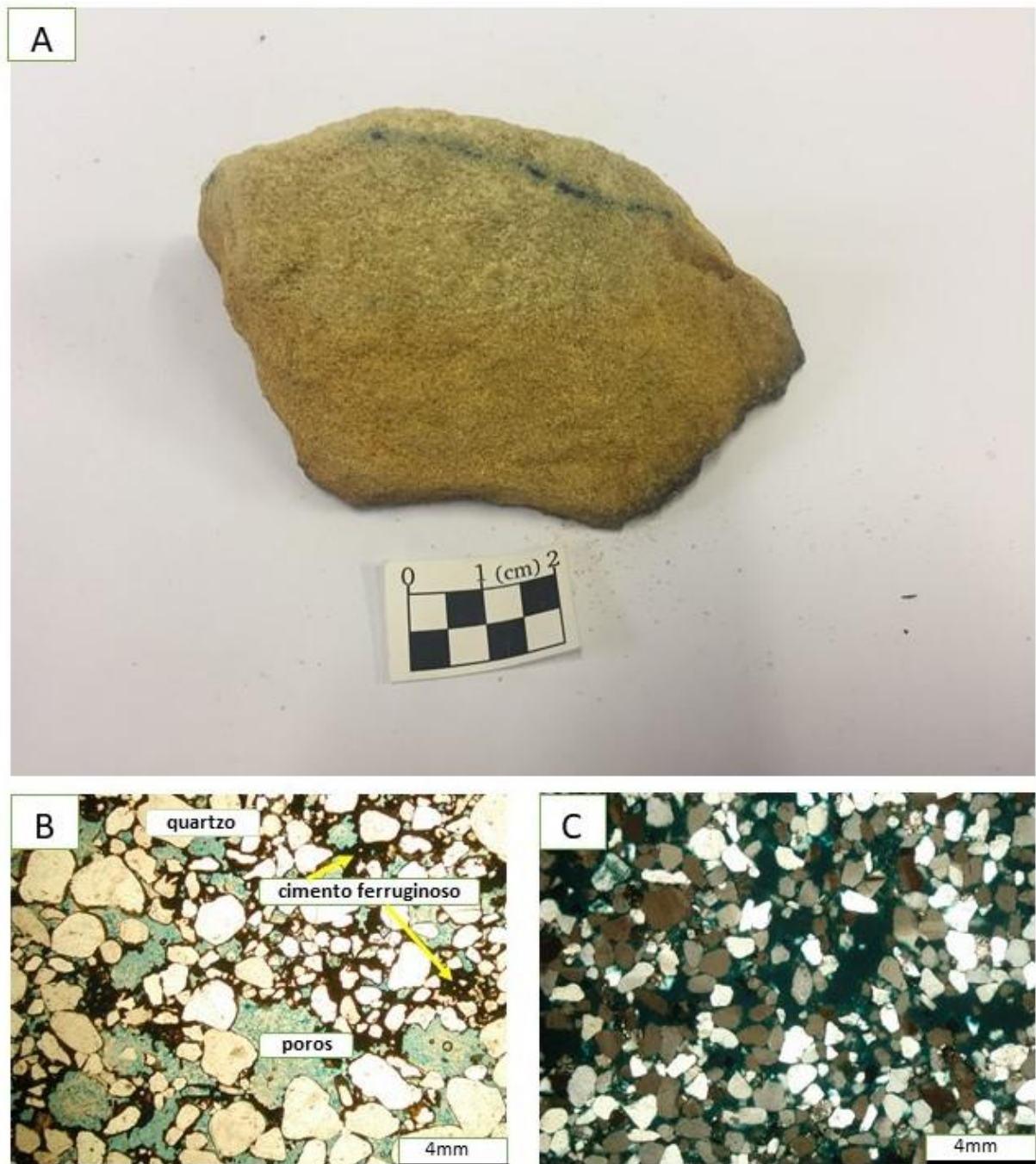
O zircão ocorre como minerais detríticos acessórios nestes arenitos com granulação fina, em grãos sub-arredondados e relevo alto.

Os arenitos da região do Médio Tapajós, apresentam pequena quantidade de matriz de composição siltico-argilosa, que ocorre como uma fina película ao redor dos cristais e também preenchendo espaços vazios.

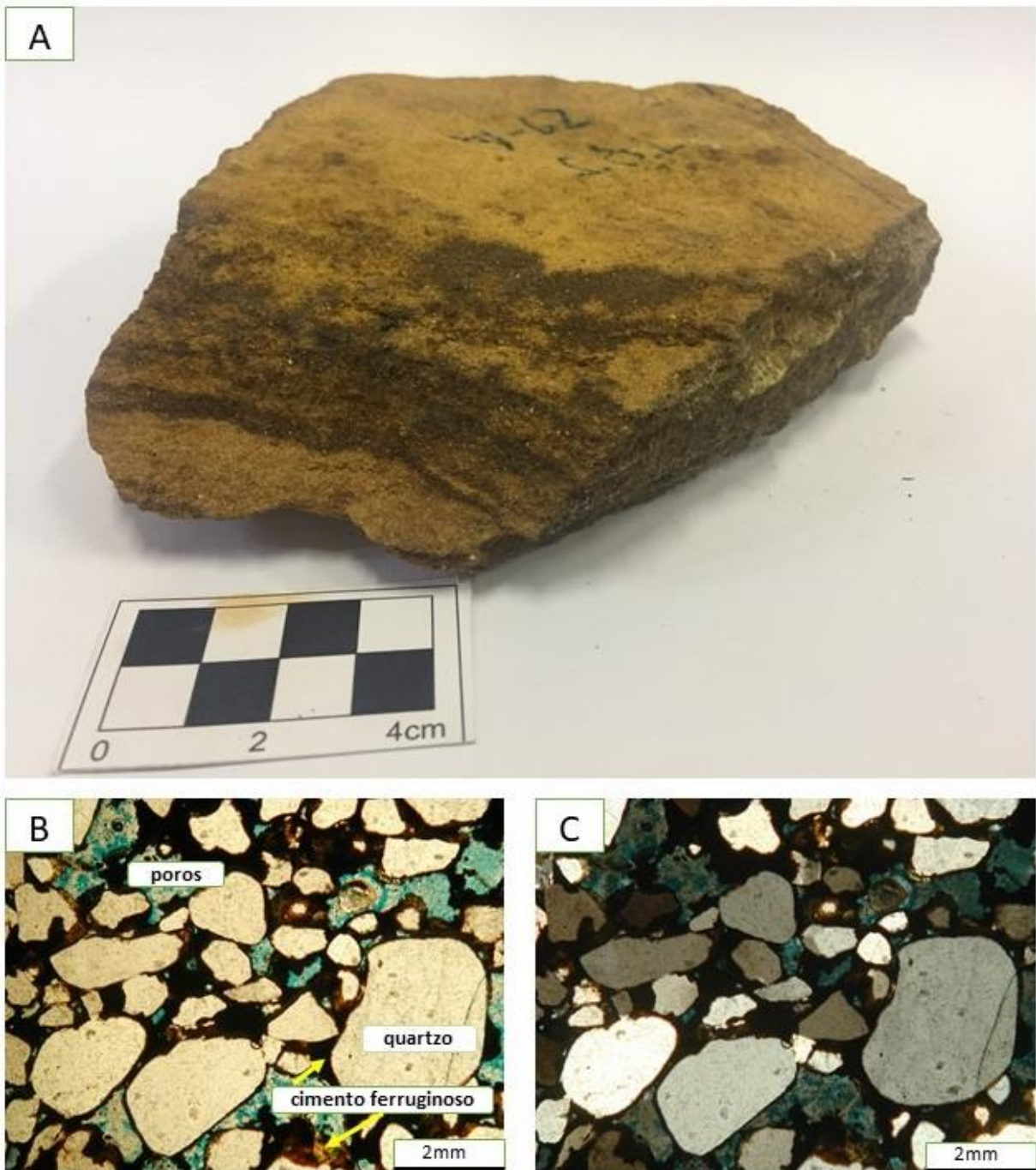
O cimento é constituído por material ferruginoso (óxido/hidróxido de ferro) e se apresenta na cor castanho avermelhada. Este material ocorre em quantidades razoáveis nas amostras, envolvendo os constituintes mineralógicos do arcabouço e no preenchimento de poros. Localmente observa-se a precipitação de argilominerais formando películas ao redor dos grãos (*coating*) e crescimento secundário de quartzo nos contatos.

O empacotamento dos arenitos da região do Médio Tapajós é aberto, com contatos entre os grãos sendo pontuais a “flutuantes”. Por fim, estes arenitos podem

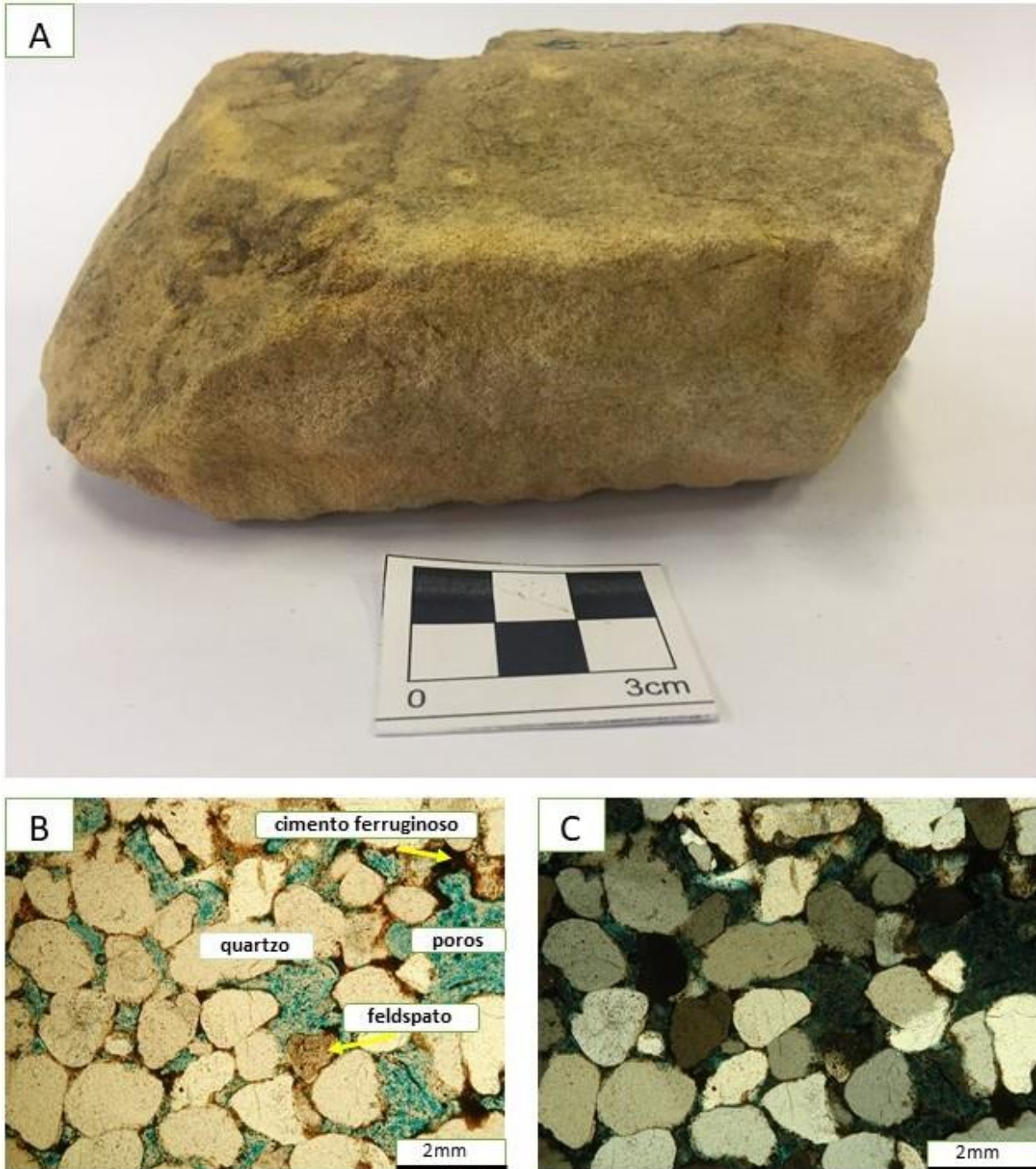
ser classificados como maduros quanto a maturidade mineralógica e de acordo com Folk (1980) são classificados como quartzarenitos (Figura 16).



**Figura 13:** A) Quartzo arenito de cor amarelo acastanhado levemente intemperizada, macroscopicamente apresenta-se com granulação fina e grãos arredondados a sub-arredondados, amostra TPJ-28A; B) Fotomicrografia da amostra TPJ-28A em nicóis paralelos. Notar contatos planos e pontuais entre os cristais, os grãos são pouco selecionados variando de granulação fina a grossa e o empacotamento é aberto com boa quantidade de poros e cimento ferruginoso; C) Fotomicrografia da amostra TPJ-28A em nicóis cruzados.



**Figura 14:** A) Quartzo arenito de cor amarelo acastanhado levemente intemperizada, macroscopicamente têm-se com granulação média e grãos arredondados a sub-arredondados, amostra TPJ-29A; B) Fotomicrografia da amostra TPJ-29A em nicóis paralelos. Notar contatos planos e pontuais entre os cristais, os grãos são pouco selecionados variando de granulação média a grossa e o empacotamento é aberto com boa quantidade de poros e cimento ferruginoso; C) Fotomicrografia da amostra TPJ-29A em nicóis cruzados.



**Figura 15:** A) Quartzo arenito de cor amarelo acastanhado levemente intemperizada, com granulação fina a média e grãos sub-arredondados, amostra TPJ-29B; B) Fotomicrografia da amostra TPJ-29B em nicóis paralelos. Notar contatos planos e pontuais entre os cristais, os grãos são pouco selecionados variando de granulação fina a média e o empacotamento é aberto com boa quantidade de poros e cimento ferruginoso; C) Fotomicrografia da amostra TPJ-29B em nicóis cruzados.

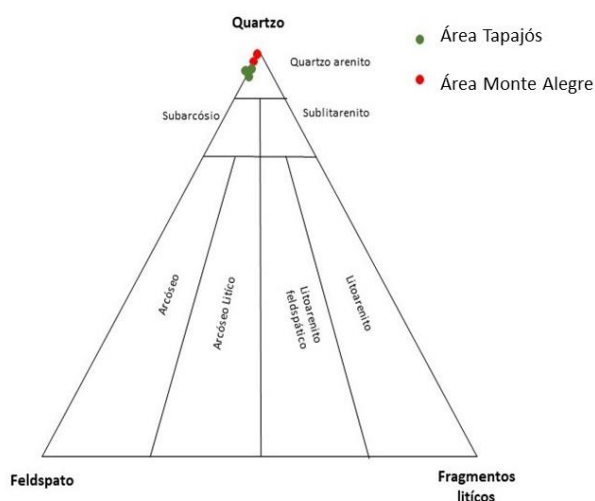


Figura 16: Classificação para arenitos de Folk (1980). Os pontos vermelhos indicam as amostras da área de Monte Alegre e os pontos verdes as amostras do Médio Tapajós, ambos os conjuntos são classificados como quartzarenitos.

#### 4.2 ANÁLISE DE POROSIDADE EM LÂMINA PETROGRÁFICA

As medidas de porosidade obtidas através da quantificação de área em fotomicrografias são apresentadas na Tabela 5. Os arenitos da área de Monte Alegre apresentam porosidades relativas entre 2-3%, enquanto os arenitos da área Tapajós apresentam porosidades relativas maiores, variando de 14-17%.

Foram observados 3 tipos principais de porosidades nas amostras, são elas: intergranular, móldica e intercrystalina. A porosidade intergranular é uma porosidade primária e é pouco observada nos arenitos estudados. A porosidade móldica e intercrystalina são porosidades secundárias e frequentes, principalmente nos arenitos da área Tapajós. A porosidade móldica consiste em grandes poros gerados por dissolução total de grãos do arcabouço, enquanto a porosidade intercrystalina está associada a precipitação de argilominerais.

**Tabela 5:** Valores de porosidade obtidos através da quantificação de área em lâmina petrográfica.

Área	Amostra	Porosidade (%)
Monte Alegre	MA-15	3
	MA-18	2,48
Tapajós	TPJ-28B	16,92
	TPJ-29A	14,96
	TPJ-29B	11,09

### 4.3 ANÁLISE DE POROSIDADE EM IMAGENS TRIDIMENSIONAIS

Os resultados da caracterização tridimensional por microtomografia de raios X são apresentados nas Figuras 17 a 18, e ao final deste tópico observa-se a tabela (Tabela 6) com volume total e volume de poros calculados para cada uma das amostras. As três amostras de arenitos analisadas no micro-CT pertencem a região de Tapajós. Nas imagens tridimensionais é possível diferenciar o cimento, os constituintes mineralógicos, além de poros e minerais opacos. Devido a erros e problemas analíticos, serão apresentados os valores de porosidades somente das amostras TPJ-29A e TPJ-29B.

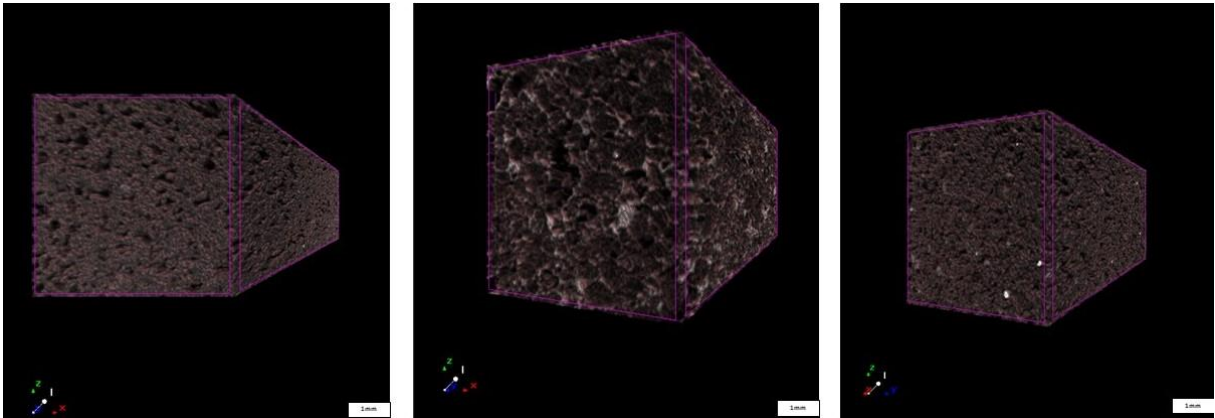
Os minerais opacos possuem maior atenuação para os feixes raios X e aparecem nas imagens na cor branca, enquanto que os cristais de quartzo e os cimentos aparecem com tons de cinza. A diferenciação destes dois elementos é realizada analisando o formato dos grãos de quartzo e as tonalidades da escala de cinza em que eles se apresentam. Na Figura 15, observa-se que o quartzo ocorre em tons de cinza mais escuros enquanto a cimentação apresenta variações. Cimentos silicosos apresentam tons de cinza médio a escuros, cimentos ferruginosos e argilosos apresentam tons de claros, cinza claro a branco. Os minerais pesados e opacos são identificados pelo alto grau de luminescência.

As figuras 17A e 18 representam a amostra TPJ-28A que consiste em um arenito homogêneo de cor amarelo acastanhado, com grãos pouco selecionados e arredondados a sub-arredondados. A Figura 15A representa o cubo tridimensional destes arenitos, observa-se a presença de poros grandes e alargados, caracterizando a porosidade móldica. A cimentação é predominantemente silicosa evidenciada pelos tons de cinza médios, porém em determinadas áreas, principalmente envolvendo grãos e poros tem-se um cimento ferruginoso.

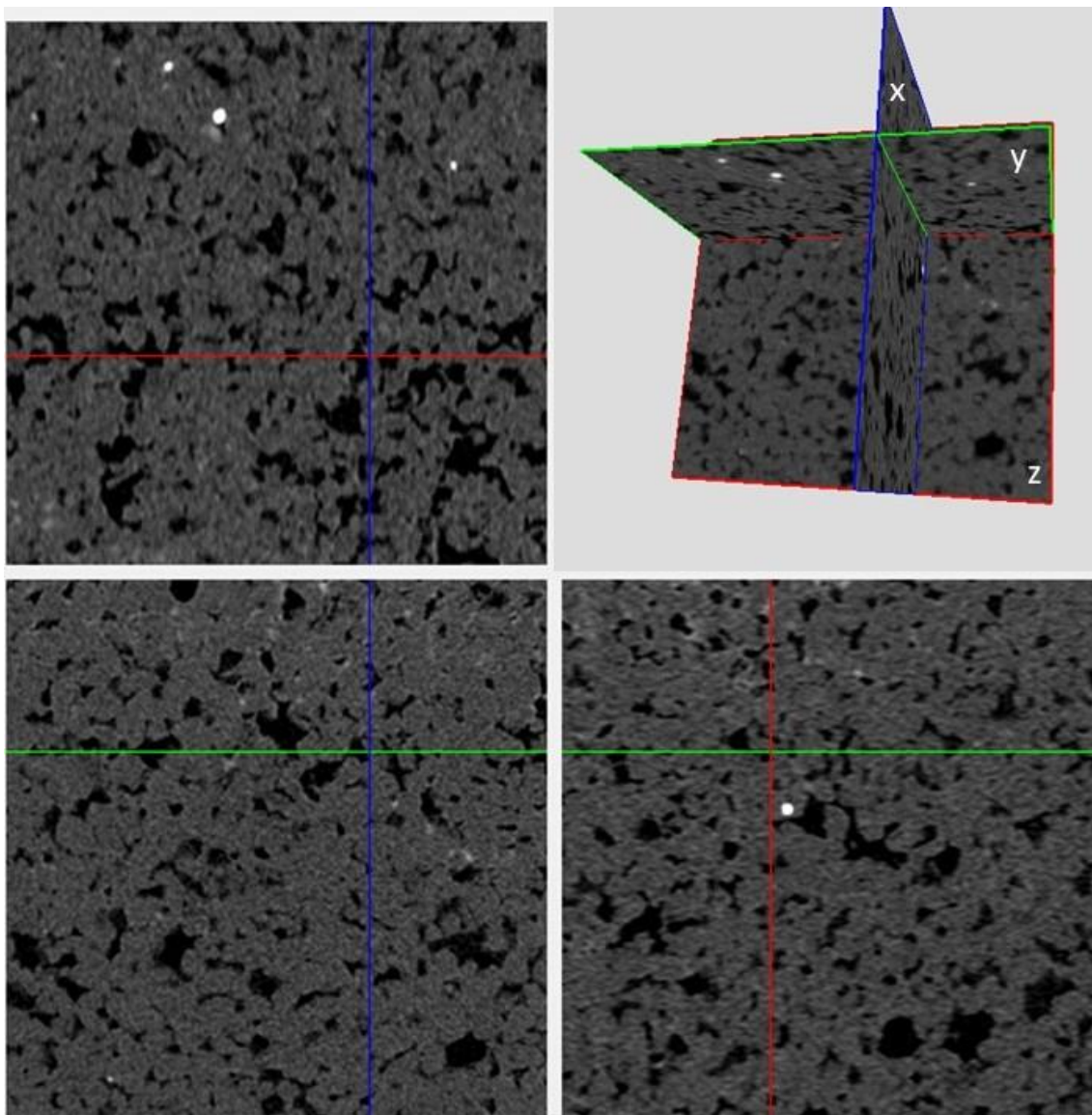
As figuras 17B e 19 representam a amostra TPJ-29A que consiste em um arenito homogêneo de cor castanho avermelhado, com grãos moderadamente selecionados e arredondados a sub-arredondados. A Figura 17B mostra o arenito TPJ-29A cortado no formato de um cubo, esse cubo apresenta volume total de  $19\text{mm}^3$  e volume de poros de  $7\text{mm}^3$ , em porcentagem o volume de poros representa 36% da

amostra. Na análise das imagens tridimensionais não foi observado orientação preferencial dos poros. Na figura 17, observa-se imagens bidimensionais em cortes XYZ na amostra TPJ-29A. Observa-se a presença de poros, quase sempre, envolvidos pelo cimento ferruginoso e silicoso, as imagens tridimensionais geradas desta amostra apresentam uma intensa turbidez e dificuldade na diferenciação dos grãos do arcabouço e cimento, sugerindo que a presença de muitas fases de cimentação e dissolução altere a resposta da rocha à técnica de microtomografia de raios X. Apesar de boa quantidade de poros na amostra, estes apresentam conectividade baixa a moderada entre si.

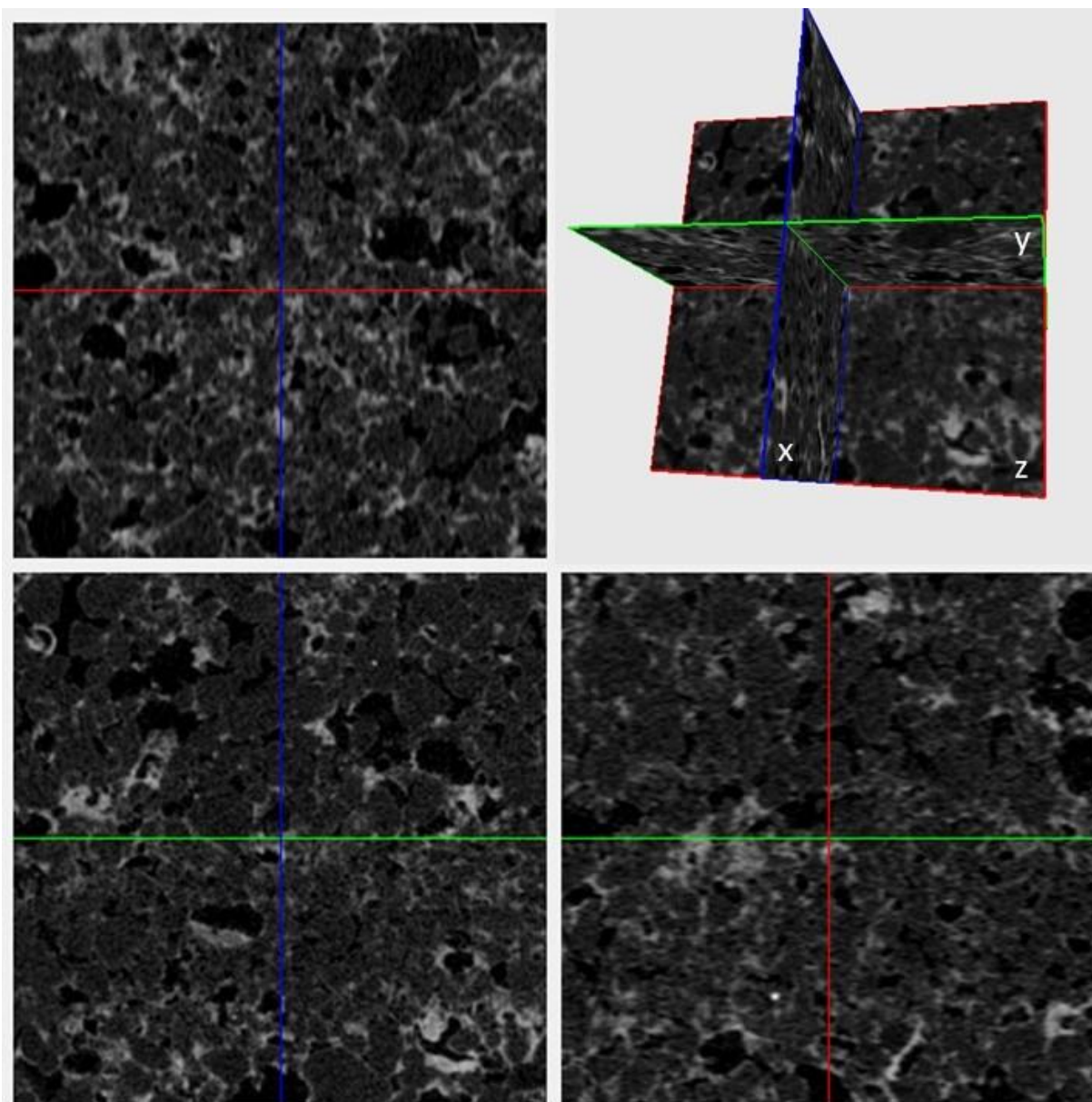
A figura 17C e 20 representa a amostra TPJ-29B que consiste em um arenito heterogêneo de cor castanha, com grãos bem selecionados e sub-arredondados, nesta amostra observa-se estratificação plano paralela. A Figura 17C mostra o arenito TPJ-29B cortado no formato de um cubo, esse cubo apresenta volume total de  $28,1\text{mm}^3$  e volume de poros de  $9,23\text{mm}^3$ , em porcentagem o volume de poros representa 32% da amostra. Na análise das imagens tridimensionais foi observado conectividade entre os poros (Figura 17).



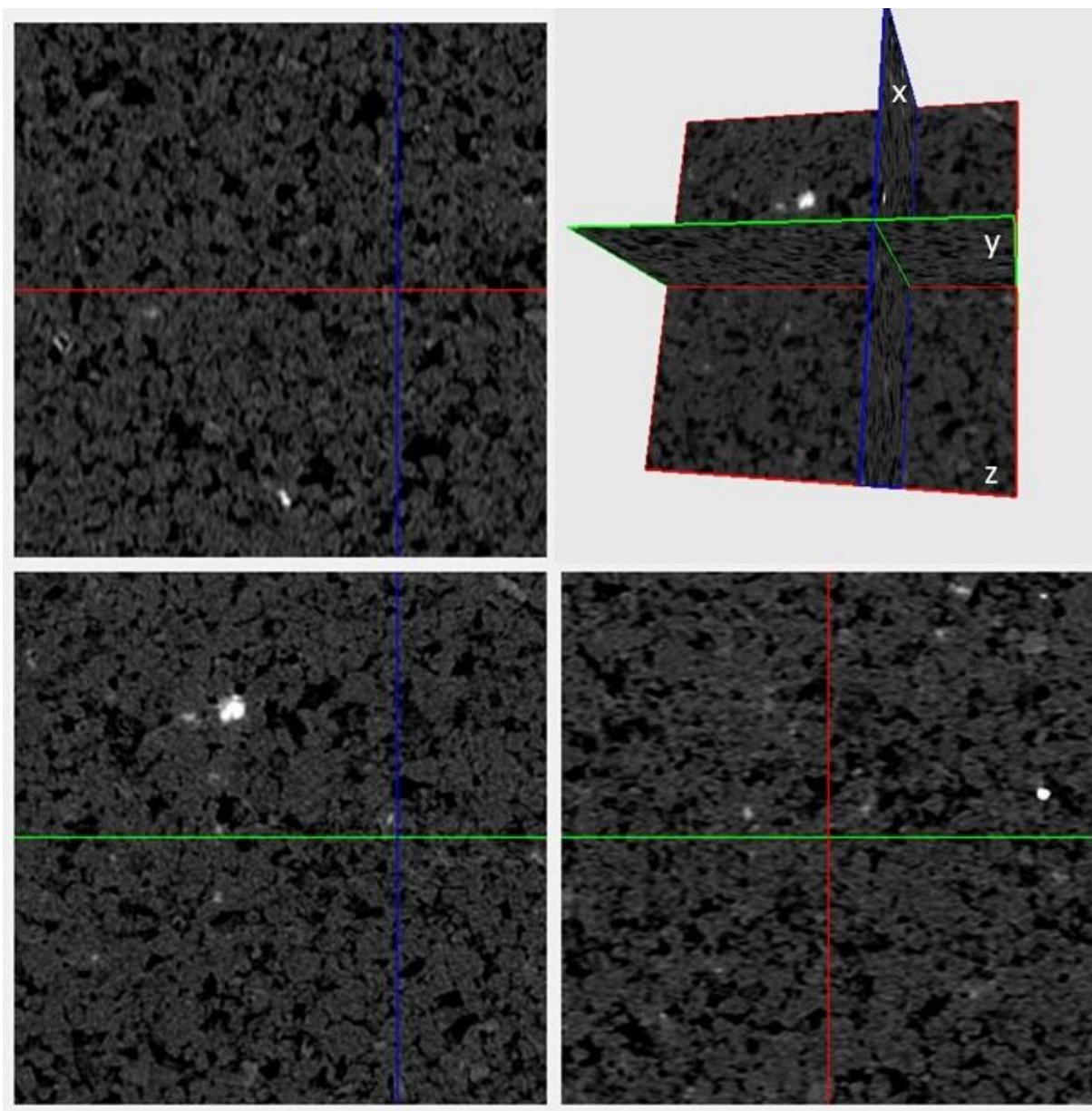
**Figura 17:** A, B e C) Imagens tridimensionais das amostras TPJ-28A, TPJ-29A e TPJ-29B, respectivamente.



**Figura 18:** Cortes bidimensionais na amostra TPJ-28A da Área do Médio Tapajós. Nota-se o empacotamento moderado, com quantidade razoável de poros e poros alargados caracterizando uma porosidade móldica, porém a conectividade entre estes poros é limitada. Os constituintes da amostra são representados em escalas de tons de cinza, sendo cinza médio e escuro, os grãos de quartzo e cimentação silicosa e a cimentação ferruginosa ocorrem em tons de cinza clara a branca; os minerais opacos se apresentam com alta luminescência e na cor branca.



**Figura 19:** Cortes bidimensionais na amostra TPJ-29 A pertencentes a área do Médio Tapajós. Nota-se o empacotamento moderado a aberto, com quantidade razoável de poros, entre estes poros grandes e alargados caracterizando uma porosidade móldica, com conectividade moderada entre os poros. Os constituintes da amostra são representados em escalas de tons de cinza, sendo cinza médio e escuro, os grãos de quartzo. A cimentação silicosa e a ferruginosa ocorre em grande quantidade e se apresentam em tons de cinza claro a branco; os minerais opacos se apresentam com alta luminescência e na cor branca.



**Figura 20:** Cortes bidimensionais na amostra TPJ-29 B pertencentes a área Tapajós. Nota-se o empacotamento moderado, com poros relativamente conectados, de tamanhos médios. Os constituintes da amostra são representados em escalas de tons de cinza, sendo cinza médio e escuro, os grãos de quartzo. A cimentação silicosa e a cimentação ferruginosa são reduzidas e se apresentam em tons de cinza claro a branco; os minerais opacos se apresentam com alta luminescência e na cor branca.

**Tabela 6:** Relação de volume total e de poros das amostras analisadas pelo tomógrafo.

Amostra	Volume	Volume de poros	Porosidade
TPJ-29A	19mm <sup>3</sup>	7mm <sup>3</sup>	36%
TPJ-29B	28,1mm <sup>3</sup>	9,23mm <sup>3</sup>	32%

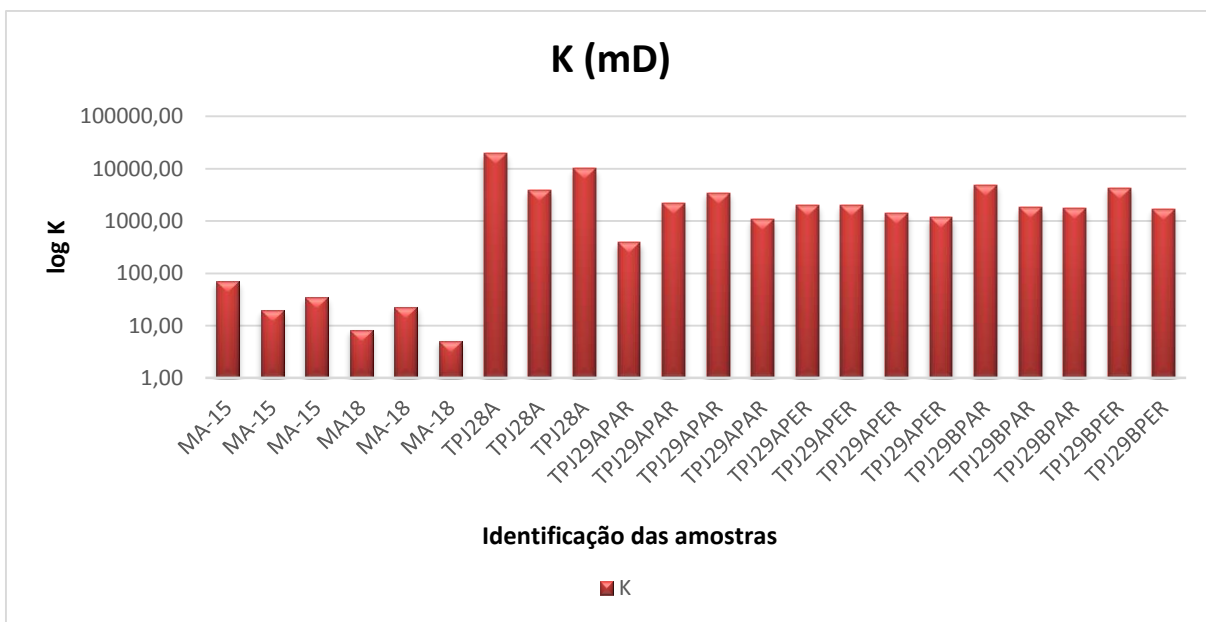
#### 4.4 ANÁLISE DE PERMEABILIDADE

Os valores de permeabilidade obtidos são apresentados no gráfico 1, mostrando a correlação entre o logaritmo de base 10 da permeabilidade para as amostras analisadas. No gráfico 2 é possível observar a variação nos valores de permeabilidade obtidos, com variação de dezena até milhares de milidarcy. O gráfico 3 ilustra a relação da porosidade obtida com o equipamento versus a porosidade estimada, também apresentados na escala logarítmica. Nas amostras da região do Médio Tapajós que apresentam estratificação plano-paralela, foram medidos valores de permeabilidade paralelos e perpendiculares aos planos de estratificação.

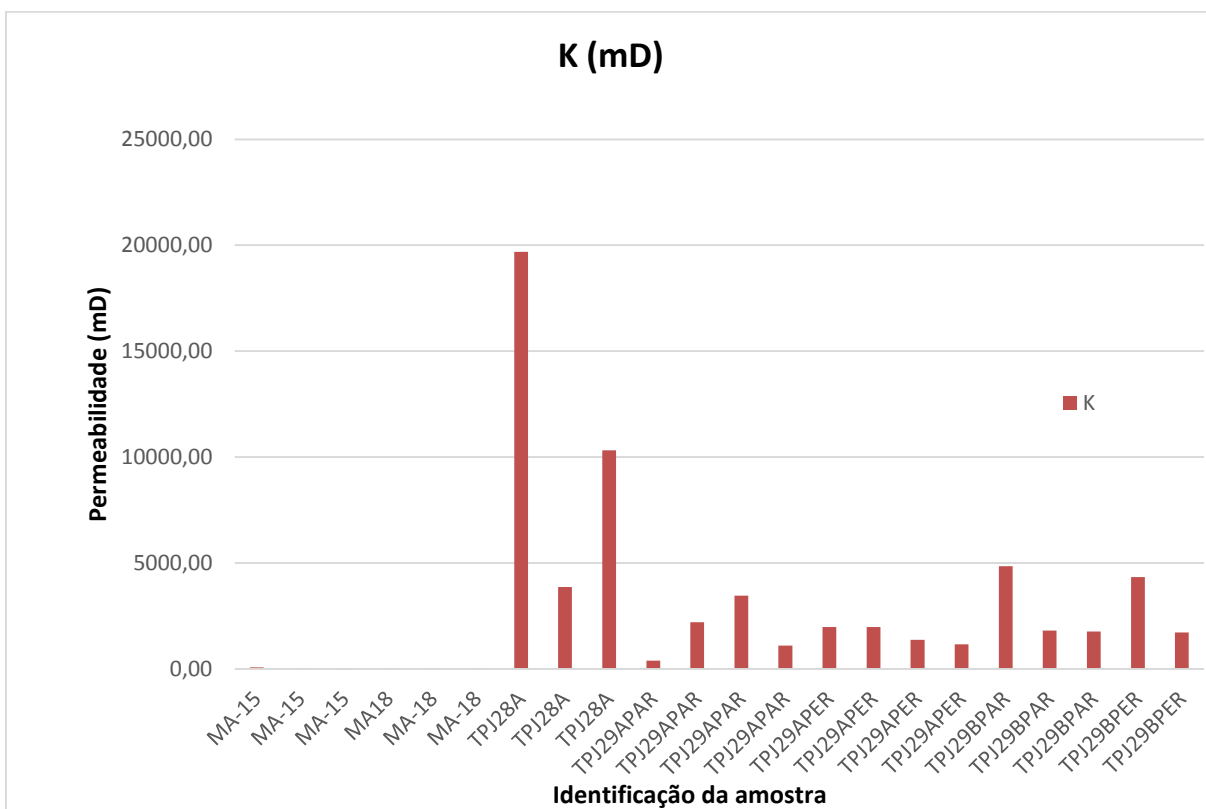
No gráfico logarítmico de barras da permeabilidade em milidarcy (Gráfico 1), têm-se a diferença de permeabilidade entre as duas áreas de estudo. Os arenitos da área de Monte Alegre apresentam porosidades relativamente baixas, com valores abaixo de 100 milidarcy. Já os arenitos da área Tapajós, apresentam valores elevados de permeabilidade, atingindo até 10.000 milidarcy. O gráfico de barras linear (Gráfico 2), ajuda a corroborar essa diferença apresentando os valores de permeabilidade numa escala de 0 a 25.000 milidarcy, ilustrando a grande diferença desta propriedade física nas amostras.

No gráfico da equação da reta para projeção da permeabilidade, a partir dos valores obtidos no TyniPerm, (Gráfico 3) têm-se a relação entre os valores medidos pelo permeômetro portátil com os valores recalculados de permeabilidade relativa. Observa-se que valores altos apresentados pelo equipamento, representam valores de permeabilidade relativamente baixos, como pode ser visto nas amostras MA-15 e MA-18. Outra característica interessante observada neste gráfico é a pouca diferença entre os valores de permeabilidade obtidos nos arenitos heterogêneos, onde a

permeabilidade paralela e perpendicular à estratificação plano-paralela das amostras apresenta variação insignificante.

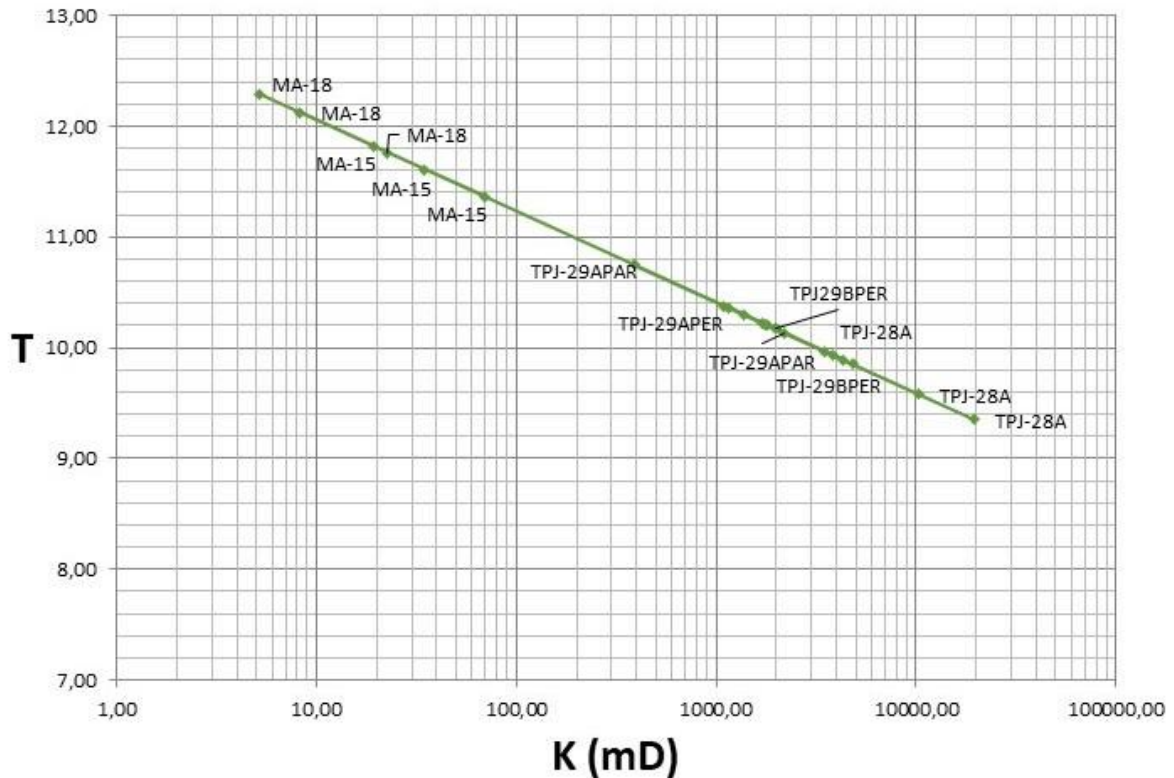


**Gráfico 1:** Gráfico em escala logarítmica na base 10 ilustrando a relação entre as permeabilidades dos arenitos das áreas Monte Alegre e Médio Tapajós.



**Gráfico 2:** Gráfico ilustrando a variação entre os valores de permeabilidade (variando de dezenas a milhares de milidarcys), apresentado em uma escala linear.

## PERMEABILIDADE



### AMOSTRAS:

- Área de Monte Alegre

MA-15

MA-18

-Área Tapajós

TPJ-28A

TPJ-29APAR (paralela a estratificação)

TPJ-29APER (perpendicular a estratificação)

TPJ-29BPAR (paralela a estratificação)

TPJ-29BPER (perpendicular a estratificação)

**Gráfico 3:** Correlação entre a permeabilidade obtida diretamente pelo equipamento *Tiny Perm II* e os valores obtidos pela equação da reta fornecida pelo fabricante para correção dos valores diretos do equipamento.

### 4.5 VISÃO GERAL DOS DADOS DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE

Os dados de porosidade e permeabilidade obtidos nas diferentes técnicas analíticas utilizadas, são sintetizados na tabela abaixo (Tabela 7).

**Tabela 7:** Síntese dos dados analíticos obtidos.

	$\phi$		K (mD)	Observações gerais
	Petrografia	Micro-CT	Permeâmetro	
<b>MA-15</b>	3%		122	Quartzarenitos, bem selecionados, com cimentação silicosa e ferruginosa.
<b>MA-18</b>	2,48%		12	Apresentam empacotamento fechado.
<b>TPJ-28A</b>	16,92%		11.289	
<b>TPJ-29A</b>	14,96%	36%	4.062	Quartzarenitos moderadamente selecionados, com cimentação silicosa, ferruginosa e coatings. Apresentam empacotamento aberto.
<b>TPJ-29B</b>	11,09%	32%	2.804	

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1 COMPARAÇÃO PETROGRÁFICA

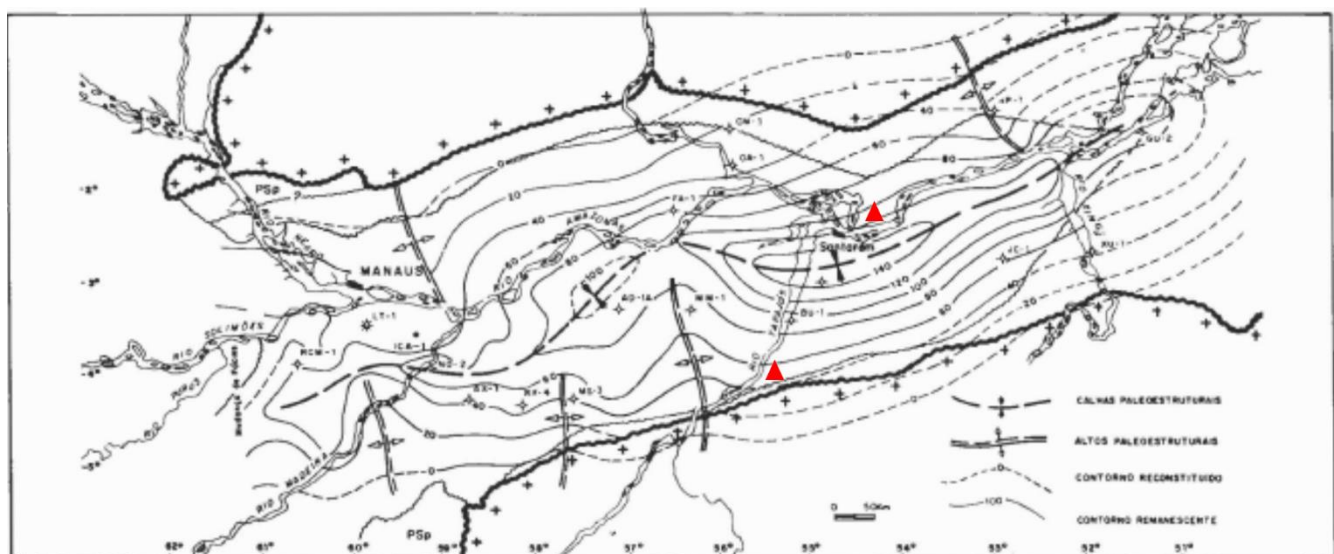
Os arenitos da Formação Monte Alegre são predominantemente quartzarenitos, com variações texturais e mineralógicas observadas nas amostras das duas localidades estudadas. Em termos gerais, observa-se duas tendências:

- Arenitos pertencentes a área de Monte Alegre apresentam-se bem selecionados, arredondados a sub-arredondados, com cimentação silicosa e localmente observa-se precipitação de óxido e hidróxido de ferro como cimentos, com maturidade alta e índice de empacotamento alto. São arenitos com porcentagens de porosidade e valores de permeabilidade baixos, assunto que será discutido adiante neste capítulo.

- Os arenitos localizados na área do Médio Tapajós são moderadamente selecionados, arredondados a sub-arredondados, com cimentação predominantemente silicosa e ferruginosa (precipitação de óxidos e hidróxidos de ferro), localmente observa-se cimentação argilosa composta por finas películas de argilominerais envolvendo os grãos do arcabouço, apresentam maturidade textural moderada a alta e índice de empacotamento aberto. São arenitos com porcentagens de porosidade e valores de permeabilidade elevados, quando comparados aos arenitos da área de Monte Alegre.

A melhor seleção dos arenitos da área de Monte Alegre em relação aos arenitos do Médio Tapajós pode ter relação com seu posicionamento paleogeográfico na bacia,

com a área de Monte Alegre localizada no centro da bacia onde os sedimentos, ali depositados, tiveram um maior retrabalhamento e seleção (Figura 21).



**Figura 21:** Mapa de isópacas da Formação Monte Alegre, detalhe para as áreas de estudo em vermelho. Retirada de Neves (1990)

## 5.2 CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE POROSIDADE, PERMEABILIDADE E PETROGRAFIA

Os valores de porosidade obtidos por petrografia quantitativa apresentam diferenças entre as amostras analisadas. Observou-se que as amostras MA-15 e MA-18 da área Monte Alegre apresentam porosidades relativamente menores, enquanto as amostras TPJ-28A, TPJ-29A e TPJ-29B maiores, atingindo 10-15%. De acordo com Silva (2014), a porosidade pode ser afetada por uma série de fatores, como por exemplo, tamanho dos grãos, cimentação, compactação, empacotamento e dissolução. Na análise petrográfica, observou-se diferenças texturais entre as amostras das duas localidades estudadas que podem ter influenciado a porosidade destes arenitos.

Nas amostras MA-15 e MA-18 observa-se uniformidade no tamanho dos grãos, estes se apresentam bem selecionados e arredondados a sub-arredondados, esta característica garante uma maior porosidade às rochas. Porém, o empacotamento normal a fechado, aliado a cimentação silicosa (e por vezes, argilosa) diminuiu consideravelmente a porosidade destas amostras.

Por outro lado, os arenitos da área Tapajós apresentam grãos moderadamente selecionados. Na amostra TPJ-28A, por exemplo, observa-se grande variação do tamanho do grão, desde areia fina a muito grossa. Aliada a isto, estes arenitos apresentam empacotamento aberto, evidenciado pelos contatos pontuais e “flutuantes” entre os grãos e cimentação ferruginosa somente ao redor dos grãos. Todas estas características afetam a porosidade, e podem ser características texturais, mineralógicas e diagenéticas que modificaram a porosidade destes arenitos.

De acordo com Bocardi (2005), o índice de empacotamento indica a profundidade e o tempo de soterramento, e são fatores responsáveis pela redução da porosidade. Sendo assim, o empacotamento normal a fechado observado nas amostras da área de Monte Alegre, corroborados pelos contatos côncavo-convexos entre os grãos do arca-bouço, indicam que o soterramento ocorreu em níveis de profundidade intermediários a profundos. Enquanto os arenitos da área Tapajós, com contatos pontuais e empacotamento aberto, apontam para um soterramento em níveis rasos.

Além disso, nas amostras da área do Médio Tapajós observa-se localmente grãos irregulares com aspectos de corrosão, característica que aponta para uma dissolução tardia (Bocardi 2005). Porém, a ausência de porosidade intragranular, nas amostras analisadas, coloca esta hipótese de dissolução tardia em dúvida.

Os resultados obtidos através da microtomografia apontam para valores de porosidade entre 30-36% para as amostras da área Tapajós. São valores elevados em comparação com aqueles obtidos na petrografia quantitativa. Entretanto, as imagens tridimensionais e os cortes bidimensionais obtidos pelo micro-CT apresentam características importantes. Na amostra TPJ-29 A, observa-se grande quantidade de cimento, representado em cinza claro, ao redor dos poros. Essa cimentação reduz a conectividade entre esses poros, e conseqüentemente reduz a permeabilidade da amostra.

Nos valores de permeabilidade obtidos através do permeâmetro portátil de ar é possível observar as diferenças de permeabilidade entre as duas áreas de estudo. Nos gráficos 1 a 3, observa-se que os valores de permeabilidade das amostras da área Monte Alegre variam de 10 a 100 milidarcys, enquanto na área Tapajós estes

valores atingem até 10.000 milidarcys (valores em escala logarítmica na base 10). Assim como a porosidade, a permeabilidade em rochas reservatórios também é afetada por alguns fatores, são eles: arranjo dos grãos, presença de minerais lamelares, cimentação e fraturamento da rocha (Silva 2014).

Os resultados de permeabilidade podem ser correlacionados com a petrografia. Os arenitos da área Monte Alegre apresentam valores de porosidade e permeabilidade baixos, assim como na área do Médio Tapajós os valores de porosidade e permeabilidade são uniformes. Os aspectos texturais descritos para explicar a diferença de porosidade entre as duas áreas, também se aplica no caso da permeabilidade.

Nota-se que entre as amostras da área Monte Alegre, aquela que se apresenta silicificada apresenta valores menores de permeabilidade (a amostra MA-18), corroborando a hipótese de que o maior empacotamento e cimentação da amostra, são os principais parâmetros para estas diferenças de porosidade e permeabilidade.

Outro aspecto observado nas amostras da área do Médio Tapajós, foi a pouca variação nos valores de permeabilidade paralelos e perpendiculares a estratificação da amostra. De acordo com Silva (2014), a permeabilidade em rochas heterogêneas apresenta diferenças de acordo com a direção em que são medidas. No Gráfico 1, observa-se na amostra TPJ-29 A que os valores de permeabilidade paralelos as estratificações são ligeiramente maiores do que os valores de permeabilidade perpendiculares a esta. Enquanto na amostra TPJ-29B observa-se o contrário, com um pequeno aumento de permeabilidade nos valores medidos perpendicularmente a estratificação.

### **5.3 PALEOGEOGRAFIA, DIAGÊNESE E GERAÇÃO DE POROSIDADE**

Os dados apresentados podem ser interpretados efetuando correlação entre os processos diagenéticos e a paleogeografia da Formação Monte Alegre na Bacia do Amazonas.

As áreas de estudo desta pesquisa localizam-se em porções distintas da bacia. A área de Monte Alegre ocorre no centro da bacia, enquanto a área de Tapajós na borda sul. Estas diferenças paleográficas interferem em aspectos texturais, como seleção e arredondamento dos grãos e também possuem influência na diagênese,

pois além do menor soterramento nas bordas da bacia afetando o grau de empacotamento e as bordas também podem servir como zona de recarga para a bacia expondo estas rochas a processos telodiagenéticos mais expressivos.

A análise dos aspectos mineralógicos e texturais é de importância para o estudo diagenético de rochas sedimentares. O melhor entendimento da história diagenética da área de estudo auxilia no entendimento da formação e redução de porosidade. Em geral, a porosidade observada nos arenitos da Formação Monte Alegre é predominantemente intercrystalina para os arenitos da área Monte Alegre e móldica nos arenitos da área Tapajós.

Nas amostras MA-15 e MA-18 os principais modificadores diagenéticos observados são: a cimentação com precipitação de sílica, a presença de finas películas de argilominerais (*coating*) ao redor dos grãos do arcabouço e indícios de compactação mecânica como grãos de quartzo fraturados internamente. Enquanto que nas amostras TPJ-28 A, TPJ-29 A, TPJ-29 B a presença de precipitação de óxido e hidróxido de ferro, *coating*, precipitação de sílica como cimento e presença de poros grandes e agigantados (porosidade secundária) são os principais constituintes diagenéticos.

A compactação mecânica ocorre em função do aumento da pressão litostática e da presença de fluidos intersticiais durante o soterramento dos sedimentos. Este processo é responsável pela geração de fraturamento interno nos grãos de quartzo e feldspato, gerando porosidade intracrystalina, característica observada nos arenitos da área Monte Alegre (Menezes 1999).

A dissolução dos grãos ocorre devido a interação destes com fluidos percolantes. A dissolução foi o principal processo de modificação de porosidade observado ao longo dos arenitos da Formação Monte Alegre. Os principais constituintes diagenéticos apresentados foram agrupados, possibilitando a determinação de pelo menos, 2 eventos de dissolução. Estes eventos foram responsáveis pela precipitação de cimentos silicosos como consequência da corrosão das bordas dos grãos de quartzo e lixiviação dos grãos de feldspato, caracterizando o primeiro evento de dissolução. A presença de poros com dimensões grandes e alargados, a presença de finas películas de argilas (*coating*) e a presença de

cimentação de óxido e hidróxido de ferro, seria o segundo evento de dissolução que teria ocorrido em ambiente de telodiagênese.

De acordo com Worden et al. (2003), a geração dessas feições são características de rochas que não foram submetidas a um soterramento pronunciado, caracterizando um ambiente eodiagenético. No entanto, Menezes (1999), defende que rochas submetidas a níveis de soterramento efetivo e que, posteriormente, tenham sido soerguidas por determinado evento tectônico possam gerar elementos diagenéticos semelhantes, quando expostas a telodiagênese.

Em adição, a área de Monte Alegre encontra-se próxima a intrusões básicas do Magmatismo Penatecaua, um fator importante, pois pode ter sido fonte de calor e de fluidos ricos em sílica que participaram aumentando a compactação e silicificação destes arenitos.

Os diferentes constituintes diagenéticos e índices de empacotamento das áreas Tapajós e Monte Alegre, sugerem duas hipóteses para a gênese da porosidade nas amostras estudadas.

**Hipótese 1:** Os arenitos da Formação Monte Alegre foram submetidos a diagênese diferencial ao longo da unidade, e como consequência os arenitos da área Tapajós apresentam empacotamento aberto evidenciado pelos contatos pontuais e flutuantes entre os grãos, e pela presença de poros alargados, diferentemente dos arenitos de Monte Alegre, que apresentam cimentação silicosa, cujos arenitos podem ou não terem tido soterramento efetivo, porém passaram por processos de lixiviação em condições superficiais, e também submetidos a influência de temperatura, pressão e fluidos provenientes do Magmatismo Penatecau.

**Hipótese 2:** Os arenitos foram submetidos a diagênese que agiu da mesma forma e intensidade ao longo da Formação Monte Alegre. Porém, os arenitos da borda da Bacia (Tapajós) foram soerguidos por movimentos tectônicos e então submetidos a telodiagênese, justificando a presença de modificadores diagenéticos, dissolução dos grãos e porosidade secundária nos arenitos da área Tapajós. A não ocorrência destes modificadores na área de Monte Alegre, que apresenta características de processos mesodiagenéticos como a cimentação por precipitação de quartzo, fraturamento interno dos grãos de quartzo e trama fechada, estaria associada aos processos menos

efetivos da telodiagênese devido provavelmente a silicificação pela ação do magmatismo Penatecaua.

## **6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A petrografia quantitativa é uma técnica de análise bidimensional dos poros, trata-se uma técnica rápida e de baixo custo. Os resultados obtidos nesta análise se mostraram coerentes com dados da bibliografia, porém por se tratar de uma técnica bidimensional, aspectos morfológicos e estruturais dos poros não podem ser analisados. No entanto, a técnica apresenta mais vantagens do que desvantagens, sendo uma boa opção para análises preliminares de porosidade em rochas reservatórios.

A microtomografia computadorizada de raios X consiste em uma técnica não destrutiva, que permite a visualização bi e tridimensional de cortes da amostra, o cálculo de volume além da quantificação de poros. A técnica se mostrou interessante na caracterização de reservatórios, uma vez que permite a obtenção de imagens tridimensionais, facilitando o estudo da estrutura interna, morfologia e conectividade dos poros. No presente trabalho, a quantificação de porosidade a partir da técnica apresentou resultados destoantes do esperado para estes arenitos a resolução obtida nas imagens não atinge o menor tamanho de poro, e conseqüentemente a reconstrução do objeto pode ter como consequência valores de porosidade superestimados. Outra limitação da técnica é a abrangência desta a análise abrange um pequeno cilindro ou cubo com no máximo 20mm de altura e os resultados podem não ser reais quando se observa a unidade geológica em um contexto regional. Além disso, a técnica exige o uso de softwares e processamento computacional específico para a reconstrução tridimensional das amostras, bem como manutenção especializada dos equipamentos, sendo então uma técnica de médio a alto custo. Sendo assim, o uso da microtomografia na caracterização de porosidade de rochas reservatórios, é válido, porém deve-se ter certa precaução nos quesitos representatividade da amostra num contexto regional e coerência dos resultados quantitativos com a realidade do objeto de estudo.

O permeâmetro portátil de ar é uma técnica não destrutiva, prática e barata para análises de permeabilidade. Os resultados obtidos pelo equipamento, forneceram dados coerentes e que puderam ser correlacionados com as outras

técnicas utilizadas. Das três técnicas analíticas utilizadas, o permeâmetro se mostrou a técnica com menor erros analíticos e com resultados confiáveis. Sendo assim, seu uso para análise de permeabilidade é útil para a caracterização em campo e laboratório de rochas reservatórios, e pode ser utilizada aliada a técnicas mais sofisticadas.

Os arenitos da Formação Monte Alegre foram analisados em duas áreas distintas na bacia: a área Monte Alegre e a área Tapajós. Os arenitos da área Monte Alegre apresentam porosidades entre 2-3% e valores de permeabilidade de até 100 milidarcys. São arenitos homogêneos, bem selecionados, com grãos arredondados a sub-arredondados e com cimentação silicosa e localmente argilosa. Enquanto os arenitos da área Tapajós apresentam porosidades num intervalo de 10-35% e valores de permeabilidade de até 10.000 milidarcys. São arenitos heterogêneos, moderadamente selecionados, com grãos arredondados a sub-arredondados e cimentação ferruginosa.

Ao longo do presente trabalho, constatou-se o empacotamento e a cimentação como aspectos importantes para as diferenças de porosidade e permeabilidade observadas nos arenitos da Formação Monte Alegre. Sugere-se que o empacotamento mais fechado da área Monte Alegre e a cimentação silicosa se deva a proximidade da área com a intrusão da Província Magmática Penacateua, que acabou afetando a textura destes arenitos. Outra possível hipótese é que a localização paleogeográfica tenha influenciado na seleção dos grãos e textura da rocha, aliado a uma possível diagênese e compactação diferencial ao longo do intervalo estratigráfico da Formação Monte Alegre e também pela telodiagênese diferencial, mais atuante na área Médio Tapajós, junto a borda da bacia.

Como recomendações seria interessante a caracterização pormenorizada dos eventos diagenéticos que atuaram sobre os arenitos da Formação Monte Alegre nas duas áreas, em número maior de amostras, inclusive em amostras de subsuperfície e sua correlação com a análise de curvas de subsidência para poços próximos a essas regiões visando associar os eventos diagenéticos aos de soterramento e soerguimento.

## REFERÊNCIAS

- Allen T. 1997. *Particle size measurement: surface area and pore size determination*. Vol. 2, Chapman & Hall, Londres.
- ANP. 2015. Bacia do Amazonas, Sumário Geológico e Setores em Oferta. 13º Rodada de licitações. Agência Nacional do Petróleo (ANP), Gás Natural e Biocombustíveis. 17 p
- Bocardi L.B. 2005. *Petrologia e aspectos diagenéticos de arenitos e reservatórios do Grupo Itararé (Carbonífero-Permiano), Bacia do Paraná*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação, Departamento de Geologia – UFPR. 112p.
- Caputo M.V. 1984. *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil*. Tese de Pós-Doutorado, Santa Barbara, California University, 583 p.
- Costa M.G.F. 1983. *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 J., Vasconcellos E.M.G., Barros C.E.M., Cury L.F., Juk K.F.V. 2012. *Petrologia e geoquímica da soleira de Medicilândia, diabásio Penatecaua, PA*. Revista Brasileira de Geociências, 42(4): 754-771.
- Cordani U.G., Brito-Neves B.B., Fuck R.A., Porto R., Thomaz Filho A.; Cunha F.M.B. 1984. *Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras*. Rio de Janeiro: Petrobras. 70 p. (Ciência Técnica Petróleo. Seção: Exploração de petróleo, 15).
- Cordani U.G, Brito Neves B.B, Thomaz Filho A. 2009. *Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras (Atualização)*. Boletim de Geociências Petrobrás, Rio de Janeiro, v.17, n.1, p. 205-219.
- Cunha P.R.C., Melo J.H.C, Silva O.B. 2007. *Bacia do Amazonas*. Boletim Geociências Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 227-251, maio/nov.

Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM). 2005. *Carta geológica do Brasil ao milionésimo*. Disponível em: <https://goo.gl/EZLji3>. Acessado em 27 de novembro de 2017.

Figueira I.F.R., Salamuni E., Mancini F. 2012. *Deformação dútil em rochas do magmatismo Penacateau no domo de Monte Alegre (PA)*. Revista Brasileira de Geociências, volume 42(4), 2012.

Folk R.L. 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company. Austin, Texas.

Lopes A.P., Fiori A.P., Reis Neto J.M., Marchese C., Vasconcellos E.M.G., Trzaskos B., Onishi C.T., Pinto-Coelho C.V., Secchi R., Silva G.F. 2012. *Análise tridimensional de rochas por meio de microtomografia computadorizada de raios X integrada a petrografia*. UNESP, Geociências, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 129-142.

Palombo L. 2017. *A microtomografia de raios X e a porosimetria por intrusão de mercúrio na determinação de porosidade e densidade de rochas reservatório*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. 88p.

Pereira E., Carneiro C.D.R., Bergamaschi S., Almeida F.F.M. 2012. *Evolução das sinéclises paleozoicas: Províncias Solimões, Amazonas, Parnaíba e Paraná*. Em: Hasui Y., Carneiro C.D.R., Almeida F.F.M., Bartorelli A. *Geologia do Brasil*. p. 374-394.

Reis Neto J.M., Fiori A.P., Lopes A.P., Marchese C., Pinto-Coelho C.V., Vasconcellos E.M.G., Silva G.F., Secchi R. 2011. *A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas*. Revista Brasileira de Geociências, volume 41 (3), p. 498-508.

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

Matsuda N.S., Dino R., Wanderley filho J.R. 2004. *Revisão litoestratigráfica do Grupo Tapajós, Carbonífero Médio – Permiano da Bacia do Amazonas*. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 12, n. 2, p. 435-441.

Medeiros W.B.B. 2015. *Estudo da permeabilidade de meios porosos com solução polimérica*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Química – UFRN, Natal.

Menezes M.R.F. 1999. *Estudos sedimentológicos e o contexto estrutural da Formação Serra do Martins, nos Platôs de Portalegre, Martins e Santana/RN*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN. 197p.

Neves C.A.O. 1990. *Prospectos potenciais e áreas prioritárias para exploração na Bacia do Amazonas*. B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro, 4(1): 95-103, jan/mar.

New England Research. *Tiny Perm II – Portable air permeameter*. Manual do fabricante.

Vergés E., Tost D., Ayala D., Ramos E., Grau S. 2011. *3D pore analysis of sedimentary rocks*. Sedimentary Geology, 234(1), p. 109-115.

Silva A.D.L. 2014. *Caracterização petrofísica em área produtora de minério de ferro: Investigação de porosidade, permeabilidade e velocidades de ondas acústicas compressionais e cisalhantes em plugs de rocha*. Dissertação de mestrado profissional, Engenharia Geotécnica – UFOP, Ouro Preto (MG). 146p.

Worden R.H., Burley S.D. *Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone*. Department of Earth Sciences, University of Liverpool. 43p.

.

## **APENDICE I: Fichas petrográficas**

**FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA Nº 01**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ | SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA | DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**I. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA:** MA-15

**CÓD.**

**LÂMINA:** MA-15

Unidade geológica: Fm. Monte Alegre

**II. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA:**

Arenito de cor amarelo claro, com superfícies de alteração na cor castanho amarelado, a rocha se apresenta friável com alto grau de intemperismo superficial. Apresenta grãos de areia fina a muito fina e matriz siltosa. Os grãos do arcabouço se apresentam arredondados a sub-arredondados e moderadamente esféricos, e bem selecionados. Apresenta estrutura maciça e é composto mineralogicamente por quartzo. Em amostra de mão, não foi possível identificar a composição da matriz.

**III. DESCRIÇÃO DA LÂMINA DELGADA:**

**A. Resumo**

Quarzarenito composto predominantemente por quartzo, com cimento silicoso e películas de argilominerais envolvendo os grãos. Nota-se alteração de minerais ferruginosos. A porosidade é de 3% e predominantemente intergranular.

**B. Textura**

- Trama:** Os grãos se apresentam em contatos retilíneos, por vezes, côncavo-convexo. Observa-se uma cimentação silicoso e siltico-argilosa, caracterizada por finas lamelas ao redor dos grãos e no preenchimento de poros. Não se observa matriz na amostra.
- Tamanho do grão:** Têm-se a predominância da granulometria de areia fina a muito fina (90%).
- Angularidade e esfericidade:** Observa-se uma uniformidade no grau de angularidade e esfericidade dos grãos que compõem o arcabouço. No geral, os grãos são arredondados a sub-arredondados com grau de esfericidade moderado.
- Maturidade textural:** A rocha apresenta cerca de 85% de arcabouço, 0% de matriz e 15% de cimento. A relação arcabouço/matriz e a presença de grãos arredondados e esféricos, coloca estes arenitos como maduros texturalmente.

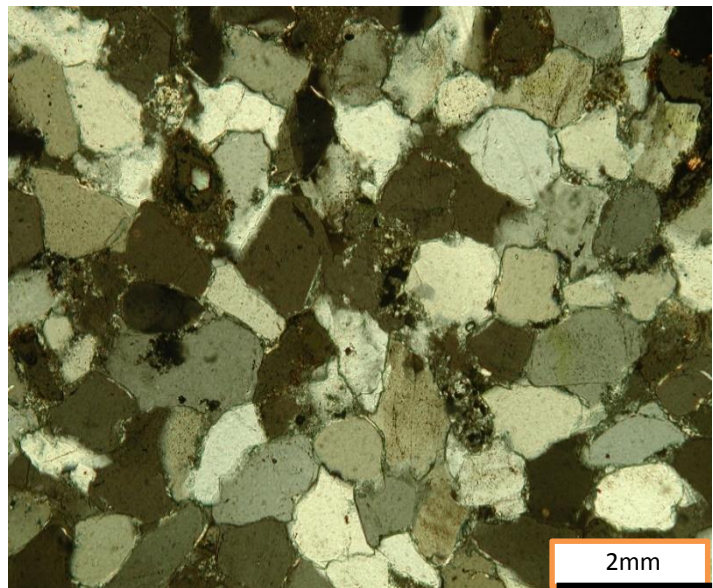
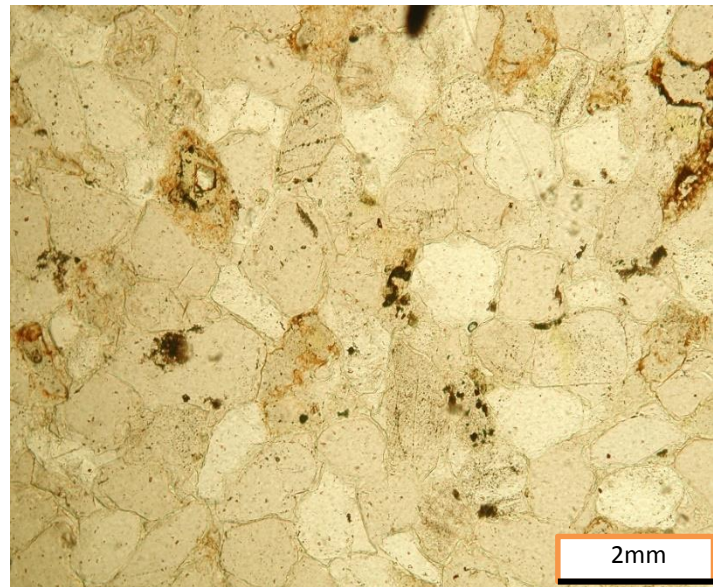
**C. Mineralogia**

- **Quartzo:** ocorre em grãos arredondados a sub-arredondados, bem selecionados e moderadamente esféricos. Observa-se a ocorrência de quartzo monocrystalino e policristalino. Além disso, têm-se a presença de deformação em alguns grãos de quartzo evidenciado pela presença de sub-grãos e extinção ondulante.

- **Feldspato:** ocorrem em grãos sub-arredondados e esféricos, se apresentam intensamente alterados. Em alguns grãos observa-se geminação em tabuleiro de xadrez incipiente.

- **Minerais micáceos:** ocorrem em grãos tabulares, observa-se a presença de clivagem perfeita em uma direção. Em geral, se trata de muscovita, porém biotita também é observada. Alguns grãos apresentam alteração pra clorita.

**IV. FOTOMICROGRAFIAS:**



*Análise modal*

Mineral	%
---------	---

Quartzo	95	
Feldspato	5	
Zircão	traço	
Minerais micáceos	traço	
<b>Observações gerais:</b>		

**FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA Nº 02**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ | SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA | DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**V. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA:** MA-18  
Unidade geológica: Fm. Monte Alegre**CÓD. LÂMINA:** MA-18**VI. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA:**

Arenito de cor branca, com superfícies de alteração na cor castanho escuro, a rocha se apresenta silicificada. Apresenta grãos de areia fina a muito fina e não é possível identificar a matriz em macroscopia. Os grãos do arcabouço se apresentam arredondados a sub-arredondados e esféricos, e bem selecionados. Apresenta estrutura maciça e é composto mineralogicamente por quartzo e feldspato.

**VII. DESCRIÇÃO DA LÂMINA DELGADA:****D. Resumo**

Quarzarenito composto predominantemente por quartzo, com cimento silicoso e películas de argilominerais envolvendo os grãos. Nota-se alteração de minerais ferruginosos. A porosidade é de 2% e predominantemente intergranular.

**E. Textura**

5. **Trama:** Os grãos se apresentam em contatos retilíneos, por vezes, côncavo-convexo. Observa-se uma cimentação silicosa

caracterizada por finas lamelas ao redor dos grãos e no preenchimento de poros. Não se observa matriz na amostra.

6. **Tamanho do grão:** Têm-se a predominância da granulometria de areia fina a muito fina (90%).

7. **Angularidade e esfericidade:** Observa-se uma uniformidade no grau de angularidade e esfericidade dos grãos que compõem o arcabouço. No geral, os grãos são arredondados a sub-arredondados com grau de esfericidade moderado.

8. **Maturidade textural:** A rocha apresenta cerca de 90% de arcabouço, 0% de matriz e 10% de cimento. A relação arcabouço/matriz e a presença de grãos arredondados e esféricos, coloca estes arenitos como maduros texturalmente.

**F. Mineralogia**

- Quartzo: ocorre em grãos arredondados a sub-arredondados, bem selecionados e moderadamente esféricos. Observa-se a ocorrência de quartzo monocristalino e policristalino. Além disso, têm-se a presença de deformação em alguns grãos de quartzo evidenciado pela presença de sub-grãos e extinção ondulante.

- Feldspato: ocorrem em grãos sub-arredondados e esféricos, se apresentam intensamente alterados. Em alguns grãos observa-se geminação em tabuleiro de xadrez incipiente.

- Minerais micáceos: ocorrem em grãos tabulares, observa-se a presença de clivagem perfeita em uma direção. Em geral, se trata de muscovita, porém biotita também é observada. Alguns grãos apresentam alteração pra clorita.

- Zircão: ocorrem em grãos diminutos, com relevo alto. Os grãos se apresentam arredondados e esféricos.

**VIII. FOTOMICROGRAFIAS:***Análise modal*

Mineral	%	
Quartzo	90	
Feldspato	5	
Zircão	traço	
Minerais micáceos	5	

**FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA Nº 03**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ | SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA | DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**IX. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA:** TPJ-28A  
Unidade geológica: Fm. Monte Alegre**CÓD. LÂMINA:** TPJ-28A**X. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA:**

Arenito de cor castanho avermelhado, se apresenta extremamente friável e intemperizada. Apresenta grãos de areia fina a muito fina e matriz argilosa. Os grãos do arcabouço se apresentam arredondados a sub-arredondados e esféricos, e bem selecionados. Apresenta estratificação plano paralela caracterizada por bandas milimétricas com variação na coloração e é composto mineralogicamente por quartzo e feldspato.

**XI. DESCRIÇÃO DA LÂMINA DELGADA:****G. Resumo**

Quartzarenito de composição predominantemente quartzosa, ocorrendo também feldspato alcalino, plagioclásio e zircão. Apresenta uma trama aberta e grãos pouco selecionados. A cimentação é ferruginosa e por vezes silicosa. A porosidade é em torno de 10%.

**H. Textura**

9. **Trama:** Não se observa contato direto entre os grãos, em geral estão com camadas de cimento no entorno. Observa-se uma cimentação ferruginosa caracterizada por finas lamelas ao redor dos grãos e no preenchimento de poros. Observa-se uma matriz siltico-argilosa. Observa-se uma grande quantidade de poros, porém a conexão entre esses poros é relativamente boa.

10. **Tamanho do grão:** Têm-se a predominância da granulometria de areia fina a grossa (90%), pouco selecionados.

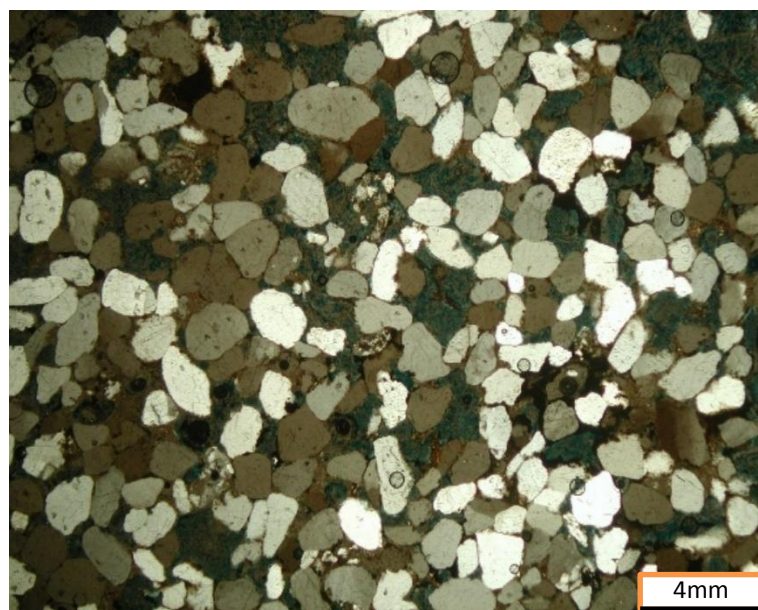
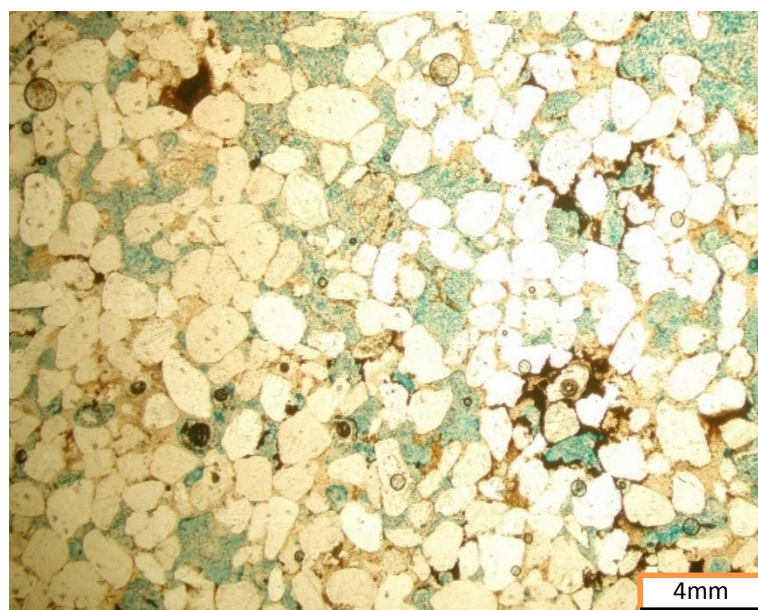
11. **Angularidade e esfericidade:** Observa-se uma uniformidade no grau de angularidade e esfericidade dos grãos que compõem o arcabouço. No geral, os grãos são arredondados a sub-arredondados com grau de esfericidade moderado.

12. **Maturidade textural:** A rocha apresenta cerca de 75% de arcabouço, 5% de matriz e 20% de cimento. A relação arcabouço/matriz e a presença de grãos arredondados e esféricos, coloca estes arenitos como maduros texturalmente.

**I. Mineralogia**

- **Quartzo:** ocorre em grãos arredondados a sub-arredondados, bem selecionados e moderadamente esféricos. Observa-se a ocorrência de quartzo monocrystalino e policristalino. Além disso, têm-se a presença de deformação em alguns grãos de quartzo evidenciado pela presença de sub-grãos e extinção ondulante.

- **Feldspato:** ocorrem em grãos sub-arredondados e esféricos, se apresentam intensamente alterados. Em

**XII. FOTOMICROGRAFIAS:**

alguns grãos observa-se geminação em tabuleiro de xadrez incipiente.

- Minerais micáceos: ocorrem em grãos tabulares, observa-se a presença de clivagem perfeita em uma direção. Em geral, se trata de muscovita, porém biotita também é observada. Alguns grãos apresentam alteração pra clorita.

- Zircão: ocorrem em grãos diminutos, com relevo alto. Os grãos se apresentam arredondados e esféricos.

*Análise modal*

Mineral	%
Quartzo	90
Feldspato	5
Zircão	traço
Minerais micáceos	5

**FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA Nº 04**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ | SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA | DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**XIII. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA:** TPJ-29A  
Unidade geológica: Fm. Monte Alegre**CÓD. LÂMINA:** TPJ-29A**XIV. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA:**

Arenito de cor castanho avermelhado, se apresenta extremamente friável e intemperizada. Apresenta grãos de areia fina a muito fina e matriz argilosa. Os grãos do arcabouço se apresentam arredondados a sub-arredondados e esféricos, e bem selecionados. Apresenta estratificação plano paralela caracterizada por bandas milimétricas com variação na coloração e é composto mineralogicamente por quartzo e feldspato.

**XV. DESCRIÇÃO DA LÂMINA DELGADA:****J. Resumo**

Quartzarenito de composição quartzosa, com cimentação ferruginosa, presença de argilominerais como finas películas (coating). A trama é aberta, com grãos pouco selecionados, porém arredondados. Presença de grandes poros, com porosidade em torno de 15%.

**K. Textura**

**13. Trama:** Não se observa contato direto entre os grãos, em geral estão com camadas de cimento no entorno. Observa-se uma cimentação ferruginosa caracterizada por finas lamelas ao redor dos grãos e no preenchimento de poros. Observa-se uma matriz siltico-argilosa. Observa-se uma grande quantidade de poros, porém a conexão entre esses poros não é frequente.

**14. Tamanho do grão:** Têm-se a predominância da granulometria de areia fina a muito grossa (90%), pouco selecionados.

**15. Angularidade e esfericidade:** Observa-se uma uniformidade no grau de angularidade e esfericidade dos grãos que compõem o arcabouço. No geral, os grãos são arredondados a sub-arredondados com grau de esfericidade moderado.

**16. Maturidade textural:** A rocha apresenta cerca de 75% de arcabouço, 5% de matriz e 20% de cimento. A relação arcabouço/matriz e a presença de grãos arredondados e esféricos, coloca estes arenitos como maduros texturalmente.

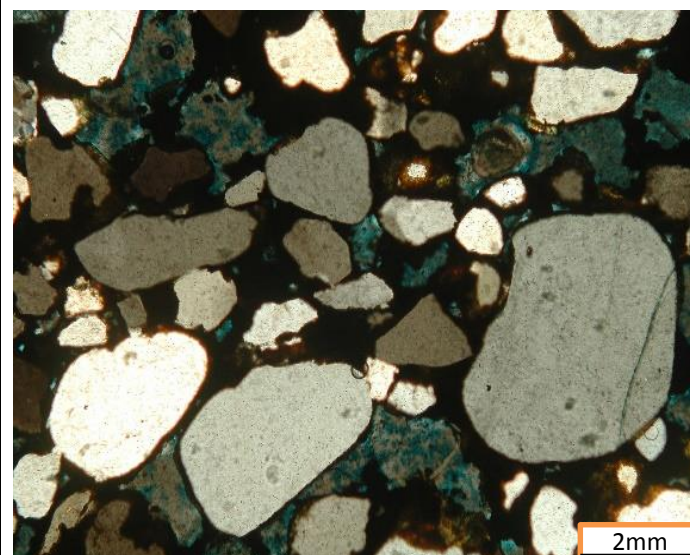
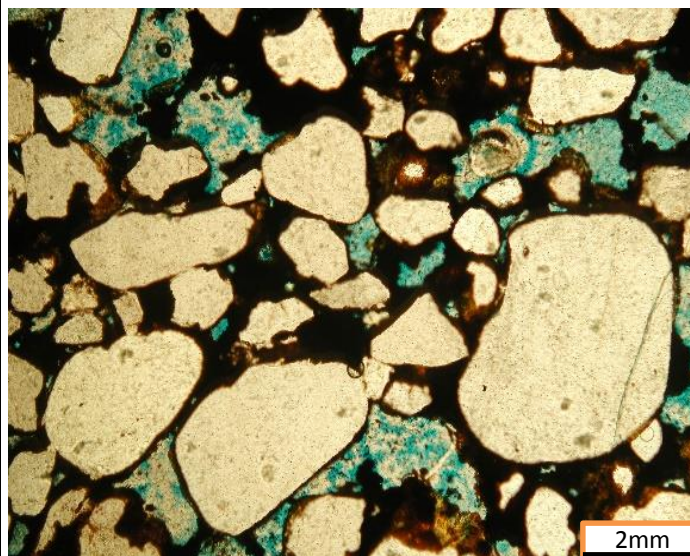
**L. Mineralogia**

- Quartzo: ocorre em grãos arredondados a sub-arredondados, bem selecionados e moderadamente esféricos. Observa-se a ocorrência de quartzo monocristalino e policristalino. Além disso, têm-se a presença de deformação em alguns grãos de quartzo evidenciado pela presença de sub-grãos e extinção ondulante.

- Feldspato: ocorrem em grãos sub-arredondados e esféricos, se apresentam intensamente alterados. Em alguns grãos observa-se geminação em tabuleiro de xadrez incipiente.

- Minerais micáceos: ocorrem em grãos tabulares, observa-se a presença de clivagem perfeita em uma direção. Em geral, se trata de muscovita, porém biotita também é observada. Alguns grãos apresentam alteração pra clorita.

- Zircão: ocorrem em grãos diminutos, com relevo alto. Os grãos se apresentam arredondados e esféricos.

**XVI. FOTOMICROGRAFIAS:**

<i>Análise modal</i>		
Mineral	%	
Quartzo	90	
Feldspato	5	
Zircão	traço	
Minerais micáceos	5	

**FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA Nº 05**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ | SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA | DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**XVII. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA:** TPJ-29B  
29B Unidade geológica: Fm. Monte Alegre**CÓD. LÂMINA:** TPJ-**XVIII. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA:**

Arenito de cor castanho avermelhado, se apresenta extremamente friável e intemperizada. Apresenta grãos de areia fina a muito fina e matriz argilosa. Os grãos do arcabouço se apresentam arredondados a sub-arredondados e esféricos, e bem selecionados. Apresenta estratificação plano paralela caracterizada por bandas milimétricas com variação na coloração e é composto mineralogicamente por quartzo e feldspato.

**XIX. DESCRIÇÃO DA LÂMINA DELGADA:****M. Resumo**

Quartzarenito de composição quartzosa, com cimentação ferruginosa, presença de argilominerais como finas películas (coating). A trama é aberta, com grãos pouco selecionados, porém arredondados. Presença de grandes poros, com porosidade em torno de 15%.

**N. Textura**

17. **Trama:** Não se observa contato direto entre os grãos, em geral estão com camadas de cimento no entorno. Observa-se uma cimentação ferruginosa caracterizada por finas lamelas ao redor dos grãos e no preenchimento de poros. Observa-se uma matriz siltico-argilosa. Observa-se uma grande quantidade de poros, porém a conexão entre esses poros não é frequente.

18. **Tamanho do grão:** Têm-se a predominância da granulometria de areia fina a média (90%), pouco selecionados.

19. **Angularidade e esfericidade:** Observa-se uma uniformidade no grau de angularidade e esfericidade dos grãos que compõem o arcabouço. No geral, os grãos são arredondados a sub-arredondados com grau de esfericidade moderado.

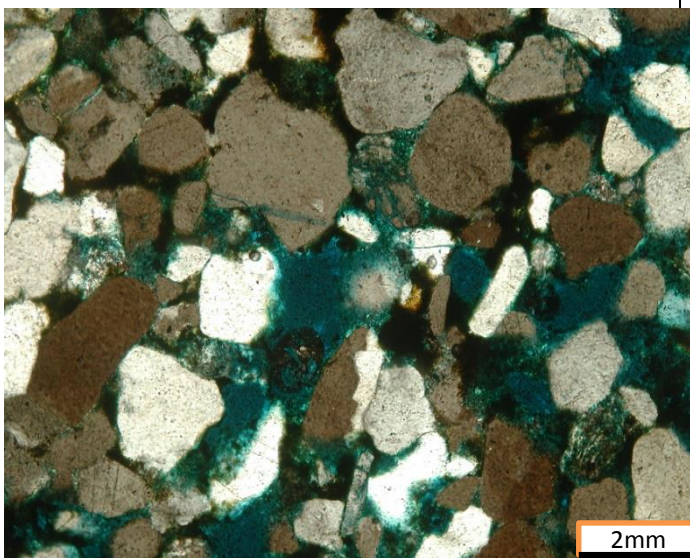
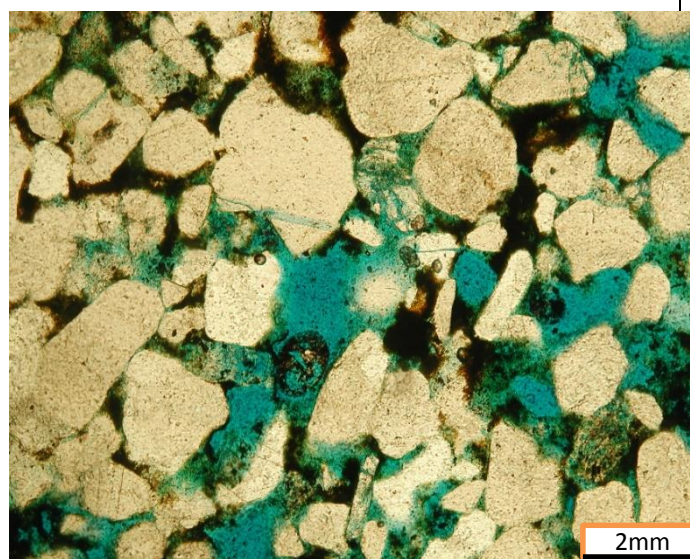
20. **Maturidade textural:** A rocha apresenta cerca de 75% de arcabouço, 5% de matriz e 20% de cimento. A relação arcabouço/matriz e a presença de grãos arredondados e esféricos, coloca estes arenitos como maduros texturalmente.

**O. Mineralogia**

- Quartzo: ocorre em grãos arredondados a sub-arredondados, bem selecionados e moderadamente esféricos. Observa-se a ocorrência de quartzo monocristalino e policristalino. Além disso, têm-se a presença de deformação em alguns grãos de quartzo evidenciado pela presença de sub-grãos e extinção ondulante.

- Feldspato: ocorrem em grãos sub-arredondados e esféricos, se apresentam intensamente alterados. Em alguns grãos observa-se geminação em tabuleiro de xadrez incipiente.

- Minerais micáceos: ocorrem em grãos tabulares, observa-se a presença de clivagem perfeita em uma direção. Em geral, se trata de muscovita, porém biotita também é observada. Alguns grãos apresentam alteração pra clorita.

**XX. FOTOMICROGRAFIAS:**

- Zircão: ocorrem em grãos diminutos, com relevo alto. Os grãos se apresentam arredondados e esféricos.

*Análise modal*

Mineral	%
Quartzo	<b>90</b>
Feldspato	<b>5</b>
Zircão	traço
Minerais micáceos	5